

Construction en pierre massive en Suisse

THÈSE N° 4999 (2011)

PRÉSENTÉE LE 15 AVRIL 2011

À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
LABORATOIRE DE CONSTRUCTION ET CONSERVATION
PROGRAMME DOCTORAL EN ARCHITECTURE ET SCIENCES DE LA VILLE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Stefano ZERBI

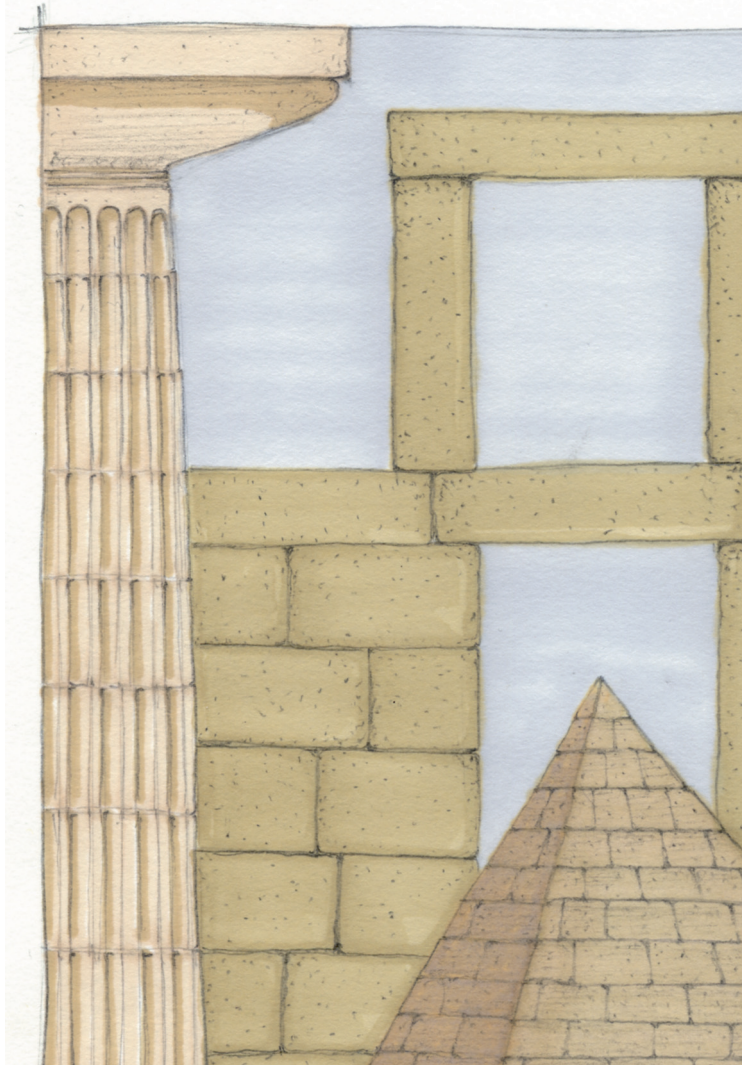
acceptée sur proposition du jury:

Prof. R. Gargiani, président du jury
Prof. L. Ortelli, directeur de thèse
Dr R. Kündig, rapporteur
Prof. A. Parriaux, rapporteur
Prof. G. Perraudin, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2011



*Alla memoria di mio padre,
Pietro Giovanni Zerbi*

Pour la réalisation de la présente thèse, mes remerciements vont, en premier lieu, à Chiara qui a su supporter mes absences et partager mes doutes et mes joies.

Et à ma mère, Maria Giovanna Zerbi, un grand merci pour le soutien et l'encouragement continu, ainsi que pour l'opportunité qu'elle m'a offert de faire des études.

Comme doctorant, en premier lieu, je remercie mon directeur de thèse, le Prof. Luca Ortelli, qui, depuis 2005, m'a soutenu dans l'idée, un peu folle, de faire du projet et de la recherche autour de la pierre naturelle en Suisse. Merci aussi parce qu'il m'a permis d'enseigner dans son Atelier.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury de thèse, qui ont accepté de lire et de juger ce travail.

Au président, Prof. Roberto Gargiani, merci également pour les discussions et les critiques eues lors des différentes Semaines Doctorales à l'Epfl.

Au Prof. Aurèle Parriaux, merci pour avoir, le premier, évoqué la possibilité de transformer en recherche doctorale mes investigations autour de la pierre naturelle et pour m'avoir soutenu dans cette direction.

Au Dr. Rainer Kündig, mes remerciements pour m'avoir ouvert, à plusieurs reprises, les portes de la SGK à Zürich et pour avoir partagé ses connaissances en matière de pierres.

Au Prof. Gilles Perraudin, un grand merci parce qu'avec ses oeuvres et ses paroles, il m'a toujours encouragé dans cette recherche patiente et obstinée.

Un remerciement particulier à Catherine Schmutz-Nicod qui a eu la patience, la gentillesse et le courage de relire le texte de la thèse, et bien d'autres de mes écritures au sujet de la pierre naturelle. Avec sa délicatesse, elle a toujours su les améliorer.

Je tiens à remercier également tous mes collègues du Laboratoire LCC.

En particulier, Sonia Pavlovic et Marco Svimbersky qui, depuis cette expérience, je me permets de considérer comme des amis. Et Eveline Galatis qui, de manière discrète, s'est toujours occupée du bon déroulement de mon travail.

Un très grand merci à Luca Conti, amis et collègue, qui m'a toujours soutenu pendant cette longue aventure. Et qui est aussi l'auteur de la couverture. J'espère de réussir à faire le même avec sa recherche.

Mes remerciements aussi aux assistantes et assistants du Laboratoire LTH3, Maria-Chiara Barone, Giulia Chemolli, Beatrice Lampariello, Anna Rosellini et Salvatore Aprea, qui ont supporté mes incursions et qui m'ont délivré des précieux conseils.

Je remercie le personnel de l'ancienne bibliothèque de la Section d'Architecture de l'Epfl pour l'aide et la patience démontrés. Un grand merci au directeur de la Bibliothèque, Steven Gheyselinck, ami et collègue de l'Ecole Doctorale qui a toujours su me faire dévier du bon chemin, afin que j'y retourne encore plus fermement.

Un remerciement particulier à Olivier Fawer, tailleur de pierre, qui m'a accompagné lors de différentes visites et qui a voulu partager avec moi ses connaissances.

Merci aussi à Florent Prisse, Annalisa Caimi et Milo Hoffmann, chers amis, et au peuple des repas du dimanche, qui m'ont offert des moments salutaires d'évasion de la recherche.

Egalement merci aux amies et amis qui étaient présent lors de ma soutenance privé et qui m'ont accueilli à la sortie de cette épreuve.

Les remerciements officiels se trouvent au début de chaque annexe de la thèse. À toutes ces personnes un grand merci également pour leur soutien sur le plan personnel.

Je remercie le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique qui a soutenu la recherche "Construction en pierre massive en Suisse", dont la présente thèse de doctorat est, en partie, l'aboutissement.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	5
RIASSUNTO	7
ZUSAMMENFASSUNG	9
TABLE DES MATIERES DETAILLEE	11
INTRODUCTION	23
1. INTRODUCTION	23
2. NÉCESSITÉ D'UNE RECHERCHE SUR LA CONSTRUCTION EN PIERRE NATURELLE	25
3. MÉTHODE	29
4. DESSINER, COMMUNIQUER ET FATALEMENT CONNAÎTRE	32
5. STRUCTURE DE LA THÈSE	38
6. BIBLIOGRAPHIE	41
Chapitre I GEOLOGIE ET PETROGRAPHIE DES ROCHES SUISES	43
1. BASES GÉNÉRALES DE GÉOLOGIE ET PÉTROGRAPHIE	43
2. INTRODUCTION A LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE	60
3. DESCRIPTION PÉTROGRAPHIQUE DES ROCHES SUISES	67
4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES ROCHES SUISES	81
5. CONCLUSIONS AU CHAPITRE	92
6. BIBLIOGRAPHIE	93
Chapitre II EXPLOITATION DE LA PIERRE NATURELLE DE TAILLE	95
1. HISTOIRE DE L'ACTIVITÉ EXTRACTIVE EN SUISSE	95
2. SITUATION ACTUELLE DU SECTEUR DE L'EXPLOITATION DES PIERRES NATURELLES	104
3. PIERRES SUISES POUVANT ÊTRE UTILISÉES DANS LA CONSTRUCTION MASSIVE	129
4. LA CARRIÈRE DE PIERRE NATURELLE. NOTIONS DE DROIT SUISSE	132
5. LA CARRIÈRE ET SON IMPACT ENVIRONNEMENTAL	137
6. CONCLUSIONS AU CHAPITRE. POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT	156
7. BIBLIOGRAPHIE	177
Chapitre III CONSTRUCTION EN PIERRE MASSIVE	183
1. ÉTUDE DE CAS: L'INDUSTRIE DE LA PIERRE NATURELLE EN FRANCE APRÈS LA SECONDE GUERRE MONDIALE	183
2. LA PIERRE NATURELLE ET LA CONSTRUCTION COURANTE	196
3. EXEMPLE D'ÉTUDE: BÂTIMENT DE LOGEMENT EN PIERRE STRUCTURELLE	226
4. MAÇONNERIES EN PIERRE NATURELLE ET SÉISMES	234
5. CONFORT ET CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	257
6. DURABILITÉ ET DURÉE DE VIE DES MAÇONNERIES EN PIERRE NATURELLE	286
7. FORMES CONTEMPORAINES D'UTILISATION DE LA PIERRE STRUCTURELLE MASSIVE	303
8. BIBLIOGRAPHIE	320
CONCLUSION	329
VERS UN NOUVEL ÂGE DE LA PIERRE.	329

«Pour moi, construire une aérogare en pierre serait une imbécillité, pour ne pas dire une folie. Mais s'imposer des structures dynamiques pour installer des trois pièces-cuisine dans des immeubles de trois à dix étages, n'est pas moins aberrant.»¹

Provocation d'un architecte réactionnaire ou analyse lucide du monde de la construction de son époque, cette affirmation de Fernand Pouillon conserve encore, quarante ans après, sa valeur d'interrogation sur l'utilisation de la pierre naturelle. En effet, depuis la révolution industrielle et l'introduction de nouveaux matériaux de construction, tels le béton et l'acier, la pierre naturelle a été progressivement confinée dans la sphère des revêtements nobles. Si nous regardons, par contre, en arrière, jusqu'au XIXe siècle, nous nous apercevons que la situation était toute autre, tant l'utilisation de ce matériau que son statut social. La pierre était, et elle est encore, de par sa grande durabilité, la constituante principale de l'environnement construit: bâtiments représentatifs, simples ruraux, ouvrages d'art, limites cadastrales et de propriétés, tous étaient réalisés en pierre naturelle, un matériau largement disponible localement, au moins dans nos pays, et dont l'exploitation requérait des investissements énergétiques réduits.

Les constructeurs locaux connaissaient, de manière empirique, les caractéristiques des roches dont ils disposaient autant pour en faciliter l'extraction, en exploitant les fractures et "faiblesses" naturelles, que pour leur sélection dans la mise en oeuvre. Grâce à leur résistance aux agents atmosphériques, augmentée par les fortes épaisseurs utilisées, les pierres taillées pouvaient être remployées.

L'investissement en travail et en énergie était ainsi amorti sur plusieurs générations.

Une adéquation entre ressource, exploitation et techniques constructives se produisait naturellement. Dans une lente évolution, la pierre naturelle arriva jusqu'à l'industrialisation des procédés d'exploitation et façonnage et permit en France, dans les années de l'après-guerre, de reconstruire des logements bon marché pour les plus démunis en utilisant une "pierre prétaillée" aux formats normalisés. Après la fin de cette "aventure", la mise en oeuvre sous forme massive a lentement disparu, pour réapparaître dans les années 1990, quand l'architecte français Gilles Perraudin a commencé à employer des blocs extraits de carrière pour la construction de bâtiments à usages divers.

Cette recherche de doctorat s'insère dans la lignée de l'expérience de Pouillon. En effet, aujourd'hui, à l'ère du développement durable et des agendas énergétiques, l'utilisation de la pierre naturelle devrait être rétablie. Dans cette optique, nous analysons dans la thèse le cas de la construction en pierre massive en Suisse.

En suivant le parcours qui mène la pierre naturelle de la montagne à l'édifice, nous avons essayé de définir une méthode pour utiliser la pierre naturelle de taille dans la construction courante, tout en respectant les contraintes actuelles en matière de durabilité, de sécurité parasismique et de réduction de la consommation énergétique. Nous avons donc tenté de démontrer que la pierre naturelle peut continuer à être considérée comme un matériau de construction à part entière, et cela en recourant à la vérification scientifique, inédite sous cette forme, de pratiques bien consolidées par les siècles.

1. Pouillon, F. 1968: *Mémoires d'un architecte*, Paris, Editions du Seuil, p. 174.

Dans un territoire restreint comme la Suisse, toutes les principales familles de roches sont présentes. Les distances réduites permettent d'en envisager une utilisation à une échelle régionale, voire nationale. Le constructeur se voit donc obligé de connaître leurs caractéristiques géologiques, pétrographiques et techniques afin de pouvoir les sélectionner, puisque les propriétés du matériau influencent son comportement en oeuvre autant au niveau statique que de durabilité, mais également elles déterminent les techniques qui sont employées pour l'extraire du gisement et pour le façonner. En effet, avant d'être employée, la roche doit devenir pierre de construction: l'exploitation de la carrière, ses techniques contemporaines ainsi que les différentes formes de façonnage nécessitent d'être connues et analysées. Ces procédés n'influencent pas seulement le format des pierres, mais aussi leur coût autant énergétique que financier. Dans le deuxième chapitre de la recherche, nous étudions donc l'exploitation de la carrière de pierre naturelle. Les connaissances empiriques acquises pendant les visites de terrain ainsi que les données scientifiques produites par les essais de laboratoire, dont presque chaque producteur dispose actuellement, nous ont permis de sélectionner les roches suisses utilisables dans la construction massive et de les rassembler dans des fiches synthétiques. De plus, la disponibilité en pierre naturelle est la condition essentielle pour en envisager une utilisation dans la construction. La gestion et la remise en état après exploitation sont traités autant au niveau environnemental que de l'aménagement du territoire. Les connaissances acquises sur les pierres naturelles, leurs caractéristiques, leur exploitation servent au constructeur pour définir les modes de mise en oeuvre. Celle-ci ne découle pas simplement de critères constructifs ou statiques, mais, aujourd'hui, également de la résistance en cas de séisme, du confort thermique, de la durée de vie et de la durabilité. Nous proposons dans notre travail d'utiliser la maçonnerie de pierre naturelle massive pour trois types de constructions: une structure porteuse pour des immeubles de logements; un revêtement auto-porteur pour façades et une structure ou un revêtement de murs de soutènement. Dans tous ces cas de figure, nous envisageons que le projet se réalise dans une adéquation entre la roche, ses modes d'exploitation et les exigences constructives actuelles, afin de démontrer l'actualité de ce matériau ancestral.

Mots-clés: pierre naturelle - exploitation des carrières - construction en pierre massive - pierre prétaillée - pierre structurelle - gestion de l'exploitation - valorisation de la ressource - inventaire de cycle de vie pour la pierre massive

ABSTRACT

«For me, to build an air terminal with stone would be a stupidity, not to say a madness. But to use dynamic structures to fit three-roomed flats with kitchen in buildings from three to ten floors, is not less aberrant.»¹

Provocation of a reactionary architect or a lucid analyze of the world of the construction of his time, this assertion of Fernand Pouillon still preserves, forty years after, its value of interrogation on the use of the natural stone. Indeed, since the industrial revolution and the introduction of new construction materials, like concrete and steel, the natural stone was gradually confined in the sphere of the noble claddings. If we look at behind, on the other hand, until the 19th century, we realize that the situation was very different, as well the use of this material as its social status. The stone was, and it still is, thanks to its great durability, the principal constituent part of the built environment: public buildings, simple rural buildings, civil engineering works, cadastral limits and limits of properties, all were made out of natural stone, a material largely available locally, at least in our countries, and whose exploitation required reduced energy investments.

The local builders knew, in an empirical way, the characteristics of the rocks they had as much to facilitate their extraction, by exploiting the natural fractures and "weaknesses", as for their selection. Thanks to their resistance to the atmospheric agents, increased by the strong thicknesses used, the cut stones could be employed again. The investment in work and energy was thus amortized on several generations.

An adequacy between the resource, the exploitation and the techniques occurred naturally. In a slow evolution, the natural stone arrived until the industrialization of the processes of exploitation and shaping and allowed in France, in the years of the post-war period, to rebuild cheap blocks of flats by using a "pre-cut stone" with standardized dimensions. After the end of this "adventure", the use of natural stone in massive form slowly disappeared, to reappear in the years 1990, when the French architect Gilles Perraudin started to employ again dimensional stone, simply cut in the quarry, for the construction of buildings of various use.

Our PhD thesis fit into the tradition of the experience of Fernand Pouillon. Indeed, today, at the era of sustainable development and the energy diaries, the use of natural stone as building material should be restored. Accordingly, we treat in this research the case of massive stone construction in Switzerland.

While following the course which leads the natural stone of the mountain to the building, we tried to define a method to use dimensional stone in the current construction industry, while respecting the current constraints as regards durability, seismic safety and reduction of energy consumption. We thus tried to show that the natural stone can continue to be regarded as a whole construction material, and this by using the scientific checking, new in this form, of practices well consolidated by the centuries.

1. Pouillon, F. 1968: *Mémoires d'un architecte*, Paris, Editions du Seuil, p. 174.

In a restricted territory like Switzerland, all the principal families of rocks are present. The reduced distances make it possible to consider their use with regional scales, even national. The builder thus sees himself obliged to know their geological, petrographic and technical characteristics in order to be able to select them, since the properties of the material influence its behavior in the building as much at the static level as of durability, but also they determine the techniques which are employed to extract it from the deposit and to shape it.

Indeed, before being employed, the rock must become dimensional stone: the exploitation of the quarry, its contemporary techniques as well as the various forms of shaping require to be known and analyzed. These processes do not influence only the dimensions of the stones, but their cost as much for energy as financial. In the second chapter of this research, we study the exploitation of the natural stone quarry. The empirical knowledge acquired during the field visits as well as the scientific data produced by the laboratory tests, that almost each producer currently has, enabled us to select the Swiss rocks for the massive construction and to collect them in all-encompassing cards.

Moreover, the availability of natural stone is the essential condition to consider its use in the construction industry. The management and the restoration after exploitation of quarries are treated as much at the environmental level as of regional development.

The knowledge acquired on the natural stones, their characteristics and their exploitation is used by the builder to define their use in building. This one does not follow simply from constructive or static criteria, but, today, also from seismic resistance, thermal comfort, lifespan and durability. We propose in our work to use the dimensional stone masonry for three types of constructions: load-bearing structure for buildings; self-supporting cladding for façades and load-bearing structure or cladding for retaining walls. In all these cases, we envisage that the project is carried out in an adequacy between the rock, its modes of exploitation and the current constructive requirements, in order to demonstrate the topicality of this ancestral material.

Keywords: dimensional stone - stone exploitation - building with massive stone - pre-cut stone - load-bearing stone - exploitation management - valorization of the resource - Life Cycle's Inventory for dimensional stone

«Pour moi, construire une aérogare en pierre serait une imbécillité, pour ne pas dire une folie. Mais s'imposer des structures dynamiques pour installer des trois pièces-cuisine dans des immeubles de trois à dix étages, n'est pas moins aberrant.»¹

Provocazione di un architetto reazionario oppure lucida analisi del settore della costruzione dell'epoca, quest'affermazione di Fernand Pouillon conserva, a quarant'anni di distanza, il suo valore di riflessione sull'utilizzo della pietra naturale. In effetti, a seguito della rivoluzione industriale e dell'introduzione di nuovi materiali per la costruzione, come il calcestruzzo e l'acciaio, la pietra naturale è stata progressivamente relegata nella sfera dei materiali nobili per il rivestimento. Se si analizza però la situazione fino al XIX secolo, essa era completamente diversa, sia per l'utilizzo del materiale sia per il suo status sociale. La pietra naturale era, e lo è ancora oggi grazie alla sua grande durezza, il principale elemento costitutivo dell'ambiente costruito: gli edifici pubblici, quelli rurali, le opere di genio civile, i termini catastali e di proprietà, erano tutti realizzati in pietra naturale, poiché era un materiale localmente disponibile, per lo meno nel nostro paese, e la cui estrazione necessitava di poca energia.

La conoscenza empirica delle caratteristiche delle rocce locali permetteva ai costruttori di facilitarne l'estrazione, sfruttando le fratture e le "debolezze" naturali, e la selezione in fase di messa in opera. La pietra naturale lavorata poteva essere riutilizzata grazie alla grande resistenza agli agenti atmosferici, aumentata dagli importanti spessori utilizzati. L'investimento in lavoro e in energia era così distribuito su più generazioni.

Un adeguamento fra risorsa, estrazione e tecniche costruttive si produceva naturalmente. Una lenta evoluzione portò la pietra naturale sino all'industrializzazione dei processi estrattivi e di taglio che permisero in Francia, durante gli anni seguenti alla fine della seconda guerra mondiale, la ricostruzione di alloggi buon mercato per gli sfollati utilizzando la pietra "pretagliata" con formati normalizzati. Finita quest'avventura, l'utilizzo in forma massiccia della pietra naturale scomparve lentamente, per riapparire, negli anni novanta del XX secolo, quando l'architetto Gilles Perraudin ha iniziato a costruire edifici di vario genere con dei blocchi grezzi di pietra naturale.

Questa ricerca dottorale s'ispira direttamente all'esperienza di Pouillon. In effetti, nell'epoca dello sviluppo sostenibile e delle agende energetiche, l'utilizzo della pietra naturale dovrebbe essere rinnovato. In quest'ottica è analizzato, nella tesi, il caso della costruzione in pietra naturale massiccia in Svizzera.

Seguendo il percorso che porta la pietra dalla montagna all'edificio, si è cercato di definire un metodo per l'utilizzo della pietra naturale nella costruzione corrente, rispettando le attuali esigenze in materia di sostenibilità, di sicurezza antisismica e di riduzione del consumo energetico. Si è dunque tentato di dimostrare che la pietra naturale può essere ancora considerata come un materiale edile a tutti gli effetti, e ciò grazie al ricorso alla verifica scientifica, inedita in questa forma, di pratiche ben

1. Pouillon, F. 1968: *Mémoires d'un architecte*, Paris, Editions du Seuil, p. 174. «Per me, costruire un'aerostazione in pietra sarebbe un'imbecillità, per non dire una follia. Ma imporsi [l'utilizzo, n.d.T.] di strutture dinamiche per collocarvi dei tre locali più cucina in edifici da tre a dieci piani, non è meno aberrante.» (traduzione dell'autore)

consolidate nel tempo.

Il territorio svizzero, ben circoscritto geograficamente, possiede praticamente tutte le principali famiglie di rocce. Le distanze ridotte permettono di prevedere un utilizzo del materiale a scala regionale, vedi nazionale. Il costruttore è obbligato a conoscere le caratteristiche geologiche, petrografiche e tecniche delle diverse rocce per poterle selezionare, perché le proprietà del materiale influiscono sul suo comportamento in opera sia a livello statico sia della durezza, e determinano inoltre le tecniche estrattive e di lavorazione. In effetti, prima di poter essere utilizzata, la roccia deve diventare pietra da costruzione: la coltivazione della cava, le sue tecniche contemporanee così come le diverse possibilità di lavorazione devono essere conosciute e analizzate. Questi processi non influenzano esclusivamente le dimensioni dell'elemento lapideo, ma anche i suoi costi sia energetici sia economici. Nel secondo capitolo della ricerca, sono perciò analizzate la coltivazione della cava e l'estrazione della pietra naturale. Le conoscenze empiriche acquisite durante le visite sul terreno così come i dati scientifici prodotti grazie alle prove in laboratorio, dei quali oggi quasi tutti i produttori dispongono, ci hanno permesso di determinare quali rocce svizzere siano utilizzabili per la costruzione massiccia e di raggrupparle in una serie di schede sintetiche.

La disponibilità di pietra naturale è la condizione essenziale per progettare un utilizzo maggiore nella costruzione. Si è dunque trattato anche della gestione della cava e del suo recupero alla fine della coltivazione, sia a livello ambientale sia di sviluppo del territorio.

Le conoscenze acquisite sulle pietre naturali, le loro caratteristiche e l'estrazione servono al costruttore per definire le soluzioni di messa in opera. Queste ultime non derivano solo da criteri costruttivi o statici, ma, soprattutto oggi, da esigenze antisismiche, di comfort termico, di aumento della durata di vita e di sostenibilità. L'utilizzo della pietra naturale in forma massiccia è proposto dunque per tre tipi di costruzioni: strutture portanti per edifici di abitazione; rivestimenti auto-portanti per facciate, e strutture o rivestimenti per muri di sostegno. In tutti questi casi, si auspica che il progetto si realizzi attraverso un adeguamento fra la roccia, le tecniche estrattive e le esigenze costruttive attuali, al fine di dimostrare l'attualità di questo materiale ancestrale.

Parole chiave: pietra naturale massiccia - coltivazione delle cave - costruzione in pietra - pietra pretagliata - pietra strutturale - gestione dell'estrazione - valorizzazione della risorsa - inventario di ciclo vita per la pietra naturale massiccia

ZUSAMMENFASSUNG

«Pour moi, construire une aérogare en pierre serait une imbécillité, pour ne pas dire une folie. Mais s'imposer des structures dynamiques pour installer des trois pièces-cuisine dans des immeubles de trois à dix étages, n'est pas moins aberrant.»¹

Herausforderung eines reaktionären Architekten oder klare Analyse der Bauwelt ihres Zeitalters, behält diese Behauptung von Fernand Pouillon, noch vierzig Jahre später, seinen Wert als Überlegung über die Verwendung vom Naturstein für tragende Strukturen. Seit der industriellen Revolution und die Einführung neuer Baumaterialien, wie der Beton und der Stahl, war der Naturstein progressiv im Raum der edlen Verkleidungen eingeschlossen. Wenn wir anschauen dagegen rückwärts bis zum XIX. Jahrhundert, wir merken, dass die Lage ganz andere war, sowohl die Verwendung dieses Materials als auch seines sozialen Statuts. Der Stein war, und er ist noch im Namen seiner grossen Dauerhaftigkeit die Hauptkomponente unserer gebauten Umwelt: Monumente, einfache Landhäuser, Kunstwerke, bis zu Grenzsteinen, waren alle aus Naturstein gemacht, weil er ein verfügbares Material des Orts war, und dessen Abbau begrenzte Investitionen im Bezug zur Energie erforderte.

Die lokalen Erbauer kannten, empirisch, die Eigenschaften der verfügbaren Felsen so gut, dass sie die natürlichen Brüche und Schwächen für die Gewinnung des Materials nutzten und auch für die Auswahl in der Anwendung. Dank ihre Festigkeit gegen Verwitterungen, die durch Verwendung einer starken Dicke erhöht wurde, konnten die Natursteine wieder verwendet werden. Die Investition in Arbeit und in Energie wurde so auf mehreren Generationen abgedeckt.

Eine Anpassung zwischen der Ressource, den Gewinnungsmethoden und den konstruktiven Lösungen, trat natürlich ein. In einer langsamen Entwicklung kam der Naturstein bis zur Industrialisierung der Abbau- und Bearbeitungsverfahren an, und er erlaubte, in Frankreich, in den Jahren der Nachkriegszeit, billige Wohnungen wieder aufzubauen. Eine standardisierte Produkte, der "vorbehaute Naturstein", war für die tragende Mauern verwendet. Nach dem Ende dieses Abenteuers, ist die Aufwendung in massiver Art langsam verschwunden, um in den neunziger Jahren wieder zu erscheinen, wenn der französische Architekt Gilles Perraudin begonnen hat, einfache abgebaute Blöcke für die Konstruktion verschiedenen Gebäuden wieder zu verwenden.

Diese Untersuchung fügt sich in die Nachkommenschaft der Erfahrung von Pouillon ein. In der Tat heute, am Zeitalter der nachhaltigen Entwicklung und der Energieagenden, sollte die Verwendung von Naturstein im Baubereich wiederhergestellt werden. Unter diesem Gesichtspunkt, wurde das Thema Massivsteinbau in der Schweiz untersucht.

Durch den Lauf, der der Naturstein vom Gebirge zum Gebäude führt, wurde es versucht, eine Methode zu definieren, um die Naturstein im heutigen Bau zu verwenden, die die aktuellen Anforderungen der Bauphysik, der Erdbebensfestigkeit und der Nachhaltigkeit erfüllen kann. Wir haben also versucht zu beweisen, dass der Naturstein weiterhin als ein eigenständiges

1. Pouillon, F. 1968: *Mémoires d'un architecte*, Paris, Editions du Seuil, p. 174. «Für mich wäre es eine Dummheit, einen Flughafen mit Naturstein zu bauen, nicht zu sagen einen Wahnsinn. Aber sich dynamischen Strukturen zu besteuern, um Dreizimmerwohnungen mit Küche in Gebäuden von drei bis zehn Geschosse zu einführen, ist es nicht weniger absurd.» (Übersetzung des Autors)

Konstruktionsmaterial angesehen werden kann. Die Untersuchung wurde so in drei Hauptthemen geteilt. Das erste befasst sich mit dem Rohstoff von einer geologischen, petrographischen und technologischen Ansicht her, das zweite nahm den Steinbruch und die Gewinnung durch, und der dritte Themenbereich befasst sich mit dem Massivsteinbau. Die ersten zwei Themen werden kurz verfasst, und das dritte wird mehr entwickelt.

In der Schweiz sind, trotz ihres kleinen Territoriums, fast alle Felsenfamilien zu finden. Die begrenzten Distanzen erlauben, eine Verwendung vom Naturstein in einem regionalen sogar nationalen Maßstab in Betracht zu ziehen. Der Erbauer sieht sich also gezwungen die geologischen, petrographischen und technischen Eigenschaften der Steinen zu kennen, um sie auswählen zu können, weil sie das Verhalten in Werk sowohl auf dem statischen Niveau als auch der Dauerhaftigkeit beeinflussen. Diese Eigenschaften bestimmen ebenfalls die Gewinnungs- und Bearbeitungsmethoden.

In der Tat, bevor er aufgewendet wird, muss der Felsen einen Baustein werden: der Abbau im Steinbruch, ihre zeitgenössischen Techniken, wie die verschiedenen Arten von Bearbeitung sollten bekannt sein und analysiert. Diese Verfahrensweisen beeinflussen nicht nur die Masse der Steine, sondern so ihre finanziellen und energetischen Kosten. Die wesentlichen Steinbrüche und Steinbetriebe der Schweiz wurden besucht, um direkten Daten über die Herstellung und den Bau zu sammeln. Diese Angaben sowie die technischen, die durch die Laborprüfungen produziert wurden, und die fast jeder Produzent heute zu Verfügung hat, haben uns erlaubt, die brauchbaren Schweizer Natursteine für den Massivbau auszuwählen, und sie in zusammenfassenden Karten zusammenzutragen.

Ausserdem ist die Natursteinverfügbarkeit die wesentliche Bedingung, um davon eine grössere Verwendung im Bau in Betracht zu ziehen. Die Verwaltung und die Sanierung der Steinbrüche wurden sowohl im Bezug zur Umwelt als auch zur Raumplanung untersucht.

Die auf den Natursteinen, ihren Eigenschaften, ihrem Abbau erworbenen Kenntnisse dienen dem Erbauer, um die Methoden und die Lösungen der Aufwendung zu definieren. Die Aufwendungsart ergibt sich nicht einfach aus konstruktiven oder statischen Kriterien, sondern heute, ebenfalls aus der Erdbebensfestigkeit, aus dem thermischen Komfort, aus der Lebensdauer und der Dauerhaftigkeit. Wir schlagen, in dieser Untersuchung, vor, das massive Natursteinmauerwerk für drei Bauarten zu benutzen: tragende Strukturen für Wohnungsgebäude; selbsttragende Verkleidungen für Fassaden und Strukturen oder Verkleidungen von Stützenmauern. In allen diesen Fällen gehen wir davon aus, dass das Projekt sich in einer Anpassung zwischen dem Felsen, seinen Abbaumethoden und den derzeitigen konstruktiven Forderungen entwickelt wurde, um die Aktualität dieses überlieferten Materials zu beweisen.

Schlussworte: massiver Naturstein - Gewinnung von Steinbrüchen - Natursteinbau - vorbehauter Naturstein - struktureller Naturstein - Verwaltung des Abbaus - Aufwertung der Ressource - Lebenszyklusinventar für massiven Naturstein

TABLE DES MATIERES DETAILLEE

TABLE DES MATIERES	1
RÉSUMÉ	3
ABSTRACT	5
RIASSUNTO	7
ZUSAMMENFASSUNG	9
TABLE DES MATIERES DETAILLEE	11
INTRODUCTION	23
1. INTRODUCTION	23
1.1. La recherche "Construction en pierre massive en Suisse"	23
2. NÉCESSITÉ D'UNE RECHERCHE SUR LA CONSTRUCTION EN PIERRE NATURELLE	25
2.1. Le Développement Durable et les matériaux de construction	25
2.2. La pierre naturelle suisse: un matériau local et largement disponible	26
2.3. La pierre naturelle et la recherche académique en Suisse	26
2.3.1. Le matériau pierre naturelle	26
2.3.2. La pierre naturelle comme matériau de construction	26
2.3.3. La recherche sur la pierre aujourd'hui	28
2.4. La pierre naturelle et la construction courante	28
3. MÉTHODE	29
3.1. De la ressource à la mise en oeuvre	29
3.1.1. L'enseignement et l'oeuvre de Gilles Perraudin	30
3.2. Une approche interdisciplinaire	32
4. DESSINER, COMMUNIQUER ET FATALEMENT CONNAÎTRE	32
4.1. Les dessins "géologiques"	33
4.1.1. John Ruskin (1819-1900) et Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (1814-1879)	33
4.1.2. Les précédents historiques. Les artistes de la Renaissance italienne	35
4.1.3. Saverio Salvioni (1755/66?-1833) et les carrières de Carrara	36
4.2. Les illustrations comme explication de la construction de l'architecture	36
4.2.1. Auguste Choisy (1841-1909)	37
4.2.2. L'axonométrie comme moyen de compréhension et outil de projet	38
5. STRUCTURE DE LA THÈSE	38
5.1. Les chapitres	38
5.2. Les illustrations	40

5.3. Les annexes	40
6. BIBLIOGRAPHIE	41
Chapitre I GEOLOGIE ET PETROGRAPHIE DES ROCHES SUISES	43
1. BASES GÉNÉRALES DE GÉOLOGIE ET PÉTROGRAPHIE	43
1.1. Principes de géologie	43
1.1.1. Formation des roches	46
1.2. Principes de minéralogie et pétrographie	52
1.2.1. Minéraux constitutifs des roches	52
1.2.2. Composition et caractéristiques des roches	56
2. INTRODUCTION A LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE	60
2.1. Le Jura	60
2.1.1. Le Jura Plissé	61
2.1.2. Le Jura Tabulaire	61
2.2. Le Plateau	61
2.2.1. La Molasse	62
2.3. Les Alpes	63
2.3.1. Les Massifs Cristallins: Massif des Aiguilles Rouges et de l'Arpille; Massif du Mont Blanc; Massif de l'Aar; Massif du Gothard et Massif Intermédiaire du Tavetsch	64
2.3.2. Les nappes: Helvétiques; Penniques et Austroalpines	65
2.3.3. Le Jeune Intrusif: le granite du Bergell	66
2.3.4. Les Alpes méridionales (Sudalpin)	66
3. DESCRIPTION PÉTROGRAPHIQUE DES ROCHES SUISES	67
3.1. Les grès	68
3.1.1. Grès arkosiques	68
3.1.2. Grès calcaires	69
3.1.3. Grès coquilliers	70
3.1.4. Calcaires arénacés et grès du Flysch	71
3.2. Les brèches et conglomérats	72
3.2.1. Brèches quartzeuses du Verrucano	72
3.2.2. Conglomérats (Nagelfluh)	72
3.3. Les calcaires	72
3.3.1. Calcaires récifaux (ou construits)	73
3.3.2. Calcaires spathiques (sparitiques ou à échinodermes)	74
3.3.3. Calcaires oolithiques	74
3.3.4. Calcaires siliceux	75
3.3.5. Tufs calcaires	75
3.3.6. Les roches calcaires d'Arzo	76

3.4. Les marbres	76
3.4.1. <i>Marbre de Castione</i>	76
3.4.2. <i>Marbre de Peccia</i>	77
3.5. Les schistes	77
3.6. Les granites	78
3.7. Les gneiss	79
3.8. Les amphibolites et serpentinites	80
4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES ROCHES SUISSES	81
4.1. Introduction	81
4.2. Masse volumique et porosité	82
4.3. Résistance mécanique: compression, traction et module d'élasticité	84
4.4. Coefficient d'absorption d'eau	85
4.5. Gélivité	86
4.6. Caractéristiques thermiques des roches	86
4.6.1. <i>Conductivité thermique</i>	86
4.6.2. <i>Coefficient de dilatation thermique linéaire</i>	87
4.7. Résistance aux agents atmosphériques	87
4.7.1. <i>Principaux types d'altérations et de dégradations des pierres naturelles de construction</i>	88
4.7.2. <i>Durabilité des différentes familles de pierres naturelles dans la construction</i>	91
5. CONCLUSIONS AU CHAPITRE	92
6. BIBLIOGRAPHIE	93
Chapitre II EXPLOITATION DE LA PIERRE NATURELLE DE TAILLE	95
1. HISTOIRE DE L'ACTIVITÉ EXTRACTIVE EN SUISSE	95
1.1. Historique	95
1.2. Évolution du marché économique	97
1.2.1. <i>Problèmes de l'approche du secteur économique</i>	98
1.2.2. <i>Nombre de carrières</i>	98
1.2.3. <i>Distribution géographique des carrières</i>	99
1.2.4. <i>Types de roches exploitées</i>	101
1.2.5. <i>Nombre et taille des entreprises</i>	101
1.2.6. <i>Production</i>	101
1.2.7. <i>Importations et exportations</i>	103
2. SITUATION ACTUELLE DU SECTEUR DE L'EXPLOITATION DES PIERRES NATURELLES	104
2.1. Carrières actuellement exploitées	104
2.2. Types de carrières	104

2.2.1. <i>Carrière en flanc de taille</i>	105
2.2.2. <i>Carrière en fosse</i>	105
2.2.3. <i>Carrière en puits</i>	106
2.2.4. <i>Carrière souterraine</i>	106
2.3. Techniques d'extraction	108
2.3.1. <i>Planification de l'extraction</i>	108
2.3.2. <i>Enlèvement de la découverte</i>	108
2.3.3. <i>Extraction de la pierre naturelle</i>	109
2.3.4. <i>Coins et coins écarteurs</i>	110
2.3.5. <i>Ecarteurs hydrauliques</i>	110
2.3.6. <i>Mortiers expansifs</i>	111
2.3.7. <i>Perforation en ligne</i>	111
2.3.8. <i>Découpe par sciage</i>	112
2.3.9. <i>Explosifs</i>	113
2.3.10. <i>Flame-jet</i>	113
2.3.11. <i>Water-jet</i>	114
2.4. Organisation de la carrière	117
2.4.1. <i>Infrastructure minimale d'une carrière contemporaine</i>	117
2.4.2. <i>Extraction par une entreprise tierce</i>	117
2.5. Façonnage et taille de la pierre naturelle	119
2.5.1. <i>Façonnage en carrière</i>	119
2.5.2. <i>Taille en atelier</i>	120
2.5.3. <i>Outils pour la finition de surface</i>	120
2.6. Dimensions des blocs extraits	122
2.7. Manutention et transport en carrière	123
2.8. Situation actuelle du marché	124
2.8.1. <i>Le marché mondial de la pierre naturelle</i>	124
2.8.2. <i>Distribution géographique des carrières</i>	124
2.8.3. <i>Types de roches exploitées</i>	124
2.8.4. <i>Nombre et taille des entreprises</i>	125
2.8.5. <i>Production</i>	126
2.8.6. <i>Importations et exportations</i>	126
3. PIERRES SUISSES POUVANT ÊTRE UTILISÉES DANS LA CONSTRUCTION MASSIVE	129
3.1. Critères de sélection	129
3.1.1. <i>Propriétés pétrographiques et physiques</i>	129
3.1.2. <i>Propriétés mécaniques</i>	129
3.1.3. <i>Propriétés industrielles</i>	130
3.1.4. <i>Propriétés esthétiques</i>	130
3.2. Types sélectionnés	130

3.3. Caractéristiques	132
3.4. Dimensions	132
4. LA CARRIÈRE DE PIERRE NATURELLE. NOTIONS DE DROIT SUISSE	132
4.1. Le droit et les activités d'exploitation des ressources du sous-sol	133
4.2. La "carrière" dans le droit administratif suisse	133
4.2.1. Niveau fédéral	133
4.2.2. Niveau cantonal	134
4.3. La carrière de pierre naturelle et l'aménagement du territoire	135
4.4. La carrière de pierre naturelle et la protection de l'environnement et du paysage	136
5. LA CARRIÈRE ET SON IMPACT ENVIRONNEMENTAL	137
5.1. Planification	137
5.2. Exigences pour l'aménagement du territoire	138
5.2.1. Principes fédéraux	138
5.2.2. Bases cantonales	138
5.2.3. Communes	138
5.3. Octroi du permis de construire	139
5.4. Etude d'Impact Environnemental (EIE)	139
5.4.1. Principes fédéraux	139
5.4.2. Bases cantonales	139
5.5. Approche interdisciplinaire et coordination	139
5.5.1. L'importance de l'avant-projet	140
5.6. La propriété du sol	140
5.7. Garanties et assurances	140
5.8. Gestion. Vers une utilisation intégrale des produits de l'exploitation	141
5.8.1. La définition de "déchet"	141
5.8.2. La décharge comme emplacement temporaire et nouveau gisement	142
5.8.3. Récupération des chutes d'exploitation et de production	142
5.8.4. Blocs de qualité inférieure et blocs informes	143
5.8.5. "Objets trouvés" en pierre naturelle	144
5.8.6. Granulats mixtes pour remplissages	144
5.8.7. Agrégats pour ballast ferroviaire, béton et enrobé	145
5.8.8. Concentrés minéraux	145
5.8.9. Terrain végétal, couches d'étanchéité et produits pour la construction	146
5.8.10. Formes de valorisation présentes dans les carrières analysées	146
5.9. Réduction de la demande d'énergie	147
5.10. Remise en état après exploitation	148
5.10.1. Estimation de la "valeur" d'une carrière	148

5.11. Formes de remise en état	149
5.11.1. <i>Récupération naturelle (Remise en état de nature)</i>	150
5.11.2. <i>Récupération productive</i>	150
5.11.3. <i>Récupération technique</i>	150
5.11.4. <i>Récupération urbanistique et fonctionnelle</i>	150
5.12. Exemples de réutilisation de carrières de pierre naturelle	151
5.12.1. <i>Parc des sons aux carrières du Sinis à Riola Sardo, Oristano, Sardaigne (Italie)</i>	151
5.12.2. <i>La Cathédrale d'images aux carrières des Grands Fonts aux Baux de Provence (France)</i>	152
5.12.3. <i>Les "latomies" de Syracuse, Sicile (Italie)</i>	153
5.12.4. <i>Les carrières de St-Triphon, commune d'Ollon, canton de Vaud (Suisse)</i>	154
6. CONCLUSIONS AU CHAPITRE. POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT	156
6.1. Exemple de la "carrière urbaine". Valorisation de la ressource "pierre naturelle" lors de travaux d'excavations	156
6.1.1. <i>Introduction</i>	156
6.1.2. <i>La nouvelle salle de gymnastique du gymnase de la Cité-Mercerie à Lausanne (1990-1992).</i>	158
6.1.3. <i>La fouille pour le nouvel herbier des Conservatoire et Jardin Botanique de la Ville de Genève (juin-août 2010)</i>	162
6.1.4. <i>De la fouille à la carrière. Une méthode possible pour l'exploitation d'une "carrière urbaine"</i>	165
6.1.5. <i>Conclusions</i>	170
6.2. Nouvelle ouverture et réouverture	171
6.2.1. <i>Liste des critères</i>	173
6.3. Marché économique	176
7. BIBLIOGRAPHIE	177
Chapitre III CONSTRUCTION EN PIERRE MASSIVE	183
1. ÉTUDE DE CAS: L'INDUSTRIE DE LA PIERRE NATURELLE EN FRANCE APRÈS LA SECONDE GUERRE MONDIALE	183
1.1. Introduction	183
1.1.1. <i>La reconstruction en France après la Seconde Guerre mondiale</i>	184
1.2. Les précédents historiques	184
1.2.1. <i>Le Paris haussmannien</i>	184
1.3. Les fondements	185
1.3.1. <i>Maçonnerie et préfabrication</i>	185
1.3.2. <i>Industrialisation et normalisation de l'exploitation de la pierre naturelle</i>	186
1.4. La matière première: les calcaires	187
1.4.1. <i>La classification et la réglementation des roches</i>	187
1.4.2. <i>Les formats standardisés</i>	188
1.4.3. <i>La mise en oeuvre</i>	190
1.5. Un procédé "traditionnel évolué"	190

1.5.1. Rationalisation de la filière productive	190
1.5.2. Evolution des machines	190
1.6. Les exemples construits	192
1.6.1. Une approche quantitative	192
1.7. Fernand Pouillon	193
1.7.1. La pierre prétaillée à travers les écrits de Fernand Pouillon	193
1.8. Conclusions	194
2. LA PIERRE NATURELLE ET LA CONSTRUCTION COURANTE	196
2.1. L'exemple des maisons individuelles préfabriquées au XXIIIe Salon des Arts Ménagers à Paris en 1954	196
2.2. La pierre structurale	198
2.2.1. Une forme de préfabrication	198
2.3. La maçonnerie comme système constructif	199
2.3.1. La maçonnerie non armée	200
2.3.2. Murs et trilithes	200
2.4. Conception et réalisation de maçonneries non armées en pierre naturelle massive	202
2.4.1. Influence des techniques d'exploitation sur les éléments de construction en pierre naturelle	203
2.4.2. Le cadre normatif suisse: les normes SIA pour la construction en maçonnerie	206
2.4.3. Les éléments et leur appareillage	206
2.4.4. Mortiers et joints	208
2.4.5. Utilisation du diagramme de la Recommandation SIA V178 pour la conception de nouvelles maçonneries en pierre naturelle	209
2.4.6. Calepinage, transport et entreposage des blocs des maçonneries	210
2.4.7. Mise en oeuvre des maçonneries	211
2.4.8. Les éléments structurels horizontaux: les planchers	216
2.4.9. Les ouvertures	216
2.5. Exemples d'application	220
2.5.1. Calcaire: le roc de la Cernia (Fiche 20, Annexe A.1, et Planche XII)	220
2.5.2. Grès: le grès de la Molasse de Berne (Fiche 2, Annexe A.1, et Planche XIII)	222
2.5.3. Gneiss: les ortho- et paragneiss du canton du Tessin (Fiches 7-13-14-16-18-19, Annexe A.1, et Planche XIV)	222
3. EXEMPLE D'ÉTUDE: BÂTIMENT DE LOGEMENT EN PIERRE STRUCTURELLE	226
3.1. Projet	227
3.1.1. Principes de base	227
3.1.2. Deux variantes structurelles	227
3.1.3. Choix des pierres naturelles	227
3.2. Construction	228
3.2.1. Fondations	228

3.2.2. <i>Maçonnerie</i>	228
3.2.3. <i>Dalles</i>	228
3.3. Quelques considérations sur les coûts d'une maçonnerie en pierre naturelle massive	229
3.3.1. <i>Comparaison entre solutions constructives en pierre naturelle</i>	229
3.3.2. <i>Comparaison entre construction en pierre massive et autres structures porteuses</i>	230
4. MAÇONNERIES EN PIERRE NATURELLE ET SÉISMES	234
4.1. Bases théoriques. Le séisme	234
4.1.1. <i>La sismologie</i>	234
4.2. Le séisme en Suisse	234
4.2.1. <i>Historique</i>	234
4.2.2. <i>Cadre normatif</i>	235
4.2.3. <i>Les quatre zones de séisme</i>	235
4.2.4. <i>Les six classes des sols de fondation</i>	236
4.2.5. <i>Les trois classes d'ouvrage</i>	236
4.3. Les effets du séisme sur les structures	236
4.4. Résistance des maçonneries en cas de séisme	238
4.4.1. <i>Mécanismes de rupture: balancement, glissement des joints et cisaillement</i>	239
4.4.2. <i>Elancement</i>	240
4.4.3. <i>Les refends de stabilisation</i>	241
4.4.4. <i>La recherche à l'Epfl</i>	242
4.5. Projets du Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction (IMAC) de l'Epfl	242
4.5.1. <i>Description des projets réalisés</i>	243
4.5.2. <i>Résultats des projets</i>	247
4.5.3. <i>Synthèse des résultats</i>	250
4.6. Principes de conception pour la Suisse	251
4.6.1. <i>Conception de la structure</i>	251
4.6.2. <i>Maçonneries en pierre naturelle</i>	252
4.6.3. <i>Planchers</i>	252
4.6.4. <i>Fondations</i>	253
4.6.5. <i>Appareillage, liants et liaisons mécaniques des parpaings formant la maçonnerie</i>	255
5. CONFORT ET CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE	257
5.1. La législation suisse en matière d'énergie	257
5.1.1. <i>Points traités par cette recherche</i>	258
5.2. Le réchauffement climatique. Des contraintes pour demain	258
5.2.1. <i>Conclusions</i>	260
5.3. Quelques définitions et principes physiques	261
5.3.1. <i>Inertie thermique et comportement thermique dynamique</i>	261

5.3.2. <i>Température et rayonnement des surfaces</i>	262
5.3.3. <i>Le matériau pierre naturelle</i>	262
5.4. Pour un état de la connaissance sur les effets de l'inertie thermique sur la consommation d'énergie de chauffage et climatisation, et le confort intérieur des bâtiments massifs	263
5.4.1. <i>Le confort thermique intérieur et les mesures constructives</i>	263
5.4.2. <i>Influence de la masse dans le bilan énergétique</i>	265
5.4.3. <i>Les études italiennes sur la construction massive en brique de terre cuite</i>	267
5.4.4. <i>Les défaillances des constructions vitrées sans masse</i>	269
5.4.5. <i>Différences entre la réalité et les valeurs calculées</i>	270
5.5. Confort hygrothermique	272
5.6. Développements futurs	272
5.7. Quelques considérations critiques sur la notion de confort et la consommation énergétique	273
5.7.1. <i>Le confort comme construction sociale</i>	273
5.7.2. <i>Le confort comme forme de standardisation</i>	273
5.7.3. <i>La construction scientifique de la normalité</i>	273
5.7.4. <i>L'adaptation au climat</i>	275
5.7.5. <i>L'approche actuelle</i>	276
5.7.6. <i>Des nouvelles stratégies pour le confort</i>	276
5.8. Le cas de la pierre naturelle	277
5.8.1. <i>Calculs thermiques appliqués à des immeubles de logement en pierre naturelle massive</i>	277
5.8.2. <i>Solutions d'application et leur influence sur le confort thermique</i>	281
6. DURABILITÉ ET DURÉE DE VIE DES MAÇONNERIES EN PIERRE NATURELLE	286
6.1. Francesco Venezia: "architettura di spolio" (architectures de dépouille)	286
6.1.1. <i>Hortus inclusus: projets pour les espaces publics</i>	288
6.1.2. <i>Le musée de Gibellina (1981-1987)</i>	289
6.2. Réutilisation et recyclage	290
6.2.1. <i>Ressources renouvelables et non-renouvelables</i>	290
6.2.2. <i>Réutilisation, recyclage et downcycling</i>	291
6.2.3. <i>Consommation d'énergie des matériaux de construction</i>	292
6.2.4. <i>Pollution</i>	293
6.2.5. <i>Production locale</i>	293
6.3. Le cas de la pierre naturelle	293
6.4. L'Inventaire de Cycle de Vie pour la pierre naturelle	295
6.4.1. <i>Etat actuel</i>	295
6.4.2. <i>Limites du calcul de l'Inventaire de Cycle de Vie pour les éléments en pierre massive</i>	296
6.4.3. <i>Confrontation entre pierre naturelle en forme de plaques minces et éléments massifs</i>	297
6.5. Projeter la durabilité d'une construction en pierre naturelle	299

6.5.1. Réutilisation	299
6.5.2. La forme durable	301
6.5.3. Solutions constructives garantissant la réutilisation et une meilleure durabilité	301
7. FORMES CONTEMPORAINES D'UTILISATION DE LA PIERRE STRUCTURELLE MASSIVE	303
7.1. Structures porteuses pour bâtiments	303
7.1.1. Structure périphérique avec murs de refend intérieurs	303
7.1.2. Noyau de stabilisation	304
7.2. Enveloppes autoporteuses	304
7.2.1. De la façade massive aux enveloppes multicouches. La solution autoporteuse	304
7.2.2. Le caractère des façades en pierre massive	306
7.2.3. Les différentes formes de traitement de la surface	307
7.2.4. L'intégration au lieu	308
7.2.5. Durabilité des façades massives	308
7.2.6. Stabilité des façades autoporteuses en pierre massive	309
7.3. Murs de soutènement et pierre naturelle massive	310
7.3.1. Les murs de soutènement dans la ville de Lausanne	311
7.3.2. Formes d'application de la pierre naturelle massive pour les murs de soutènement	312
7.3.3. Murs de soutènement en ville	316
7.3.4. Murs dans le "paysage"	317
8. BIBLIOGRAPHIE	320
8.1. Bibliographie. Etude de cas: l'industrie de la pierre naturelle en France après la Seconde Guerre mondiale	320
8.2. Bibliographie. La pierre naturelle et la construction courante	321
8.3. Bibliographie. Maçonneries en pierre naturelle et séismes	322
8.4. Bibliographie. Confort et consommation énergétique	323
8.5. Bibliographie. Durabilité et durée de vie des maçonneries en pierre naturelle	326
8.6. Bibliographie. Formes contemporaines d'utilisation de la pierre structurelle massive	327
8.7. Normes	328
8.8. Lois et règlements	328
CONCLUSION	329
VERS UN NOUVEL ÂGE DE LA PIERRE. POUR UNE NOUVELLE CONSTRUCTION EN PIERRE NATURELLE MASSIVE EN SUISSE	329
E1 Le cadastre du sous-sol et de ses ressources	330
E2 La législation en matière de carrières	330
E3 La "carrière urbaine"	331
E4 La réouverture des carrières de pierre naturelle de taille	331

E5a et b Une base de données pour les pierres naturelles de construction	332
E6 L'enseignement de la construction en pierre naturelle	332
E7 La mesure du comportement des bâtiments en pierre naturelle	333
E8 L'application des mesures de réduction de la consommation énergétique des bâtiments	333
E9 La réutilisation de la pierre naturelle de taille	333
E10 L'information et la divulgation	334

«Il ne s'agit pas d'imaginer des formes pour chercher ensuite le matériau et la technique pour les assembler, mais de trouver dans les possibilités techniques et dans celles du matériau la forme la meilleure et la plus appropriée et donc aussi la plus belle.»

Paul Schmitthenner, *Von der Möglichkeiten einer Stilbildung*, 1949¹

«Nous n'attendons rien du tout des matériaux en eux-mêmes, mais uniquement de leur utilisation appropriée. Les matériaux nouveaux non plus ne nous garantissent aucune supériorité. Toute matière ne vaut que par ce que nous en faisons.»

Ludwig Mies van der Rohe, *Discours de réception à l'Armour Institute of Technology de Chicago (AIT)*, 1938²

1. INTRODUCTION

1.1. La recherche "Construction en pierre massive en Suisse"

La présente thèse de doctorat est le fruit d'une recherche, commencée en 2007, sur la possibilité de réintroduire la construction en pierre naturelle massive en Suisse. Elle a été réalisée sous la direction du Prof. Luca Ortel, au sein du Laboratoire de Construction et Conservation de l'Institut d'Architecture de la Faculté de l'Environnement Architectural, Naturel et Construit de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, grâce au soutien du Fond National Suisse de la Recherche Scientifique (projet FN-100012-117650).

Cette recherche relève du domaine de l'architecture, et, plus particulièrement de la science des matériaux et de la construction. Il est clair que, dans son développement, d'autres thématiques ont été abordées, mais nous avons toujours essayé de rassembler autant les méthodes appliquées que les connaissances acquises dans ce domaine. À l'intérieur de la science des matériaux et de la construction, cette recherche se focalise sur la pierre naturelle de taille. Les granulats, les graviers et les autres matériaux pierreux employés dans l'industrie du bâtiment ne sont pas traités. De plus, c'est un mode particulier d'utilisation de la pierre naturelle de taille qui a été étudié: la construction massive. Par ceci, nous entendons toute forme de pierre naturelle de taille qui, par ses dimensions, et surtout par son épaisseur, est autoporteuse et peut donc être considérée comme une structure en elle-même. En ce qui concerne l'étendue temporelle touchée par la recherche, elle se limite à la période contemporaine, voir à celle de demain. En effet, notre recherche ne vise pas un historique des modes et des techniques constructives appliquées à la pierre naturelle sous forme massive, mais plutôt tente à formuler, de façon claire, des solutions possibles pour l'application de ce matériau dans la construction courante. L'étendue géographique se limite à la Suisse: d'une part, parce que la recherche y a été réalisée et, d'autre part, parce que la diversité géologique de son territoire permet de traiter un riche échantillon de types de pierres naturelles.

1. «Nicht Formen erfinden, und dann den Stoff und die Technik suchen, um die Formen zu fügen, sondern aus den technischen und stofflichen Möglichkeiten die beste und die zweckvollste und so auch die schönste Form finden.» [Schmitthenner, E., éd. 1984:9].

2. Neumeyer, F. 1996:313.

Une recherche, donc, qui se focalise sur une problématique très précise, dans une période et un espace limités. Au-delà du fait qu'une recherche doctorale, même sur le thème le plus restreint, se heurte toujours à l'ampleur des problématiques que ce même sujet est capable de faire surgir, cette focalisation comporte plusieurs avantages. Premièrement, elle permet de limiter le nombre des hypothèses à valider ou infirmer et, parallèlement, d'appliquer une méthode claire. Deuxièmement, ceci limite la quantité de problématiques et donne l'illusion au chercheur d'être en mesure d'y répondre de manière exhaustive ou, du moins, suffisamment précise. Troisièmement, ces problématiques claires facilitent le recours à des compétences extérieures pour leur solution. En effet, et surtout dans le cas d'une recherche dans le domaine des matériaux et de la construction, le fait de s'appuyer sur les connaissances d'autrui est une nécessité. Une vraie interdisciplinarité, basée sur le débat et la discussion autour d'un projet commun est non seulement une garantie de pouvoir mener à bien une recherche de ce type, mais aussi une occasion de réel enrichissement et d'acquisition de nouvelles connaissances. En dépit de cette "étroitesse" du sujet, la recherche présente quelques points de valeur générale. Le premier est constitué par l'état de l'industrie de l'exploitation de la pierre naturelle en Suisse dans la première décennie du XXI^e siècle. Ceci s'ajoute à différents documents antérieurs traitant du même sujet, sur lesquels cette recherche s'appuie, et constitue le témoignage que cette industrie existe encore, également d'un point de vue économique. C'est même l'une des seules formes d'exploitation des ressources du sous-sol encore existante en Suisse. Le deuxième apport est l'illustration d'une façon de traiter des problèmes constructifs et du choix des matériaux basés, d'une part, sur des raisons objectives et, dans la mesure du possible, quantifiables, et, d'autre part, sur la compréhension du cycle productif dans son entier. Une manière de procéder qui diffère sensiblement de celle adoptée actuellement parce que basée sur le choix d'éléments finis, de catalogue, et ceci aussi pour la pierre naturelle. La démarche qui s'interroge sur les ressources et les différentes formes de transformations auxquelles elles sont soumises, nous semble être, à l'heure actuelle, la seule qui puisse apporter un vrai changement dans la façon de travailler des constructeurs, tout en leur permettant de prendre conscience de la réelle valeur de ces ressources. Elle devrait donc permettre de mettre en oeuvre des solutions plus durables autant pour l'environnement que pour l'être humain. Cette façon de traiter les problématiques liées à l'architecture et à sa construction n'est pas nouvelle: déjà Leon Battista Alberti décrivait le travail de l'architecte comme une activité partagée entre réflexion intellectuelle, pour la conception des constructions, et connaissances pratiques directes, pour trouver et choisir les matériaux constitutifs de l'édifice³. En ce qui concerne la pierre naturelle, l'approche des architectes français Fernand Pouillon et, plus près de nous, Gilles Perraudin, constituent certainement les bases sur lesquelles cette recherche se fonde. De plus, nous avons déjà appliqué et adapté l'approche de Gilles Perraudin pendant notre travail de diplôme en architecture, en 2006, et ce travail a aussi fourni une première base pour le développement de la présente recherche⁴. Les études faites sur la construction en terre à l'Institut CraTerre de Grenoble et les manuels qui y sont liés, sont aussi autant de preuves que cette méthode peut être appliquée à la recherche en architecture⁵.

3. «Du fait, j'ai remarqué qu'un édifice est une sorte de corps qui, comme les autres corps, consiste en linéaments et en matière, les premiers produits par l'intelligence, la seconde engendrée par la nature: l'esprit et la réflexion s'appliquent aux premiers, la sélection et la préparation à la seconde.» [Alberti, L.B. 2004:51]

4. Stefano Zerbi "La Via della Pietra", Projet de Master en Architecture de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Année Académique 2005-2006 (<http://infoscience.epfl.ch/record/128040?ln=fr>, consulté le 24.08.2010).

5. La principale publication à laquelle on fait référence est: Houben, H., Guillaud, H. 2006: *Traité de construction en*

La question centrale qui nous a occupé a été la suivante: pourquoi et comment utiliser aujourd'hui la pierre naturelle de taille pour réaliser des structures porteuses dans la construction. Dans les paragraphes qui suivent, nous essayerons de démontrer qu'il y a des raisons objectives pour se poser cette question aujourd'hui en Suisse. Ensuite, les méthodes utilisées ainsi que la structure choisie pour ce texte seront expliquées.

2. NÉCESSITÉ D'UNE RECHERCHE SUR LA CONSTRUCTION EN PIERRE NATURELLE

2.1. Le Développement Durable et les matériaux de construction

La prise en compte des critères du Développement Durable⁶ dans la construction s'est fortement développée pendant les deux dernières décennies. Si, dans une première phase, cette démarche s'est traduite surtout par la construction de nouveaux bâtiments répondant au seul critère de réduction des consommations énergétiques, dernièrement, des critères plus globaux ont été introduits. Un cas exemplaire à ce sujet est le développement, en Suisse, de la certification des bâtiments selon le standard Minergie[®]. Au début des années 2000, les bâtiments certifiés répondaient surtout à des exigences accrues de diminution de la consommation énergétique, qui ont été renforcées par l'introduction du standard Minergie-P[®]. Ceci se traduisait, dans la construction, par le recours à des couches isolantes de forte épaisseur et par le recours à la récupération de l'énergie de l'air intérieur à travers un système à double-flux avec échangeur de chaleur. Les derniers standards Minergie-Eco[®] et Minergie-Eco-P[®] sont complémentaires à ceux existants, mais concernent surtout une amélioration au niveau des exigences liées à la qualité de vie des occupants (lumière, bruit et qualité de l'air intérieur) et à l'écologie de la construction (matières premières, fabrication et possibilité de déconstruction).

Comme illustré par le cas du label Minergie[®], l'intégration des critères du Développement Durable dans le secteur du bâtiment s'est réalisée, jusqu'à il y a très peu de temps, simplement à travers des solutions techniques. Les architectes ont donc subi, en partie, ces nouvelles contraintes sans pouvoir, ou vouloir, y répondre par le biais de la discipline architecturale, qui, depuis des millénaires, avait permis, avec peu de ressources, de faire face aux différentes conditions climatiques présentes sur la planète. Ce sont les architectures dites vernaculaires qui constituent, aujourd'hui encore, une source importante à laquelle puiser et qui se basent sur des ressources locales et facilement disponibles. Sans que cela soit une posture nostalgique ou passéiste, il faut investir toutes les ressources intellectuelles disponibles afin de développer des solutions simples et efficaces, également du point de vue environnemental, pour un usage équilibré des matières premières disponibles.

La présente recherche propose une approche aux problèmes de la pierre naturelle et du Développement Durable qui traite l'entier du cycle de vie du matériau: c'est-à-dire une prise de conscience de l'importance que chaque phase d'exploitation, transformation, mise en

terre, Marseille, Editions Parenthèses, 355 p, dont la première édition date de 1989.

6. La définition de Développement Durable qui est utilisée en Suisse est celle contenue dans le rapport de 1987 de la *Commission mondiale sur l'environnement et le développement* (Commission Brundtland): «le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leurs propres besoins» (<http://www.are.admin.ch/themen/nachhaltig/00260/index.html?lang=fr>, consulté le 01.09.2010).

7. Toutes les principales informations au sujet du label Minergie[®] sont disponibles sur le site internet: <http://www.minergie.ch>, consulté le 01.09.2010.

oeuvre et déconstruction, a sur la durabilité du matériau. En effet, la pierre naturelle de taille est un matériau durable, mais selon la manière de le transformer et de le mettre en oeuvre, ses qualités environnementales peuvent être amoindries, voir annulées. Les plus grandes qualités environnementales de la pierre naturelle de taille sont sûrement son réemploi et l'investissement réduit en énergie. Il est clair que l'utilisation de ce matériau sous forme de plaques de plus en plus minces réduit fortement ces deux avantages. Nous croyons, par contre, que l'employ sous forme massive est cohérent avec ces caractéristiques.

2.2. La pierre naturelle suisse: un matériau local et largement disponible

Ceci conduit à une évidence, mais il vaut la peine de le rappeler: la Suisse est riche en roches de différents types, dont la qualité est garantie par leur utilisation dans le passé. Cette ressource est largement disponible dans toutes les régions du pays. L'exploitation de gisements locaux a été effectuée, dans le passé, de manière intensive sur des périodes de temps réduites, ce qui n'a donc pas engendré leur épuisement, au moins à l'échelle régionale. De plus, elle a été peu exploitée pendant les dernières 50 à 100 années, ce qui permet d'envisager une augmentation de son utilisation dans le futur.

2.3. La pierre naturelle et la recherche académique en Suisse

2.3.1. Le matériau pierre naturelle

L'étude scientifique des ressources minérales de la Suisse a été développée à partir de 1899 par la *Commission Géotechnique Suisse (SGTK)* qui est rattachée à l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich*. Les connaissances scientifiques fondamentales sur les roches suisses et sur leur exploitation sont donc contenues dans les ouvrages publiés par la SGTK. Le premier ouvrage fondamental est "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz" [Niggli, P. 1915], publié en 1915, après dix ans de préparation. Cet ouvrage constitue encore la référence sur les pierres naturelles suisses, leur exploitation, leurs caractéristiques et leur emploi. Le travail de recherche mené, pendant les années 1940 et 1950, par Francis de Quervain, président de la SGTK de 1949 à 1974, en qualité de Professeur de pétrographie technique à l'ETHZ, mais aussi comme passionné des pierres naturelles et de monuments historiques, permit, d'une part, la publication de différents ouvrages et, d'autre part, la constitution d'un fond d'archives au sein de la SGTK. L'ouvrage principal de Francis de Quervain, dans le cadre de notre recherche, est "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz", publié en 1969 [de Quervain, F. 1969]. Des indications importantes sur l'exploitation des pierres naturelles en Suisse sont contenues dans l'ouvrage "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz", publié par la SGTK en 1997, et qui a été conçu afin de donner un aperçu général de l'exploitation des ressources minérales en Suisse à la fin du XXe siècle. C'est, à l'heure actuelle, la plus récente publication sur le matériau pierre naturelle qui traite de la Suisse entière.

2.3.2. La pierre naturelle comme matériau de construction

Les grandes recherches à échelle nationale susmentionnées traitent de la pierre naturelle en tant que ressource et de son utilisation comme matériau de construction dans le passé. Il s'agit toujours d'un regard de spécialiste vis-à-vis du matériau et d'historien quant à son utilisation. Les recherches académiques réalisées par des constructeurs, ingénieurs ou architectes, sont rares en Suisse.

Seuls trois ouvrages, publiés dans les années 1930-1940, constituent des livres techniques dédiés à la construction en pierre naturelle mettant en relation la ressource disponible, son exploitation et son emploi constructif. Le premier, en date, a été publié par l'Association des Carriers suisses ("Verband schweizerischer Steinbruchbetriebe") dans les années 1930 pour illustrer les différentes pierres naturelles suisses et leurs usages [Verband Schweizerischer Steinbruchbetriebe, éd. 1937]. Pendant les années de la Seconde Guerre Mondiale, et suite aux restrictions énergétiques et à la pénurie de matériaux tel l'acier, la pierre naturelle retrouva un certain intérêt auprès des constructeurs grâce à son origine locale et à une exploitation peu "énergivore". En Suisse, une série de livres fut publiée dans une collection au nom évocateur "Bauen in Kriegszeiten", dont le numéro 6 était dédié à la pierre naturelle et à la pierre artificielle. C'était un vrai manuel de construction dans lequel l'on abordait tous les problèmes liés à la construction en maçonnerie, en tenant toujours présentes les nécessités liées aux rationnements de la période de guerre [Haller, P. 1943]. En 1945, juste à la fin de la guerre, un ouvrage collectif fut publié sur le thème de la pierre naturelle et de son utilisation, "Stein und Steinwerk" [Reinhard, E. 1945], qui contient, entre autres, des contributions du déjà cité Francis de Quervain et de Friedrich Hess, architecte et professeur à l'ETHZ. Dans l'introduction de ce livre, nous trouvons une prise de position du conseiller national Ernst Reinhard qui, suite à la "redécouverte" de ce matériau de construction pendant les années de guerre à cause de la pénurie de ciment, pose la question de la possibilité de lui redonner une place dans l'industrie de la construction⁸. Cette question reste, à notre avis, encore d'actualité. La présente recherche essaie d'y donner une réponse réaliste et plausible.

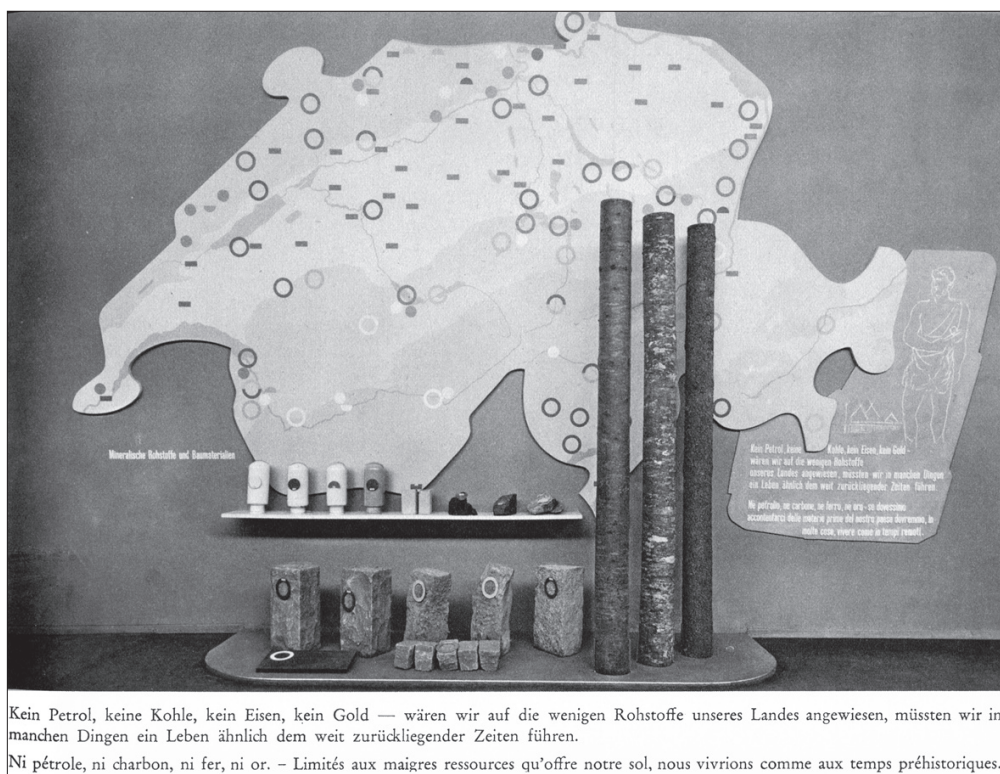


Fig. 1. Les ressources du sous-sol suisse à l'Exposition Nationale de Zürich de 1939 [Hofmann, H., éd. 1939]

8. «Vorerst handelt es sich also um den Naturstein als Ersatzmaterial. Aber soll es dabei bleiben? Hat nicht der Naturstein seine ganz organische Rolle in der Bauwirtschaft weiterzuspielen, auch dann, wenn die Zementknappheit überwunden sein sollte?» [Reinhard, E. 1945:13].

2.3.3. La recherche sur la pierre aujourd'hui

Parallèlement, l'enseignement de la construction en pierre naturelle dans les écoles où les constructeurs se forment est en voie de disparition. Dans ce contexte aussi, les aspects de conservation sont prioritaires et l'existence même de ce secteur économique est négligée. Il est clair que la recherche, faite en général au sein de ces mêmes institutions formatrices, est en déclin. Il faut, par contre, noter que l'enseignement et la recherche sur la pierre naturelle est en plein développement dans d'autres pays, comme, par exemple, la France, autant au niveau universitaire que dans les centres de formation professionnelle, ou l'Italie, grâce aussi au partenariat entre industries et universités⁹. Ce n'est probablement pas un hasard si dans ces mêmes pays, auxquels on ajoutera l'Espagne, le Portugal et l'Allemagne, les architectes utilisent de plus en plus ce matériau, aussi sous des formes massives. C'est pour ces raisons que, faute d'exemples repérés sur le territoire national, nous ferons souvent référence dans la présente recherche à des constructions réalisées dans ces pays européens.

Nous voulons signaler tout de même l'existence, au sein de l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, de quelques rares exceptions. D'une part, deux thèses de doctorat ont été récemment présentées, l'une, par Alix Grandjean, ingénieure, sur la capacité portante des ponts en arc en maçonnerie de pierre naturelle [Grandjean, A. 2010], et l'autre sur la vulnérabilité sismique du patrimoine bâti suisse, par Mylène Devaux, ingénieure [Devaux, M. 2008]. D'autre part, des enseignants passionnés proposent quelques cours dans lesquels ce matériau est traité. C'est notamment le cas des cours de dessin et taille de la pierre naturelle proposés par Marie-Pierre Zufferey aux étudiants Bachelor de la Section d'architecture, et par une Unité d'Enseignement pour les étudiants Bachelor en architecture, génie civil et sciences et ingénierie de l'environnement, sur le thème des murs de soutènement de la ville de Lausanne, également par Marie-Pierre Zufferey.

2.4. La pierre naturelle et la construction courante

«Pour moi, construire une aérogare en pierre serait une imbécillité, pour ne pas dire une folie. Mais s'imposer des structures dynamiques pour installer des trois pièces-cuisine dans des immeubles de trois à dix étages, n'est pas moins aberrant.» [Pouillon, F. 1968:174]

Cette affirmation forte, écrite par l'architecte français Fernand Pouillon à la suite de ses expériences dans la reconstruction dans la France de l'immédiat après-guerre, est liée à une période particulière de la construction en pierre naturelle qui est traitée dans un sous-chapitre spécifique de cette recherche (voir sous-chapitre III.1). Néanmoins, il est possible d'affirmer qu'aujourd'hui, c'est le contraire de cette affirmation qui est valable. En effet, les dernières réalisations en pierre naturelle structurelle connues sont plutôt des structures exceptionnelles. Il suffit de citer le Pavillon du Futur à l'Exposition universelle de 1992 à Séville, avec des structures en arc en pierre précontrainte développées par l'ingénieur Peter Rice; la façade Ouest de la Cathédrale de Lille de 1999, également par Peter Rice et

9. En France, cet enseignement est donné à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, à l'Ecole d'Architecture Paris Malaquais, ou encore à l'Institut Supérieur de Formation aux Métiers de la Pierre de Rodez. En Italie, différentes universités proposent des enseignements liés à la pierre naturelle, entre autres: le Politecnico di Milano, la Faculté d'Architecture de Ferrare et celle de Pescara; la Faculté d'Ingénierie de Trente, celle de Padoue et Rome, et la Faculté d'Architecture du Politecnico de Bari. Ces différents instituts collaborent avec Marmomacc, qui organise la foire annuelle internationale à Vérone, et d'autres entreprises du secteur de la pierre naturelle.

Pierre-Louis Carlier; la nouvelle Aula Liturgica Padre Pio à San Giovanni Rotondo, en Italie, avec sa structure en arcs en pierre précontrainte, avec des portées qui atteignent les 45 m, réalisé par Renzo Piano Building Workshop entre 1991 et 2004, ou le bâtiment de bureau à Finsbury Square à Londres, de l'architecte Eric Perry, construit en 2002. En Suisse, la construction en pierre naturelle la plus connue, c'est le bâtiment des thermes de Vals, construits par l'architecte Peter Zumthor en 1995, avec, cette fois, une structure en maçonnerie simple. Aujourd'hui ce sont donc les "aérogares" qui occupent le devant de la scène contemporaine de l'architecture en pierre structurale. Et si l'on ajoute aussi les exemples de bâtiments avec des revêtements en pierre, cette tendance ne s'inverse pas.

Notre recherche se donne comme objectif de renouer avec la tradition de la pensée de Pouillon et se focalise donc sur l'étude de solutions simples pour l'application de ce matériau aux constructions courantes, en particulier les immeubles de logement de taille moyenne. L'expérience de la reconstruction en France, déjà citée, ainsi que les réalisations de Gilles Perraudin ou, encore, le patrimoine bâti en pierre naturelle massive, démontrent l'efficacité et la durabilité de ce type d'utilisation de la pierre naturelle de taille.

3. MÉTHODE

3.1. De la ressource à la mise en oeuvre

La connaissance, de la part des constructeurs, ingénieurs et architectes, de l'entier des phases de production d'un matériau se perd de plus en plus. Le choix est souvent effectué sur la base du seul produit fini, sans aucune possibilité d'intervenir sur les différents processus qui se trouvent en amont. La pierre naturelle, mais à notre avis aussi les autres matériaux, nécessitent une connaissance globale de la production, d'une part, parce que le constructeur peut, et doit, intervenir dans les différentes phases de façonnage et, d'autre part, parce que cela semble être une manière efficace de réduire les coûts de la matière première tout en augmentant son taux d'utilisation (voir sous-chapitre II.5.8). La méthode d'étude appliquée a donc été mise en place selon une démarche logique qui, en partant de la connaissance scientifique de la ressource, permet l'élaboration de solutions constructives en considérant les différentes phases d'extraction et façonnage dans la carrière contemporaine de pierre naturelle. Une démarche qui suit pratiquement la procédure qui devrait s'appliquer lors de la conception d'un projet de construction en pierre naturelle.

Pour soutenir cette hypothèse de travail, nous pouvons citer le cas de l'industrialisation du secteur de la pierre naturelle en France précédemment évoqué; l'oeuvre et la pensée de l'architecte français Gilles Perraudin (1949), qui est à la tête d'un mouvement de renaissance de l'utilisation massive de ce matériau, et, l'adaptation de la démarche de Gilles Perraudin au cas des gneiss du Nord du canton du Tessin, en Suisse, réalisée lors de notre projet de Master en Architecture, pendant l'année académique 2005-2006. L'oeuvre de Gilles Perraudin sera traitée dans le sous-chapitre qui suit.

Cette manière de procéder ne s'éloigne pas trop de celle utilisée, pendant des millénaires, par nos ancêtres qui, obligés à utiliser les ressources disponibles localement, le faisaient de manière à réduire au minimum les efforts liés à leur extraction et façonnage. Ceci, dans le cas de la pierre naturelle, passait par l'exploitation de ses "faiblesses" naturelles, donc par une connaissance empirique de ses

caractéristiques géologiques et mécaniques. Aujourd'hui, ce type d'interaction doit se fonder sur des critères objectifs et quantifiables, donc scientifiques, mais elle nécessite aussi une connaissance directe de certains aspects, comme l'exploitation et le façonnage des pierres naturelles, qui restent encore liés à la pratique artisanale.

Il est possible de reconnaître une certaine affinité avec la discipline de l'architecture qui aujourd'hui fait recours, d'une part, à des solutions techniques de plus en plus sophistiquées et, d'autre part, à une tradition millénaire, basée sur la pratique et la connaissance empirique. C'est aussi pour cela que cette recherche relève, à notre avis, du domaine de l'architecture.

3.1.1. L'enseignement et l'oeuvre de Gilles Perraudin

L'architecte français Gilles Perraudin s'occupe de construction massive en pierre naturelle depuis la fin des années 1990, de différentes manières. Premièrement, il construit avec ce matériau, ensuite il enseigne son utilisation aux futurs architectes, autant par le projet que par une approche pratique, et, pour terminer, il se charge de faire connaître la pierre et son usage par une oeuvre de divulgation.

L'oeuvre construite en pierre naturelle massive de Gilles Perraudin a commencé par un chai viticole que l'architecte a bâti pour lui-même, et en partie par lui-même, à Vauvert, dans la région du Gard, en France, en 1998. Ce fut une vraie expérimentation sur la manière de mettre en oeuvre des blocs présciés, en calcaire coquillier du Gard, qui ne pouvaient pas être utilisés pour la production de plaques à cause d'imperfections dans leur texture, dues surtout à la présence de poches d'argile. Ces éléments de construction préfabriqués, aux dimensions modulaires de 220x110x55 cm, donne la règle pour l'ensemble de la composition du bâtiment. Après cette première démonstration des possibilités offertes par l'usage de ces éléments prétaillés, une deuxième occasion d'application de ce procédé économique et rapide se présenta avec la construction d'un centre de formation pour les apprentis à Nîmes-Marguerittes, entre 1997-1999. Ce fut la possibilité d'utiliser à nouveau la pierre naturelle structurelle pour un équipement public. À ce projet, suivirent celui d'un deuxième chai viticole à Nizas, dans la région Languedoc-Roussillon, en France, pour un producteur de la région en 2001, et d'un troisième chai viticole pour la communauté religieuse de Solan, construit entre 2003-2007. Ces deux exemples furent autant d'occasions de développer des variations autour du thème de l'appareillage de ces gros blocs en pierre naturelle ainsi que sur leur mise en oeuvre. En effet, si le premier chai fut réalisé par simple assemblage à sec des blocs selon un appareillage basé surtout sur la figure du trilithe, dans celui de Nizas, c'était plutôt le mur continu qui était mis en oeuvre par des blocs de grande taille. Dans le cas du chai de Solan, le mur continu est décomposé en une série de piliers, très rapprochés, qui laissent filtrer la lumière: un mur "albertien"¹⁰. Depuis 2005, divers projets pour des immeubles de logements ont été réalisés, mais leur construction a commencé uniquement dans un cas, celui de vingt logements sociaux à Cornebarrieu, dans la région Midi-Pyrénées, en France. Ce sera, enfin, la démonstration du bien-fondé de l'affirmation de Fernarnd Pouillon citée au début de ce sous-chapitre. Entretemps, entre 2006 et 2009, une maison individuelle, avec une galerie d'art, a été construite à Lyon, en France, ce qui constitue la première réalisation en pierre naturelle massive de l'agence en milieu urbain.

10. Selon Leon Battista Alberti, l'origine de la colonne est l'évidement régulier d'un mur: «... puisque aussi bien une rangée de colonnes n'est rien d'autre qu'un mur percé et ouvert en de nombreux endroits.» [Alberti, L.B. 2004:82]

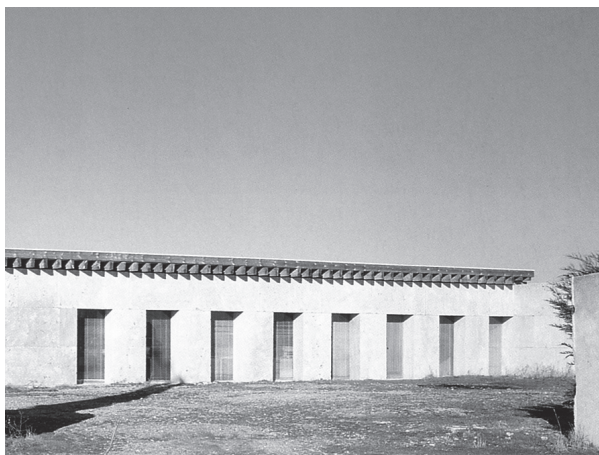


Fig. 2-3-4. Gilles Perraudin: chai viticole à Vauvert 1998 [Pavan, V., éd. 2001]; chai viticole à Nizas, 2001 [Pisani, M., éd. 2002] et chai viticole de Solan, 2003-2007 [Bucci, F. 2009].

Ses projets en pierre naturelle massive ont été récompensés en 2001 par le Prix international d'architecture de pierre, décerné dans le cadre de Marmomacc à Verone, en Italie. Son activité d'architecte a également été primée par la Médaille d'Or du Prix Tessenow en 2004.

L'enseignement de Gilles Perraudin autour de l'utilisation de la pierre naturelle massive a commencé en 1997 à l'*Ecole d'Architecture Languedoc-Roussillon*¹¹, où il est actuellement professeur titulaire. Depuis cette époque, il enseigne aussi aux *Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau*¹², où il organise des séminaires de construction en pierre naturelle pour les étudiants. L'enseignement de Gilles Perraudin sur la construction en pierre naturelle massive comporte, au-delà du projet, la visite de carrières et l'expérimentation directe, par le biais de maquettes à échelle réduite et de séminaires de construction. Cet enseignement articulé permet aux étudiants architectes de se familiariser avec le matériau pierre naturelle, d'en comprendre les propriétés et les possibilités d'application. Le fait de recourir, dans ce cas aussi, à des blocs de format normalisé, contraint les étudiants à se concentrer sur les possibilités de variation dans l'appareillage, et de voir leur influence sur la qualité architecturale. Gilles Perraudin est souvent invité comme professeur dans différentes universités dans le monde, et il a enseigné aussi à l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* pendant le semestre d'hiver 2007.

L'activité de divulgateur des vertus de la pierre naturelle massive comme "matériau du futur" a commencé, pour Gilles Perraudin, en même temps que son engagement dans la construction et l'enseignement. En effet, il s'aperçut vite du manque de connaissances et d'informations autour de

11. Pour des informations sur cette Ecole d'Architecture: <http://www.montpellier.archi.fr>, consulté le 02.09.2010.

12. Pour des informations sur cet établissement d'expérimentation sur les matériaux de construction: <http://www.lesgrandsateliers.fr/>, consulté le 02.09.2010.

ce matériau autant au niveau des constructeurs, ingénieurs et architectes, que des maîtres d'ouvrage, publics ou privés. Pour promouvoir l'utilisation de ce matériau, il a organisé et participé à plusieurs colloques, et il a fondé l'Académie de la Pierre, dont il est le président.

3.2. Une approche interdisciplinaire

La méthode utilisée pour nos investigations a été basée sur des études directes, sur la vérifications d'hypothèses de travail par le biais d'essais expérimentaux, de simulations numériques, de sources historiques, entendues aussi comme le travail de ceux qui nous ont précédés, de discussions avec des spécialistes, et sur la structuration de connaissances déjà existantes, mais actuellement dispersées dans différentes sources et domaines.

Le recueil, et la successive structuration des connaissances déjà existantes, est un travail indispensable si l'on veut rendre ces connaissances disponibles à un public plus large. Ceci d'autant plus qu'une recherche sur la pierre naturelle fait appel à des connaissances dispersées dans des domaines souvent très éloignés.

Les principales études directes ont été celles liées à l'industrie de la pierre naturelle en Suisse sous la forme de visites des carrières et des ateliers de transformation. Les essais expérimentaux ont été faits sur la résistance des maçonneries en pierre naturelle de taille aux séismes, grâce à la collaboration des ingénieurs et futurs ingénieurs civils de l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Les simulations numériques ont été surtout faites dans le domaine de la physique du bâtiment par des spécialistes et par nous-même. Les études historiques et les discussions avec les différents spécialistes ont permis autant de valider ou infirmer des hypothèses que d'alimenter les questionnements.

4. DESSINER, COMMUNIQUER ET FATALEMENT CONNAÎTRE

«En faisant, pour être en mesure de restituer clairement, on est fatalement obligé à comprendre.»¹³

Le dessin est une partie essentielle et indissociable du travail de l'architecte et du constructeur. Il est un outil d'analyse et de compréhension de la réalité ainsi que le premier instrument de communication. Il fait partie intégrante de la présente recherche et de la méthode adoptée. Il est traité dans un sous-chapitre séparé de celui consacré à la méthodologie à cause, d'une part, de l'étendue du sujet et, d'autre part, par intérêt personnel.

Observer v. tr. - Xe; lat. observare.

II. (1535) 1. Considérer avec une attention soutenue, afin de connaître, d'étudier.

Regarder v. tr. - rewardant VIIIe; regarder 1080; de re- et garder "veiller, prendre garde à".

I. V. tr. dir. 1. Faire en sorte de voir, s'appliquer à voir (qqn, qqch.). 3. ABSOLT Observer.

Voir v. - XIIe veoir; vedeir 980; lat. videre.

I. V. intr. (1080 vedeir) Percevoir les images des objets par le sens de la vue.

II. V. tr. dir. (980). 1. Percevoir (qqch.) par les yeux.

13. Arduino Cantàfora "Metodo di lavoro" [Pedretti, B., ed. 2007:63] (en italien dans le texte, traduction de l'auteur: «Facendo, per essere in grado di restituire con chiarezza, si è fatalmente obbligati a capire»).

Dessiner v. tr. - 1664; *desseigner, dessigner* 1459; altér. de l'it. *disegnare*, d'apr. lat. *designare*.

1. Représenter ou suggérer par le dessin.

2. (1809 pron.) PAR ANAL. (sujet chose) Rendre apparents, faire ressortir les contours, le dessin de.

Dessin n. m. - XVe ; de *dessigner*, d'apr. l'it. *disegno*; var. *dessein* jusqu'au XVIIIe.

1. Représentation ou suggestion des objets sur une surface, à l'aide de moyens graphiques.

4. Représentation linéaire, exacte et précise, de la forme des objets, dans un but scientifique, industriel; technique de cette représentation.

(*Le Petit Robert. Dictionnaire de la langue française*)

Dans la pratique de l'architecture, le dessin est un instrument de travail ainsi qu'une forme privilégiée de communication et de compréhension, comme l'affirme aussi, entre autres, l'architecte portugais Alvaro Siza¹⁴. Dans cette double dimension, c'est-à-dire d'instrument de communication et de connaissance, se placent les dessins qui illustrent notre recherche "Construction en pierre massive en Suisse".

La nécessité de comprendre, qui est "fatalement" liée à l'acte de dessiner, est la raison principale du recours au dessin dans le cadre de cette recherche. En effet, si l'on accepte qu'il est possible de faire de la recherche en architecture, il nous semble inévitable que le dessin devienne un outil de recherche parce que la représentation graphique est la dernière étape d'une suite qui commence avec voir, puis regarder et enfin observer. La restitution graphique, par le biais du dessin, se fait donc en parallèle avec la compréhension de ce que l'on observe et avec l'inéluctable simplification et réduction du nombre d'informations que l'acte de dessiner comporte. Voir c'est donc choisir ce que l'on veut regarder; suit l'acte d'observer et ensuite de choisir ce que l'on veut communiquer et donc dessiner. C'est à cause de cela que les dessins ont, à notre avis, une valeur de recherche et aussi se prêtent mieux à illustrer un ouvrage qui veut fournir une aide aux constructeurs par rapport aux seules photographies, parce que le dessin est: «une techné qui précède toute réalisation pratique et définit une manière d'être du savoir: Savoir c'est avoir vu = apprendre, éprouver la présence du réel en tant que tel» [Cantàfora, A., Duboux, C. 2002:27].

Par la suite, nous essayerons de motiver les fondements qui nous ont amené à choisir d'illustrer ce travail de recherche.

4.1. Les dessins "géologiques"

4.1.1. John Ruskin (1819-1900) et Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (1814-1879)

Les deux figures de l'anglais John Ruskin et du français Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc hantent, depuis leurs débuts, nos travaux de recherche sur le thème de la pierre naturelle et de son utilisation en architecture. D'une part, les descriptions des différentes pierres utilisées dans les bâtiments de

14. «Le dessin est une forme de communication envers soi-même et les autres. Pour l'architecte, il est aussi, entre tant d'autres, un instrument de travail, une forme d'apprendre, comprendre, communiquer, transformer: une forme de projet», Alvaro Siza "L'importance de dessiner", 1987 [Angelillo, A., ed. 1999:17] (en italien dans le texte, traduction de l'auteur: «Il disegno è una forma di comunicazione con l'io e con gli altri. Per l'architetto, è anche, tra i tanti, uno strumento di lavoro, una forma di apprendere, comprendere, comunicare, trasformare: una forma di progetto»).

Venise, depuis les carrières jusqu'aux motifs décoratifs, contenues dans le livre de John Ruskin "The Stones of Venice" (1851-1858 et 1879) ont eu un effet déclencheur pour notre passion envers les roches. En effet, ce peintre et érudit anglais était aussi un géologue amateur et la connaissance scientifique des différentes roches lui permit de pouvoir écrire ce texte.

D'autre part, l'enseignement d'Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc à propos de la construction romane et gothique, de l'utilisation de la pierre naturelle comme matériau de construction ainsi que les différents dessins qui illustrent ses livres, nous renseignent sur la logique de ce type de construction et sur son caractère de "schéma" structurel pétrifié. Viollet-le-Duc partageait avec Ruskin une vraie passion pour la géologie, science à laquelle il s'engagea avec la même rigueur et intensité que pour l'étude de l'architecture et de sa construction.

Pendant ses nombreux voyages à travers les Alpes, qui avaient toujours comme destination l'Italie, et ses séjours dans différentes régions de la Suisse et de la Savoie, John Ruskin prenait des notes sur la morphologie et la nature géologique des différentes parties de cette chaîne de montagnes. En février 1865, il publia dans le "Geological Magazine" une note scientifique qui relatait ses observations de 1861 sur la structure et la formation du Mont Salève, près de Genève, en critiquant celle proposée par les géologues suisses de Saussure, Studer et Favre [Lemaître, H. 1965:70].

Les débuts des observations géologiques de Emmanuel Eugène Viollet-le-Duc sont de trois années postérieures à la publication de Ruskin. En effet, à partir de 1868, Viollet-le-Duc réalisa plusieurs voyages dans le Massif du Mont-Blanc pour relever sa morphologie. Ce travail s'acheva en 1876 avec la publication d'une carte et du livre "Le Massif du Mont-Blanc" [Frey, P., éd. 1988]. En plus de cela, Viollet-le-Duc affirma à plusieurs reprises l'importance du dessin comme outil de connaissance. Dans son livre "Histoire d'une maison" (1873), il énonça la différence entre voir et regarder: «Dessiner,



Fig. 5. John Ruskin "Le Mont Salève", dessin à la plume, 1861-63 [Hayman, J. 1990]

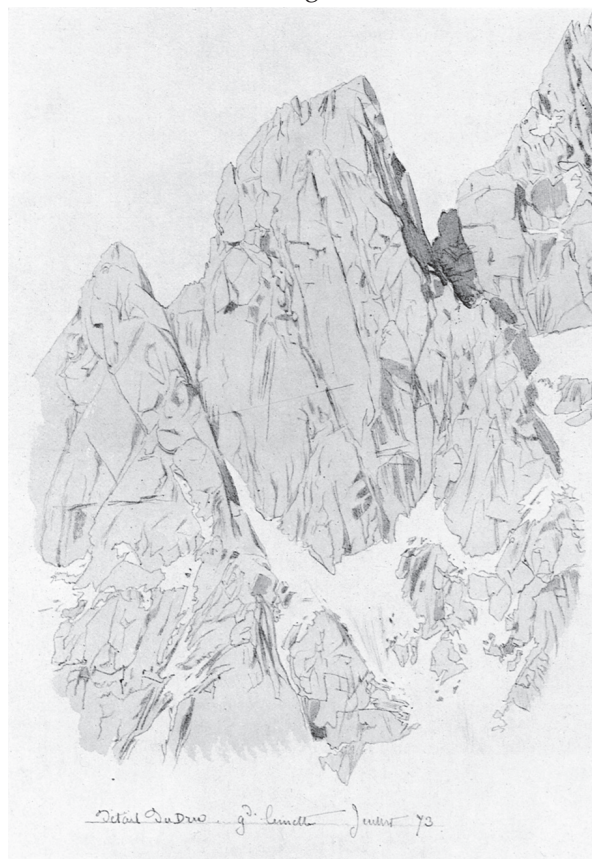


Fig. 6. Emmanuel Eugène Viollet-Le-Duc "Détail du Dru", crayon et aquarelle, 1873 [AA. VV. 1979]

c'est, non pas voir, mais regarder. Tous ceux qui ne sont pas aveugles voient; combien y-a-t-il de gens qui savent voir, ou qui réfléchissent en voyant?» [Viollet-le-Duc, E. 2008:158]. Et dans "Histoire d'un dessinateur" (1879), il conclua: «Le dessin [...] est le meilleur moyen de développer l'intelligence et de former le jugement, car on apprend ainsi à voir, et voir c'est savoir» [Viollet-le-Duc, E. 1978:302]. Les contributions de John Ruskin et d'Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc conservent, en partie, leur valeur scientifique, surtout en ce qui concerne les informations de géomorphologie, c'est-à-dire de la description et explication de la forme du relief terrestre, parce qu'ils étaient capables de "voir" et de mettre en évidence, par le biais du dessin, les caractéristiques principales de l'objet étudié.

4.1.2. Les précédents historiques. Les artistes de la Renaissance italienne

Comme l'affirme Piero Camporesi dans son ouvrage "Les belles contrées", qui traite de la naissance du paysage italien, même si la notion de "paysage" n'existait pas à cette époque, les artistes italiens de la Renaissance montrèrent toujours un grand intérêt envers les composantes naturelles du territoire, «pour la stratigraphie géologique, le visage et l'image minérale de la nature» [Camporesi, P. 1995: 27]. Ces artistes étaient pour la plupart des artistes polymorphes [*ibid.*] et leur activité de peintres ou d'architectes se mêlait à l'intérêt pour l'étude de cette nature qui, comme déjà Pline l'Ancien l'avait décrite, était une dispensatrice de biens, de ressources à exploiter. Dans les différentes études de rochers de Leonardo da Vinci ou dans "La vergine delle cave", peinte par Andrea Mantegna en 1489, la forme minutieuse des rochers est une conséquence de la connaissance et du dessin des affleurements rocheux faits, sur le vif, par le peintre. Dans le tableau de Mantegna, nous trouvons aussi des tailleurs de pierre au travail, ce qui témoigne de cette vision de la nature comme ressource exploitable.



Fig. 7. Andrea Mantegna "La Vergine delle Cave", huile, 1489 [Lucco, M., éd. 2006]

4.1.3. Saverio Salvioni (1755/66?-1833) et les carrières de Carrara

Les dessins de Saverio Salvioni acquièrent donc une double valeur: d'une part, ils constituent un document précis de l'état de l'exploitation des marbres au début du XIXe siècle et, de l'autre, ils synthétisent de manière claire les différentes techniques et instruments, utilisés dans le but d'une réplification des gestes et des façons de faire. En effet, à partir de 1810, il réalisa dix-huit vues à l'encre et au lavis consacrées aux carrières de marbre de Carrara et aux différentes phases de l'exploitation. Ces documents exceptionnels furent, peut-être, réalisés aussi dans le but de mieux comprendre cette activité, et pour l'introduire également dans le territoire de Massa Carrara¹⁵.



Fig. 8 Saverio Salvioni, dessins au lavis de l'exploitation des carrières de Carrare, début du XIXe siècle [Julien, P. 2006]

4.2. Les illustrations comme explication de la construction de l'architecture

Le recours aux images pour illustrer les traités d'architecture a commencé avec Antonio Averlino dit Filarete. Le recours à des images ainsi que l'écriture en langue vulgaire, et non en latin comme pour ses prédécesseurs, est un moyen de rendre le traité accessible aussi aux personnes qui ne sont

15. Les notices sur la vie de Saverio Salvioni sont assez limitées, mais nous savons qu'il était fils d'un médecin de Massa Carrara et qu'il avait fait des études d'art entre Florence et Rome. À la mort du père, il retourna à Massa Carrara, où il s'occupait de la gestion des biens de famille et continuait à pratiquer sa passion pour le dessin. Les informations présentées ici sont tirées de quelques notices présentes dans la page internet de la Biblioteca dell'Archivio di Stato di Massa, dans lequel sont conservés les dessins sur les carrières de Carrara (<http://www.archivi.beniculturali.it/ASMS/bibliotecaMS.html>, consulté le 07.06.2010) et des "Notizie Biografiche e Letterarie in continuazione della biblioteca modenese del Cavalier Abate Girolamo Tiraboschi", Tomo II, Reggio, Tipografia Torreggiani e Compagno, 1834, disponible en format numérisé à l'adresse: <http://books.google.ch>, consulté le 07.06.2010.

pas familières avec les lettres¹⁶. Dans le traité de Filarete, les images servent à expliquer les ordres et la composition architecturale, mais elles ne portent pas spécifiquement sur les problèmes de construction. Ce sont plutôt les constructeurs de machines qui, à la même époque, se préoccupent de décrire à travers des dessins leur construction et leur fonctionnement. À titre d'exemple, les dessins de Leonardo da Vinci des machines de tout type. Dans les croquis de Leonardo, nous trouvons aussi des dessins en trois dimensions qui sont des projections parallèles expliquant le fonctionnement par le biais de la décomposition en parties de la machine: ce sont des axonométries écorchées *ante litteram*¹⁷. Ce sont surtout les ingénieurs militaires qui, à partir du XVI^e siècle, s'approprient cette technique de représentation qui permet de visualiser l'ensemble simultanément en plan et en élévation.

L'axonométrie isométrique, type de représentation utilisé dans cette recherche, est aussi le type de projection à laquelle recourt Auguste Choisy pour illustrer ses différents ouvrages qui traitent de l'histoire de l'architecture et de sa construction.

4.2.1. Auguste Choisy (1841-1909)

«Les documents graphiques, quelquefois simplifiés par la suppression de détails sont, pour le plus grand nombre, présentés en projection axonométrique, système qui a la clarté de la perspective et se prête à des mesures immédiates. Dans ce système une seule image mouvementée et animée comme l'édifice lui-même, tient lieu de la figure abstraite fractionnée par plan, coupe et élévation. Le lecteur a sous ses yeux, à la fois, le plan, l'extérieur de l'édifice, sa coupe et sa disposition intérieure. Toutes les figures sont accompagnées d'échelle.»

«Les dessins qui vont suivre sont, ou des projections, ou des figures obtenues en réduisant dans un rapport déterminé les lignes parallèles aux axes gradués qui accompagnent chaque planche: ces représentations conventionnelles ont été préférées aux perspectives ordinaires comme se prêtant plus commodément aux mesures.»

Ces deux citations proviennent des introductions à l'"Histoire de l'Architecture" et à l'"Art de bâtir chez les Romains", dans lesquelles Auguste Choisy explique les raisons de l'utilisation de ce mode de représentation. L'isométrie est donc utilisée parce qu'elle permet une vision simultanée de l'ensemble de l'objet, sans déformations des différents axes, la mesure, directement sur le dessin, des dimensions de l'objet et la confrontation, grâce à une échelle commune, des exemples d'époques et de provenances disparates. Ces dessins acquièrent la valeur de diagrammes [Mandoul, T. 2008:148] et d'images "génétiques", donc capables, selon Roland Barthes, de retracer le chemin qui lie la matière à l'objet fini [*ibid*:145-146]. En effet, les planches gravées ainsi que les croquis d'Auguste Choisy ne représentent pas seulement le bâtiment, mais aussi les procédés techniques ayant permis sa construction ou la production de certaines de ses parties.

16. «Per questo ne piglierò ardire, ché ancora credo che a quelli che non saranno così dotti piacerà, e quelli che più periti e più in lettere intendenti saranno leggeranno gli autori sopraddetti.» [Finoli, A. M., Grassi, L., éd. 1972:11].

17. En effet, même si les projection parallèles étaient bien connues à cette époque, elles n'avaient pas un terme spécifique les désignant. Le mot "axonométrie" apparut seulement vers la moitié du XIX^e siècle dans des traités anglais et allemands [Mandoul, T. 2008; Aubert, J. 1996; Scolari, M. 1984].

4.2.2. L'axonométrie comme moyen de compréhension et outil de projet

Une démarche semblable à celle d'Auguste Choisy, mais qui fait recours aussi à la perspective, a été utilisée par Jean-Pierre Adam pour illustrer son livre "La Construction Romaine", qui traite autant des matériaux que des techniques. Adam insiste, dans son introduction, sur la valeur du dessin comme moyen de compréhension non seulement du bâtiment observé, mais aussi des différentes phases de sa construction et des matériaux utilisés. Ces dessins sont aussi une occasion d'éveiller la curiosité du lecteur, qui, par la suite, devrait rechercher soi-même des exemples similaires en essayant de les comprendre¹⁸.

Le résultat final de cette recherche se veut aussi un manuel au service des concepteurs de constructions en pierre naturelle et donc les illustrations deviennent un moyen privilégié pour transmettre les hypothèses et les résultats des vérifications. Le recours à l'image dessinée, à la place et en parallèle avec les photographies, rend plus simple la communication de ces principes. Dans la tradition des traités d'architecture, à partir de Filarete, les dessins qui accompagnent le texte permettent un dialogue plus direct avec le lecteur, qui est souvent aussi architecte ou constructeur, et réduisent le risque de malentendus.

En ce qui concerne les techniques de dessin, le dessin au trait, noir sur blanc, a été choisi pour sa clarté d'expression, pour l'extrême réduction formelle auquel il oblige et aussi pour la facilité de reproduction. L'axonométrie a été privilégiée parce qu'elle permet la lecture simultanée du plan et de la coupe (ou de l'élévation) et de conserver les mesures afin de pouvoir les confronter entre elles. C'est aussi la vision qui permet le mieux d'apprécier la construction et les assemblages et, pour cela, elle a été récemment réemployée par l'architecte français Gilles Perraudin pour ses projets en pierre naturelle massive. Dans le cas de constructions basées sur le principe de la modularité, ce dessin permet, pratiquement à lui seul, de représenter l'entier de l'édifice et les étapes de sa construction physique.

5. STRUCTURE DE LA THÈSE

5.1. Les chapitres

Pour revenir sur la recherche elle-même, elle a été structurée de manière à suivre cette démarche qui part de la ressource pour aboutir à l'application constructive. C'est aussi l'organisation adoptée pour notre texte.

Chaque chapitre comporte une introduction, des conclusions ainsi qu'une bibliographie. Ceci afin de permettre une lecture séparée des différentes parties constitutives de la recherche. La bibliographie à la fin du chapitre a été choisie pour rendre plus aisée la lecture. Elle contient les ouvrages auxquels on fait référence dans le texte du chapitre ainsi que ceux consultés pour l'écriture du même. Pour

18. «Ce qui n'est qu'une remarque amusante au début, devient une quête organisée, et la forme conduit ainsi à l'outil, l'outil au geste, le geste à l'homme qui l'exécute; de même, le choix d'une solution technique entraîne la recherche du motif qui l'a imposée et de la démarche intelligente qui l'a conçue. [...] L'illustration graphique et photographique, personnelle dans la mesure du possible, a été déterminée, certes pas en vue d'épuiser tous les exemples de chaque technique, mais en fonction d'un choix représentatif autorisant une typologie [...] Il convient donc de considérer les images proposées comme une orientation du regard et une excitation de la curiosité architecturale» [Adam, J.-P. 2005:7-8].

augmenter la fluidité dans la lecture nous avons aussi limité le nombre de notes en bas-de-page et utilisé, pour les références, le système dit "auteur-date" [Nom, P.rénom date:page], contenu directement dans le texte.

Des études de cas ont été introduites soit en début de chapitre, afin de décrire les problématiques, soit dans les différents sous-chapitres. Ces études ont l'avantage de prouver que certaines hypothèses sont valables et que les solutions envisagées ont déjà passé l'épreuve du temps. Elles rappellent aussi aux chercheurs que leur propre travail est une contribution ultérieure qui s'ajoute à l'histoire, en limitant l'exaltation temporaire en vue d'une innovation qui est, dans la plupart des cas, inexistante dans le domaine traité.

Le premier chapitre contient des bases de géologie et de minéralogie, nécessaires pour comprendre la relation étroite entre la nature des roches, leurs caractéristiques et la manière de les utiliser dans la construction. Ensuite nous traitons de la géologie de la Suisse afin de définir les différentes familles de roches, leur localisation géographique et leurs caractéristiques. Ce chapitre, qui a valeur de deuxième introduction, peut sembler trop long, mais le nombre d'informations qui y figurent permettent de pallier le manque de connaissances, surtout des architectes, en matière de sciences de la terre et à laquelle l'auteur a été confronté au début de ses recherches. Nous espérons par ce biais signaler un manque dans la formation des futurs architectes auquel il faudrait, à notre avis, remédier au plus vite. La connaissance de la géologie n'est pas au simple service de l'architecte qui s'intéresse à la pierre naturelle comme matériau de construction, mais peut devenir aussi thème de projet et outil pour une compréhension différente des bâtiments. Nous faisons ici référence aux exhortations de John Ruskin selon qui la connaissance de la géologie aurait permis de transformer les façades des bâtiments en bibliothèques de livres sur notre histoire¹⁹.

Le deuxième chapitre traite de l'exploitation des gisements de roche afin d'en extraire la pierre naturelle de taille. Après un bref aperçu historique de cette activité en Suisse, les techniques contemporaines sont illustrées. L'objectif final étant celui d'utiliser la pierre naturelle de taille en forme massive, les relations entre les techniques d'exploitation et les éléments massifs produits ont été mises en évidence. Les fiches des pierres suisses pour la construction massive que nous avons rédigées sont le principal résultat du travail de terrain et des connaissances acquises sur l'exploitation. L'approche économique essaie de montrer l'état de santé du secteur, mais aussi de prouver que la demande pour ce type de matériau est réelle, même si souvent les pierres naturelles étrangères sont préférées aux indigènes. Le problème de la planification du territoire et des carrières est aussi abordé afin de clarifier la différence entre carrière de pierre de taille et carrière de granulats, la situation législative et les différentes formes de valorisation de la ressource et des sites d'extractions sont également traitées, parce que garantir une exploitation durable de la ressource est une condition indispensable pour pouvoir, par la suite, en envisager une utilisation étendue.

19. «Ces couleurs, en plus de leur délicatesse d'adaptation, renferment toute une histoire; par la façon dont elles sont placées dans chaque morceau de marbre, elles nous disent par quels moyens fut produit ce marbre et par quelles transformations il a passé. [...] Si nous n'avions jamais eu sous les yeux que des marbres véritables, leur langage nous serait devenu compréhensible, le moins observateur d'entre nous, reconnaissant que telles pierres forment une classe particulière, rechercherait leur origine et prendrait grand intérêt à cette étude.[...] De recherche en recherche il en arriverait à ne plus pouvoir s'arrêter devant le pilier d'une porte sans se souvenir ou sans s'informer de quelque détail digne d'être retenu touchant les montagnes d'Italie, de Grèce, d'Afrique ou d'Espagne.» [Ruskin, J. 1934:177-178]

Dans le troisième chapitre, les éléments en pierre naturelle de taille, dont les caractéristiques ont été mises en évidence dans le premier chapitre et dont la production a été illustrée dans le deuxième, sont enfin mis en relation avec la construction. Les maçonneries en pierre de taille, dont les types sont définis au début du chapitre, sont ensuite traitées selon les problématiques liées à leur mise en oeuvre, à la statique, aux exigences de sécurité en cas de séisme et à celles liées au confort des habitants. Le cas de l'habitation a été choisi comme référence pour l'élaboration des solutions d'application, mais deux autres formes d'utilisation contemporaine sont traitées: la façade autoporteuse et le mur de soutènement.

En guise de conclusion, nous avons mis en évidence les écueils qui, actuellement, freinent le développement de l'utilisation de la pierre naturelle massive dans la construction, selon les modes décrits dans la recherche. Ceci a été fait en considérant autant l'exploitation que les applications constructives, sans oublier l'importance de l'enseignement et de la divulgation.

5.2. Les illustrations

Les différents chapitres sont illustrés par nos dessins ainsi que par des photographies et des images provenant des sources consultées. Les raisons de cette démultiplication de types d'illustrations a été expliquée dans le sous-chapitre précédent (voir sous-chapitre 4). Les différentes illustrations ont été divisées en deux catégories: les figures et les planches.

Les figures se trouvent à l'intérieur du texte et proviennent, pour la plupart, des sources documentaires consultées. Elles sont en lien direct avec le contenu du texte.

Les planches constituent des documents graphiques indépendants qui rassemblent des dessins et des images que nous avons réalisés pour illustrer les propos du texte. Elles rassemblent souvent plusieurs documents graphiques afin d'en permettre une lecture simultanée, et la confrontation directe à l'intérieur d'une même famille.

Toutes les illustrations, dont la source n'est pas spécifiée, sont de l'auteur.

5.3. Les annexes

Les annexes sont rasemblées dans un volume séparé et réunissent les documents qui, par leur étendue ou par leur caractères trop spécifique, ne peuvent pas trouver place dans ce texte.

Les fiches des pierres suisses pour la construction massive sont la principale annexe (Annexe A.1).

6. BIBLIOGRAPHIE

- AA.VV. 1979: *Viollet-le-Duc. Centenaire de la mort à Lausanne*, Lausanne, Musée historique de l'Ancien-Evêché, 293 p.
- Adam, J.-P. 2005: *La construction romaine. Matériaux et techniques*, Paris, Editions A. et J. Picard, 368 p. (première édition 1984)
- Alberti, L.B. 2004: *L'art d'édifier. Texte traduit du latin, présenté et annoté par Pierre Caye et Françoise Choay*, Paris, Editions du Seuil, 604 p. (la première édition latine du traité de Leon Battista Alberti, "De re aedificatoria", fut publiée à Florence par Nicolò di Lorenzo en 1485, et la première traduction italienne, "I dieci libri de l'architettura", parut à Venise chez Vincenzo Valgrisi en 1546)
- Angelillo, A., éd. 1999: *Alvaro Siza. Scritti di architettura*, Ginevra-Milano, Skira Editore, 206 p.
- Finoli, A. M., Grassi, L., éd. 1972: *Antonio Averlino detto il Filarete. Trattato di Architettura*, Milano, Edizioni il Polifilo, 2 Vol. (Le "Trattato di architettura" fut écrit par Antonio Averlino dit le Filarete entre 1461 et 1464, mais il ne fut jamais publié par son auteur)
- Aubert, J. 1996: *Axonométrie*, ("Savoir faire de l'architecture"), Paris, Les Editions de la Villette, 176 p.
- Bucci, F. 2009: "Perraudin Architectes. Cantina del monastero di Solan, La Bastide d'Engras", *Casabella*, n. 774, pp. 75-79.
- Camporesi, P. 1992: *Le belle contrade. Nascita del paesaggio italiano*, Milano, Garzanti Editore, 173 p. (tr. française: *Les belles contrées. Naissance du paysage italien*, Paris, Editions Gallimard, 1995, 203 p.)
- Cantàfora, A., Duboux, C. 2002: *La pomme d'Adrien ou de l'énigme du regard*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 304 p.
- de Quervain, F. 1969: *Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage*, Bern, Kümmerly und Frey Geographischer Verlag, 312 p.
- Devaux, M. 2008: *Seismic Vulnerability of Cultural Heritage Buildings in Switzerland*, (Thèse 4167), Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 430 p.
- Frey, P., éd. 1988: *E. Viollet-le-Duc et le Massif du Mont-Blanc. 1868-1879*, Lausanne, Editions Payot, 159 p.
- Grandjean, A. 2010: *Capacité portante de ponts en arc en maçonnerie de pierre naturelle. Modèle d'évaluation intégrant le niveau d'endommagement*, (Thèse 4596), Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 292 p.
- Haller, P. 1943: *Natursteine, künstliche Steine, Leichtbaustoffe*, ("Bautechnische Reihe. Nr. 6. Bauen in Kriegszeiten"), Zürich, Polygraphischer Verlag A.G., 48 p.
- Hayman, J. 1990: *John Ruskin and Switzerland*, Waterloo, Wilfrid Laurier University Press, 141 p.
- Hofmann, H., éd. 1939: *Heimat und Volk - Le pays et le peuple - Il paese e il popolo - Pajais e pövel*, Zürich, Verlag Fretz & Wasmuth AG, 96 p.
- Houben, H., Guillaud, H. 2006: *Traité de construction en terre*, Marseille, Editions Parenthèses, 355 p.
- Kündig, R. 1997: *Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz*, Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 522 p.
- Julien, P. 2006: *Marbres. De carrières en palais. Du Midi à Versailles, du sangs des dieux à la gloire des rois. XVIe-XVIIIe siècle*, Manosque, Le bec en l'air Editions, 272 p.

- Lemaître, H. 1965: *Les pierres dans l'oeuvre de Ruskin*, Université de Caen, Association des Publications de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines, 246 p.
- Lucco, M., éd. 2006: *Mantegna a Mantova 1460-1506*, Milano, Skira, 227 p.
- Mandoul, T. 2008: *Entre raison et utopie. L'Histoire de l'Architecture d'Auguste Choisy*, Wavre, Editions Mardaga, 319 p.
- Neumeyer, F. 1996: *Mies van der Rohe. Réflexions sur l'art de bâtir*, ("Collection Architextes 1"), Paris, Le Moniteur, 353 p.
- Niggli, P. 1915: *Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz*, ("Beitrage zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie V"), Bern, Francke, 423 p.
- Pavan, V., éd. 2001: *Le scritte della pietra*, Milano, Skira editore, 143 p.
- Pedretti, B., éd. 2007: *L'immagine maestra opere di Arduino Cantàfora e dei suoi atelier*, Mendrisio, Mendrisio Academy Press, 113 p.
- Pisani, M., éd. 2002: *Gilles Perraudin*, Melfi, Casa editrice Libria, 111 p.
- Pouillon, F. 1968: *Mémoires d'un architecte*, Paris, Editions du Seuil, 484 p.
- Reinhard, E., éd. 1945: *Stein und Steinwerk*, ("Landschaften und Bauten. Band 3"), Bern, Ilionverlag, 384 p.
- Ruskin, J. 1934: *Les pierres de Venise. Etudes locales pouvant servir de direction aux voyageurs séjournant à Venise et à Vérone*, Paris, H. Laurens Editeur, 320 p. (1851-1853, 1879 pour la Traveller's edition)
- Schmitthenner, E., éd. 1984: *Paul Schmitthenner. Gebaute Form. Variationen über ein Thema mit 60 Zeichnungen im Faksimile*, Leinfelden-Echterdingen, Verlagsanstalt Alexander Koch, 80 p. (Edition postume, éditée par Elisabeth Schmitthenner, du livre "Gebaute Form" que Paul Schmitthenner aurait dû publier en 1949)
- Scolari, M. 1984: "Elementi per una storia dell'architettura", *Casabella*, Anno XLVIII, n. 500, Marzo 1984, pp. 42-49.
- Trevisan, C. 2005: "Le rappresentazioni assonometriche nei trattati di Auguste Choisy", *Parametro*, Anno XXXV, n. 255, gennaio/febbraio 2005, pp. 56-65.
- Verband Schweizerischer Steinbruchbetriebe, éd. 1937(?): *Die schweizerischen Natursteine und ihre Verwendungsarten*, Zürich, Verband Schweizerischer Steinbruchbetriebe, 60 p.
- Viollet-le-Duc, E. 1978: *Histoire d'un dessinateur. Comment on apprend à dessiner*, Bruxelles-Liège, Pierre Mardaga éditeur, 304 p. (première édition 1879)
- Viollet-le-Duc, E. 2008: *Histoire d'une maison*, Gollion, Infolio éditions, 345 p. (première édition 1873)

GÉOLOGIE ET PETROGRAPHIE DES ROCHES SUISSES

1. BASES GÉNÉRALES DE GÉOLOGIE ET PÉTROGRAPHIE

Le premier chapitre traitera de la matière première au sens le plus strict. En effet, il faut posséder quelques bases de géologie afin de connaître les différents types de roches dont nous disposons, et parmi lesquelles nous choisirons. Ceci correspond parfaitement à l'un des principes énoncés par Leon Battista Alberti dans son "De rae aedificatoria" à propos des requis nécessaires pour la construction d'un édifice: «De fait, j'ai remarqué qu'un édifice est une sorte de corps qui, comme les autres corps, consiste en linéaments et en matière, les premiers produits par l'intelligence, la seconde engendrée par la nature: l'esprit et la réflexion s'appliquent aux premiers, la sélection et la préparation à la seconde [...]» [Alberti, L. B. 2004:51].

Dans le cas d'une matière première naturelle qui ne subit pas de transformations avant sa mise en œuvre, la connaissance de ses propriétés est la base pour comprendre son comportement en œuvre.

Nous avons décidé de traiter de façon indépendante la géologie et la pétrographie, cette dernière étant la branche spécifique qui se concentre sur l'étude des roches. Cette démarche nous permet de comprendre, par le biais de la géologie, la formation des roches dont nous disposons aujourd'hui et, par le biais de la pétrographie, les caractéristiques de ces dernières. La partie dédiée à la géologie est fortement simplifiée et résumée, apportant une base suffisante pour le projet et la discussion avec les spécialistes.

La partie de pétrographie est résumée et nous nous référons surtout aux types de roches que l'on peut rencontrer en Suisse.

Nous avons décidé de séparer les introductions générales à la géologie et à la pétrographie, d'une partie plus spécifiquement liée à la Suisse. La partie finale du chapitre est consacrée à l'étude géologique et pétrographique des roches suisses employées dans la construction.

1.1. Principes de géologie

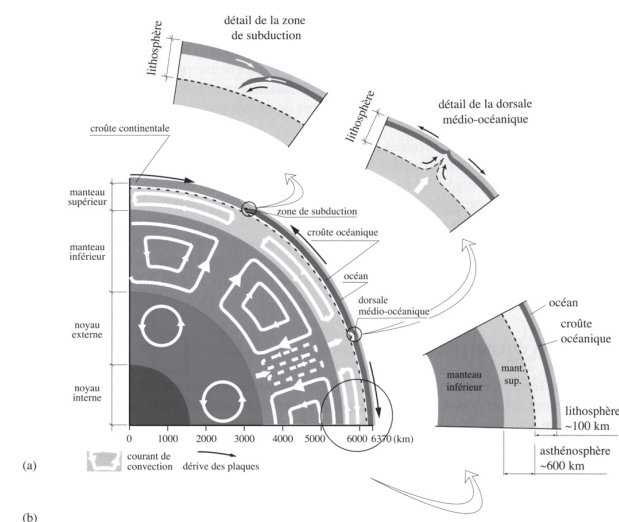
Géologie n.f. -1751; en italien 1603. Latin médiéval: geologia.

1. Science qui a pour objet la connaissance de la Terre, et de sa surface, et l'histoire de ses parties, l'évolution de leur agencement.

(*Le Petit Robert. Dictionnaire de la Langue Française*)

Comme le démontre la date de son apparition dans la langue française, la géologie se développa comme discipline surtout à partir du XVIII^e siècle, grâce à des personnages comme Georges-Louis Leclerc comte de Buffon, George Cuvier, Charles Darwin et Alfred Wegener. Les connaissances acquises permettent désormais à la géologie d'expliquer la majorité des faits, mais certains d'entre eux restent encore méconnus aujourd'hui. L'étude des transformations subies par la Terre se fait surtout par comparaison et observations sur place. De cela découle le fait que les phénomènes les plus connus sont les plus récents. Avant de se concentrer sur l'explication de la formation des roches, il est

utile de rappeler quelques concepts fondamentaux sur la structure, l'âge et les transformations de la planète Terre. On se référera surtout à l'ouvrage "Géologie. Bases pour l'ingénieur" du Dr. Prof. Aurèle Parriaux [Parriaux, A. 2006].



Enveloppe	Propriété physique	Géochimie ¹	Pétrographie
Croûte (lithosphère supérieure)	Solide élastique	O, Si, Al, Fe	Roches felsiques, intermédiaires et mafiques
Manteau supérieur - lithosphère inférieure	Solide élastique	O, Mg, Si, Fe	Roches ultramafiques
Manteau supérieur - asthénosphère	Solide ductile et 3% de liquide (fusion partielle)	O, Mg, Si, Fe	Roches ultramafiques
Manteau inférieur	Solide ductile	O, Si, Mg, Fe	Roches ultramafiques
Noyau externe	Liquide	Fe, Ni, (S)	Mélange amorphe
Noyau interne	Solide ductile	Fe, Ni	Alliages métalliques

¹ par ordre d'abondance.

Fig. I.1. Les différentes enveloppes constituant la planète Terre [Parriaux, A. 2006]

La planète Terre est une des quatre planètes telluriques du système solaire. Ces planètes internes sont de nature rocheuse et leur densité est élevée (entre 3,94 pour Mars et 5,52 pour la Terre). De ces quatre, seules la Terre et Venus possèdent une atmosphère dense: la première étant dominée par l'azote et l'oxygène. La Terre est probablement la seule planète qui est aujourd'hui géologiquement active. Cette activité se partage entre endogène et exogène. La première comprend les phénomènes dynamiques internes qui ont des effets à la surface: ils témoignent des mouvements tectoniques et du magmatisme. Les manifestations externes de l'activité endogène les plus facilement observables sont les volcans et les séismes. L'activité exogène correspond au modelage de la surface de la Terre par des agents externes: elle se décompose en érosion, transport des particules érodées et dépôt de ces dernières. L'érosion a des origines différentes: hydraulique (eau ou autre fluide), thermique (contrastes de température), éolienne (vents). La Terre se caractérise encore par la présence de l'eau à l'état liquide. Le cycle de cette dernière, outre d'être une des principales causes de la vie sur la planète, est l'un des moteurs principaux de l'érosion de sa surface. La Terre se compose d'une succession d'enveloppes concentriques, qui sont constitués essentiellement, selon des proportions très variables, d'oxygène, de silicium et de fer. Dans ce système, on distingue les noyaux interne et externe, les manteaux inférieur et supérieur ainsi que la croûte [Fig. I.1]. La matière qui constitue ces systèmes se trouve à des états différents, passant du solide au solide ductile jusqu'au liquide. La lithosphère peut être assimilée à une suite de plaques rigides. Elle est l'assemblage de la croûte et de la partie externe du manteau supérieur. L'asthénosphère est la partie restante du manteau supérieur qui est dans un état solide ductile. La lithosphère flotte donc sur l'asthénosphère et les différentes plaques s'y déplacent grâce

aux courants de convection engendrées par la différence de température des couches, qui s'accroît avec la profondeur. De ces mouvements découle le phénomène connu sous le nom de "tectonique des plaques", qu'on traitera par la suite.

Les transformations subies par la planète Terre se caractérisent par les déplacements de la lithosphère sur l'asthénosphère: ces mouvements sont propres à la tectonique des plaques. Son étude ne peut pas être séparée de celle de la formation des roches, qui est le magmatisme. La théorie de la dérive des continents, énoncée par Alfred Wegener en 1915, a été adaptée par Harry Hammond Hess et admise au début des années 1960. Ce modèle se base sur deux types de structures primordiales. Les rides médio-océaniques, ou dorsales, où est produite la croûte océaniques. La production se fait de façon symétrique de part et d'autre de la dorsale. La croûte se déplace vers les fosses océaniques, ou zones de subduction, ou elle est engloutie. On a donc une expansion océanique et un recyclage perpétuel de la croûte. Les continents se déplacent aussi, mais ne s'enfoncent pas à cause de leur plus faible densité.

Pour pouvoir traiter de la formation des roches, il est nécessaire avant tout de connaître les étapes fondamentales de la constitution de notre planète comme il nous est possible de l'observer aujourd'hui. Les études géochronologiques ont permis d'établir une échelle du temps permettant de tracer l'histoire de la planète. Le temps est découpé en ères, puis en périodes qui se divisent en époques [Fig. I.2]. Ces termes qui déterminent un âge géologique servent souvent aussi pour désigner une roche.

La formation de l'univers devrait dater d'il y a environ 15 milliards d'années; celle du système solaire d'environ 4,55 milliards d'années.

La première ère géologique est le Précambrien, de 4,55 milliards à 560 millions d'années. Les connaissances de cette époque sont limitées. Le Précambrien se divise en deux périodes: l'Archéen, de 4,55 à 2,5 milliards, et le Protérozoïque, de 2,5 milliards à 560 millions. Dans la première période, on assiste à la diminution de l'énergie thermique de la Terre qui se rapproche d'une fonction de désagrégation radioactive; radioactivité qui est à la source de l'énergie interne produite par la planète. À cette même période remonte la cristallisation des roches magmatiques qui forment la croûte solide primitive et la condensation de la vapeur d'eau et des gaz qui forment l'hydrosphère liquide. La période du Protérozoïque, se caractérise par l'apparition de la tectonique des plaques: les plaques lithosphériques, plus légères parce que constituées de roches enrichies en silicium, comme les granites, se déplacent et produisent les premiers reliefs. Un vaste supercontinent se forme: le Rodinia. Les reliefs disparaissent à la suite de l'érosion, ce qui produit des sédiments et la formation de roches sédimentaires. Les cycles géodynamiques tels que ceux connus à nos jours sont présents. Les socles précambriens forment aujourd'hui une grosse partie de l'ossature des continents. Le Précambrien est aussi une période de grandes évolutions des organismes: la vie apparaît sur la Terre il y a 3,85 milliards d'années et les premiers organismes pluricellulaires il y a environ un milliard d'années. La deuxième ère est l'Ère Primaire ou Paléozoïque, de 560 à 245 millions d'années. Le début est marqué par la fragmentation du supercontinent Rodinia à cause de forts mouvements tectoniques qui engendrent d'importantes orogénèses, dont la plus connue est l'hercynienne. Ces massifs sont aujourd'hui fortement érodés, ce qui explique leur faible hauteur. À la période du Carbonifère remonte la formation de la couche d'ozone qui a la propriété de retenir les radiations UV. Cela permit

le développement des premières faunes à coquilles et, après, la colonisation des terres émergées par les plantes ainsi que l'apparition des premiers Vertébrés et Amphibiens. À la fin de l'Ère Primaire, on assiste à la formation d'un nouveau continent unique, la Pangée, et d'un seul océan, la Panthalassa. L'Ère Secondaire ou Mésozoïque, de 245 à 65 millions d'années, est marquée par de grands événements tectoniques. Une nouvelle mer s'ouvre entre deux parties de la Pangée: la Téthys sépare le Gondwana (actuelle Afrique) du Laurasia (actuelle Europe). Ces mouvements produisent, à la fin du Jurassique, la rupture de la Pangée: le Laurasia, plutôt stable, se sépare de plus en plus du Gondwana, en dislocation progressive. À la fin du Crétacé, une phase compressive succédant à celle de distension, produit une nouvelle orogénèse qui est la cause de la formation des Alpes. L'expansion océanique produit la différenciation de l'Atlantique, grâce aussi à la dérive des Amériques, où se forment les Andes et la Sierra Nevada. L'Inde se détache du Gondwana. Sur les nouveaux continents, apparaissent les Mammifères il y a 200 millions d'années, les Oiseaux et les Angiospermes vers 150 millions. Les reptiles se diversifient et atteignent des tailles gigantesques: les dinosaures, qui disparaissent à la fin de cette ère suite à une grave crise biologique.

L'ère suivante et l'Ère Tertiaire ou Cénozoïque, de 65 à 1,8 millions d'années. Cette ère est marquée par la fin de l'importante migration continentale, cela produit la surrection de l'Himalaya, provoquée par la collision et l'enfoncement de l'Inde, un fragment du Gondwana, sous le continent Eurasien, et celle des Alpes, provoquée par l'enfoncement du continent Eurasien sous le Gondwana, suite à la collision avec ce dernier. Parallèlement à la formation des Alpes, on assiste à la disparition de la Téthys qui deviendra ensuite la Méditerranée, à la fin du Messinien. Le développement le plus important au niveau des êtres vivants est celui des Mammifères, qui s'imposent dès l'Eocène à toutes les latitudes. Le début de l'évolution des Primates commence au Paléocène, les premiers ancêtres de l'Homme apparaissent dans le grand rift africain il y a 7 millions d'années.

L'Ère Quaternaire, commencée il y a 1,8 millions d'années, est celle dans laquelle nous nous trouvons encore. Cette ère est marquée, surtout dans l'hémisphère Nord, par les glaciations, qui engendrent des importants phénomènes d'érosion. Leurs causes, encore incertaines, sont probablement géologiques et astronomiques: d'un côté la dérive des continents en latitude et de l'autre la variation de l'activité solaire. Le Quaternaire est l'ère de l'Homme.

1.1.1. Formation des roches

Les roches formant la croûte terrestre se forment, comme il a été susmentionné, grâce au magmatisme. Ces mêmes roches arrivent à la surface soit à cause des mouvements tectoniques, soit à cause de l'érosion. L'érosion des roches produit des particules qui sont déplacées et qui se déposent par la suite; on a ainsi sédimentation. Les mouvements tectoniques, comme par exemple l'orogénèse, peuvent transformer des roches existantes de façon radicale, c'est le métamorphisme. Magmatisme, sédimentation et métamorphisme, sont, depuis toujours, les trois formes principales de formation des roches sur notre planète [Fig. I.3]. On exclut, dans le cadre de cette recherche, les roches d'origine externe à la planète, comme celles dont la source sont les impacts des météorites.

Le magmatisme est le premier moteur de la formation des roches, si on considère une hypothétique suite chronologique dans leur formation. Les roches de ce type se produisent grâce à la solidification de la matière à l'état liquide, le magma. Les différents magmas se trouvent dans des réservoirs situés,

Echelle géologique			Age (mio d'années)	Evénements géologiques	Roches			
CENOZOÏQUE (Tertiaire et Quaternaire)	Quaternaire	Holocène		0,01	Poursuite de la surrection et de l'érosion des Alpes	Sable et graviers		
		Pléistocène		1,65	Plusieurs périodes glaciaires	Moraines de fond, moraines latérales, alluvions, loess, lignites		
	Tertiaire	Pliocène		5,3	Plissement du Jura	Plateau: Alpes:		
		Miocène	Molasse d'eau douce supérieure	23	Phase principale du plissement des Nappes Helvétiques	Dépôts d'inondations; sables; tufs volcaniques	Suite du métamorphisme: schistes argileux; schistes micacés; gneiss quartzites; marbres; roches calc-silicatées; amphibolites; gneiss ocellés	
								Molasse marine supérieure
		Oligocène	Molasse d'eau douce inférieure	34	40	Mise en place des Nappes Penniques et Austroalpines	Dépôts d'inondations; sables; tufs volcaniques	
			Molasse marine inférieure					
		Eocène		53			Marnes et grès marins avec des bancs coquilliers	Flysch:
	Paléocène		65		Compression et subduction dans le Pennique		Brèches; grès; schistes argileux	
	MESOZOÏQUE (Secondaire)	Crétacé	Crétacé supérieur		96			
Crétacé inférieur			135	Dislocation du supercontinent Pangée et ouverture de l'Océan alpin (Mesogée)	Sédimentation marine très diversifiée (surtout calcaires; marnes; argiles; grès) Dans les bassins océaniques: basaltes et gabbros			
Jurassique		Malm				154		
		Dogger				180		
Lias		205						
Trias		Keuper	Norien	230	Mer tropicale peu profonde	Marnes multicolores		
			Carnien					
	Muschelkalk	Ladinien	240					
		Anisien						
Buntsandstein		Scythien	245		Grès			
PALEOZOÏQUE (Primaire)	Permien		295	Erosion continentale, sédimentation désertique. Plutonisme et volcanisme	Sédiments rougeâtres: conglomérats et grès. Rhyolites / quartzporphyres. Granites (Randa; Baveno)			
	Carbonifère		360	Sédimentation continentale. Végétation luxuriante. Plutonisme et volcanisme	Conglomérats foncés; grès et schistes argileux. Anthracite. Granites (p.e. Aar, Mont Blanc, Bernina); syénites; diorites. Roches volcano-sédimentaires			
	Dévonien		410	Formation du socle cristallin au cours de plusieurs orogénèses qui se succèdent	Grande diversité de roches métamorphiques; plutoniques et volcaniques			
	Silurien		435					
	Ordovicien		500					
	Cambrien		540					
PRECAMBRIEN								

Fig. I.2. Echelle géologique d'après [Labhart, T. et al. 1997]

généralement, dans la lithosphère. Les magmas sont formés par des roches partiellement fondues, cela signifie qu'une partie des minéraux sont à l'état liquide et qu'une autre partie, celle des minéraux les plus réfractaires, est encore à l'état solide. Les magmas se caractérisent par les minéraux qui les composent et après solidification produisent, à cause de cela, des roches différentes. On divise les magmas en quatre familles principales [Parriaux, A. 2006:181]: magmas felsiques, riches en feldspath et silice, pauvres en fer; magmas intermédiaires, teneur moyenne en silice; magmas mafiques, riches en magnésium et fer, pauvres en silice; magmas ultramafiques, dont la teneur en magnésium et fer est encore supérieure aux précédents.

Les magmas se solidifient dans des régions du manteau supérieur appelées chambres magmatiques. Les conditions de température n'étant pas homogènes dans la chambre, on se trouve face à un processus de cristallisation qu'on définit de "fractionné", du fait que les minéraux d'un même magma ne se cristallisent pas de façon homogène à l'intérieur d'une même chambre magmatique. La cristallisation fractionnée est le premier phénomène parmi les quatre qui permettent la solidification d'un magma lors d'un refroidissement lent, appelé aussi processus plutonique. Le deuxième phénomène est celui de la ségrégation magmatique [Parriaux, A. 2006:186]. L'assimilation est causée par l'augmentation de la température à l'intérieur de la chambre magmatique, suite à la solidification du magma, qui engendre la fusion des roches encaissantes, celles des bords de la chambre, qui peuvent soit s'incorporer au magma à l'état liquide, soit à l'état solide, comme fragments. Le mélange est, par contre, un amalgame de deux magmas différents à l'intérieur de la chambre magmatique. Dans le cadre de cette recherche, des différentes configurations magmatiques [Parriaux, A. 2006:190], on considère seulement le magmatisme orogénique, qui correspond aux zones de subduction entre une plaque océanique et une plaque continentale. Ce sont les lieux de formation de la lithosphère continentale. Cette dernière est plus complexe que la lithosphère océanique. Elle a une épaisseur de 100 à 150 km, et se compose de deux parties: la croûte supérieure, d'une épaisseur de 10 à 20 km, qui contient des sédiments, des roches volcaniques de surface, puis des granites et des roches métamorphiques, et la croûte inférieure, formée par des roches magmatiques plus denses de composition intermédiaire à mafique.

Les différentes conditions géologiques de cristallisation du magma, liées aux différentes manifestations magmatiques, donnent lieu à des roches aux caractéristiques diverses. La cristallisation à grande profondeur du magma est appelé plutonisme, sa durée varie entre des milliers à plusieurs millions d'années. Ce temps permet à la matière de bien se structurer en cristaux. Les roches plutoniques possèdent par conséquent une structure grenue et les cristaux sont visibles à l'œil nu. Les roches plutoniques les plus caractéristiques, et aussi les plus abondantes sur la Terre, sont les granites. Le volcanisme est la manifestation la plus spectaculaire du magmatisme, qui se divise en une série de phénomènes différents et de roches qui leur sont liés. La cristallisation se fait de manière rapide à cause du contact avec l'air ou l'eau. La texture est généralement microcristalline, jusqu'à amorphe, comme dans le cas de l'obsidienne. Les laves sont des magmas qui s'écoulent en surface, si elles contiennent beaucoup de gaz, les roches assument une structure vacuolaire, comme la pierre ponce. Si l'éruption se fait sous forme de particules, on est face à des émissions pyroclastiques, le dépôt de ces dernières produisent des roches. Selon le diamètre, on distingue: les blocs et les bombes, diamètre supérieur à 64 mm; les lapillis, de diamètre jusqu'à 2 mm; les cendres. Les pouzzolanes sont,

par exemple, des cendres volcaniques riches en silice, alumine et oxyde de fer. Ces dépôts peuvent se lithifier par diagenèse et donner lieu à des roches volcano-sédimentaires, appelées aussi tufs volcaniques.

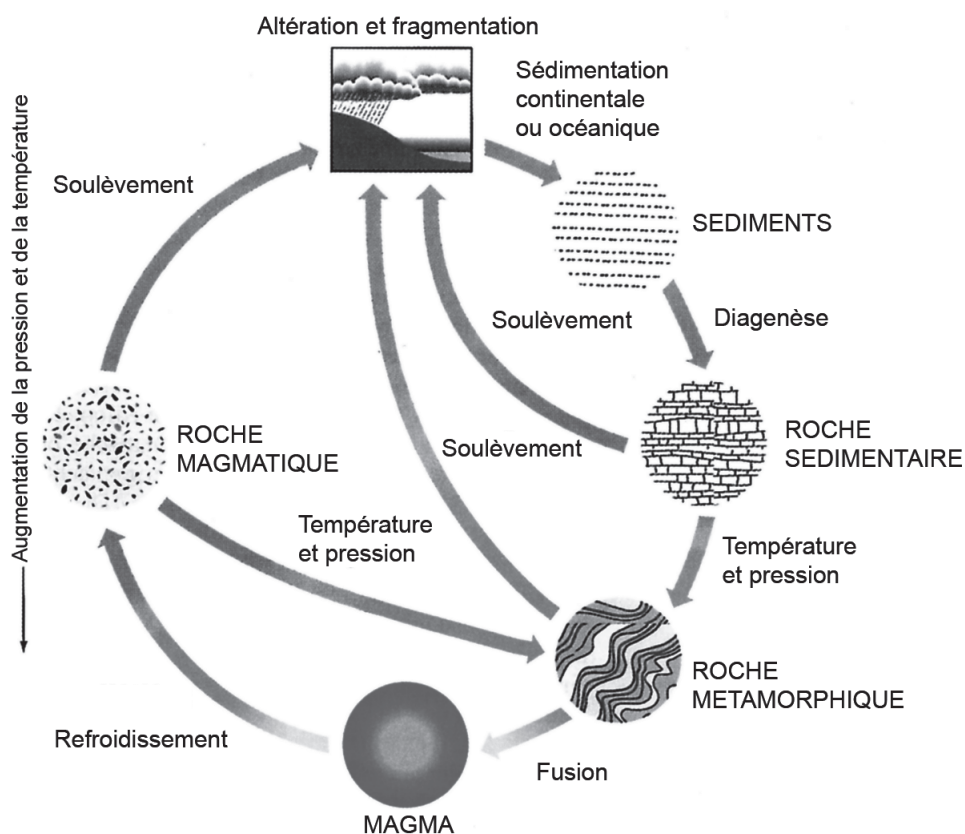


Fig. I.3. Le cycle des roches [Mojon. A. 2006]

Les roches magmatiques arrivées à la surface de la Terre sont soumises au phénomène de l'érosion, l'un des plus importants quant au modelage de notre planète. La matière géologique érodée est transportée par différents agents, dont le plus important, au moins dans le cadre de cette recherche, est l'eau. L'eau subit elle-même un cycle, ce qui entraîne les mouvements de cette dernière [Parriaux, A. 2006:207]. L'érosion continentale se divise en altération in situ et fragmentation mécanique, enlèvement et transport. Les particules non solubles sont transportées par le ruissellement et le vent, celles qui sont solubles sous forme ionique par les eaux. La sédimentation peut advenir dans deux milieux distincts qui influenceront la nature des roches sédimentaires produites. On a par conséquent les sédimentations continentale et océanique.

La vitesse du fluide qui transporte les particules diminuant, on assiste au phénomène du dépôt de ces dernières. Dans le cas de l'eau continentale, cela se manifeste dans la partie intérieure des méandres dans les plaines alluviales, dans les zones inondables des fleuves, dans les cônes de déjection et dans les lacs. Dans le cas du transport éolien, l'accumulation advient dans les dépressions ou dans des lieux à l'abri d'obstacle: ce dépôt est appelé "loess". Les ensembles sédimentaires se sont formés à la suite d'importants phénomènes d'orogénèse: dans le cadre de cette recherche, le plus important est sûrement celui du bassin molassique qui s'étend de Chambéry à Vienne, et qui se compose de matière géologique appartenant aux Alpes.

À l'intérieur du milieu sédimentaire continental, on trouve des environnements particuliers auxquels

correspondent des types propres d'érosion, transport et dépôt de sédiments. Les versants sont un environnement où l'érosion advient à cause de l'instabilité produite par la force de gravité. La résistance au cisaillement propre à chaque roche atteignant sa limite, la masse se déplace vers l'aval. Ce déplacement se fait de différentes manières: chute verticale de blocs; glissement; emportement de particules par ruissellement diffus ou par une avalanche [Parriaux, A. 2006:297]. L'eau en mouvement des cours d'eau érode aussi les roches et transporte les particules. L'érosion se produit surtout dans les parties hautes des bassins et forme des vallées caractéristiques, au profil en V. En aval du bassin, on se trouve dans la zone de sédimentation, généralement une plaine alluviale bordée par des cônes de déjection. Les sédiments des méandres des fleuves sont des dépôts graveleux et sableux discontinus, ceux des cônes de déjection sont en couches discontinues et obliques mal triées. Dans l'environnement lacustre, la nature des sédiments change selon la distance à l'embouchure. Les deltas aux entrées des lacs présentent différentes couches caractérisées par la dimension des sédiments, les plus fins se trouvant en aval de l'embouchure. Loin de l'embouchure, on trouve des fosses lacustres, dont le fond est rempli par des sédiments fins, comme les séries de sables fins, limons, argiles ou des dépôts biogènes provenant de la désagrégation d'organismes vivants. Les zones palustres sont aussi des milieux de sédimentation qui sont caractérisés par la formation de la tourbe. La minéralisation de cette dernière peut produire soit du gaz soit des liquides. Les régions glaciaires sont aussi des milieux d'érosion et de sédimentation, aujourd'hui comme dans le passé, surtout à l'époque des grandes glaciations du Quaternaire. Les moraines sont le produit direct du déplacement des glaciers. Elles sont formées par des éléments de taille et de forme variés. Les blocs erratiques sont caractéristiques des moraines superficielles, la densité du dépôt et les stries le sont des moraines de fond. L'eau qui sort du glacier produit aussi des dépôts, de la même façon que les fleuves, on a ainsi des alluvions fluvio-glaciaires et des dépôts glacio-lacustres. Les versants nord des Alpes, qui se trouvent à une altitude de plus de 2'500 m, sont des terrains gelés en permanence. Ces glaciers rocheux, composés de blocs et de débris emballés dans la glace, possèdent une plasticité qui cause leur fluage le long des versants. Le déplacement est mesuré en décimètres par année [Parriaux, A. 2006:329]. Quand une couche superficielle de terrain glacé dégèle, mais que celle qui est inférieure reste glacée, l'eau gorge le terrain et ce dernier devient une pâte liquide qui va aussi glisser le long de la pente. Ce phénomène est appelé solifluxion.

Le milieu de sédimentation océanique est celui qui a produit la partie majeure des roches sédimentaires. On peut affirmer que le milieu océanique est le réceptacle final de toute la matière érodée sur les terres émergées. Cette matière se trouve soit à l'état de débris soit à l'état ionique, dissoute dans l'eau. Dans le milieu océanique, on trouve trois classes de sédiments, qui forment autant de roches sédimentaires: les sédiments détritiques, ressemblant à ceux des deltas continentaux; les sédiments biogènes, formés par des organismes vivants océaniques, et les sédiments hydrochimiques, issus de la précipitation physico-chimique des sels contenus dans l'eau de mer [Parriaux, A. 2006:342]. Dans les marges continentales, zone entre la côte et le glacis d'une étendue d'environ 2'000 m, on trouve les trois types de sédiments océaniques. Dans une zone côtière particulière, typique des mers tropicales, le lagon, une mer chaude, peu profonde et limitée par le récif, se forme un sédiment particulier, les oolites, qui sont constitués par du calcaire déposé en enveloppes concentriques autour d'un débris d'organisme ou d'un grain de sable [Parriaux, A. 2006:358]. Dans les glacis et les plaines

abyssales, les sédiments détritiques sont rares, vu l'éloignement de cette zone du bord, et les sédiments biogènes sont formés surtout par du plancton, d'origine animale, le zooplancton, ou végétal, le phytoplancton. Le squelette des planctons est formé soit par de la calcite, d'origine calcaire, soit par de l'opale, de nature siliceuse. Les marnes sont produites par des boues calcaires et des boues argileuses. Les sédiments hydrochimiques contiennent des oxydes de métaux, tel le fer, le nickel ou le cobalt. Les sédiments décrits ci-dessus doivent encore subir une diagenèse, ou lithification, pour devenir des roches sédimentaires. La diagenèse produit, par des phénomènes physico-chimiques, une augmentation de la densité et de la résistance mécanique du matériel géologique. Le premier phénomène, purement physique, est celui de la compaction des grains due à la charge mécanique exercée par les couches supérieures. On assiste à une variation de la porosité, qui est égale au rapport du volume des pores sur le volume total. Cette porosité diminue avec la profondeur et selon la forme des sédiments. L'eau circulant entre les sédiments transporte des ions qui se cristallisent en produisant des ponts solides entre les grains. Ce deuxième phénomène est chimique: le ciment formé le plus souvent par de la calcite ou de la silice amorphe se transforme en quartz. On considère aussi dans la diagenèse des roches sédimentaires des modifications minéralogiques légères produites par une variation des conditions de pression, température et chimie. À la différence de celles qui seront traitées pour le métamorphisme, ces recristallisations se produisent par voie solide, sans passer par la fusion magmatique (la température reste inférieure aux 50°C et la pression inférieure à 100 MPa).

Les orogénèses, décrites dans le cadre des ères géologiques, peuvent, grâce aux importants changements des conditions de pression et de température, transformer les roches magmatiques et sédimentaires. Ce phénomène est appelé métamorphisme et: «représente l'ensemble des transformations intervenant dans une roche à l'état solide, sans passage par l'état magmatique. Suite à de fortes modifications physiques et chimiques, la composition minéralogique de la roche, la texture (arrangement des cristaux) et la structure (géométrie à l'échelle de l'affleurement) sont affectées. Les facteurs principaux qui contrôlent le métamorphisme sont la pression et la température auxquelles s'ajoute l'action des fluides» [Parriaux, A., 2006:397]. On peut séparer trois processus de transformation principaux. La variation de la pression géostatique, qui correspond au poids de la colonne de terrain qui recouvre la roche, et de la température peuvent entraîner un minéral à un niveau d'instabilité thermodynamique. Ce minéral se transforme ainsi en un autre minéral, pouvant réagir avec d'autres minéraux. Par exemple, les minéraux argileux se transforment en micas; un mélange de quartz et argile en feldspath, et un mélange de calcite et argile en amphiboles ou pyroxènes. Ces nouveaux minéraux se distribuent et se recristallisent suivant les lignes de plus faible contrainte. Les transformations minéralogiques peuvent engendrer aussi une modification du milieu chimique, phénomène appelé "métasomatose". Si les contraintes mécaniques à l'échelle du sous-sol sont généralement anisotropes, au niveau local une direction de contrainte peut dominer les autres. Cette contrainte produit un lent effet de laminage de la matrice rocheuse, produisant une dislocation des minéraux. La texture qui en découle est anisotrope et les minéraux allongés ont tendance à s'orienter les uns parallèlement aux autres selon la direction de l'allongement.

Si on considère seulement les variations de température et de pression, on peut distinguer trois types de métamorphisme. Le métamorphisme régional, ou dynamo-thermique, qui est le type principal, comportant une augmentation de la température et de la pression. Celui-ci se produit dans les

zones de subduction ou d'orogénèse et affecte de vastes régions. Le métamorphisme de contact, ou thermique, se produit essentiellement en profondeur près des chambres magmatiques, ou en surface, en correspondance avec des cheminées volcaniques. Il intéresse des zones d'une étendue maximale de quelques kilomètres. Le dernier type est le métamorphisme cataclastique, ou dynamométamorphisme, qui se produit surtout au droit des accidents tectoniques, où on a des pressions mécaniques importantes. Les déformations de la roche se font à basse température, donc à faible profondeur.

1.2. Principes de minéralogie et pétrographie

Minéralogie n.f. -1750; «étude des sels minéraux» 1649; de minéral et -logie.

Science qui traite des minéraux constituant les matériaux de l'écorce terrestre.

Pétrographie n.f. -1842; de pétro- et -graphie.

Science qui décrit les roches et étudie leur structure et leur composition (minéralogie).

Minéral, ale, aux adj. ou n.m. – 1478; lat. médiév. mineralis.

II. N.m. (XVIe) Corps, substance inorganique. Élément ou composé naturel de la chimie minérale, constituant de l'écorce terrestre.

Pierre n.f. -1080; latin *petra*.

1. La pierre: matière minérale solide, dure, qui se rencontre à l'intérieur ou à la surface de l'écorce terrestre en masses compactes.

2. Variété particulière de cette matière. Roche.

4. Fragment d'une variété de cette matière servant à un usage particulier. (...) Bloc de roche employé pour la construction, la maçonnerie. Moellon.

Roche n.f. -980; latin populaire *rocca*.

1. Une, des roches. Bloc important de matière minérale dure.

2. (XVIIIe; roke «carrière de pierre» 1269) La roche. Matière minérale dure de la surface de la terre.

4. (XVIIIe) Scientifique. Matériau constitutif de l'écorce terrestre formé de minéraux d'une certaine homogénéité, durs et de grain serré (ex. quartz), plastique (ex. argile), meuble (ex. sable) ou liquide (ex. pétrole). Les roches forment le terrain de l'écorce terrestre. Sciences qui étudient les roches: pétrographie, pétrologie; géologie, minéralogie.

(*Le Petit Robert. Dictionnaire de la Langue Française*)

1.2.1. Minéraux constitutifs des roches

Les minéraux sont des: «solides naturels formés par des processus essentiellement inorganiques, organiques dans quelques rares cas. Ils ont une composition chimique définie ou un champ de compositions» [Parriaux, A. 2006:135]. Selon la structure atomique interne, on distingue deux catégories: les minéraux cristallisés, ou cristaux, dont la structure géométrique des atomes est ordonnée et découle de propriétés des sept systèmes cristallins, et les minéraux amorphes, dont les atomes sont distribués de façon non ordonnée.

La structure géométrique est déterminée au niveau atomique par le type de liaison entre les différents atomes. Ces liaisons sont essentiellement de deux types: ioniques, dans lesquelles les fortes attractions

électrostatiques produisent une compacité maximale, ou covalentes, dans lesquelles les atomes se partagent des électrons. Dans la nature, on peut trouver souvent, dans un même cristal, les deux types de liaisons.

Les minéraux cristallisés, ou cristaux, se caractérisent, à l'échelle atomique, par la façon dont un groupe d'atomes ou de ions est arrangé: une structure appelée "motif". Un motif se répète de façon stricte dans l'espace et il donne ainsi la forme visible du cristal. On peut ainsi classer les cristaux dans sept familles, selon leur motif [Fig. I.4].

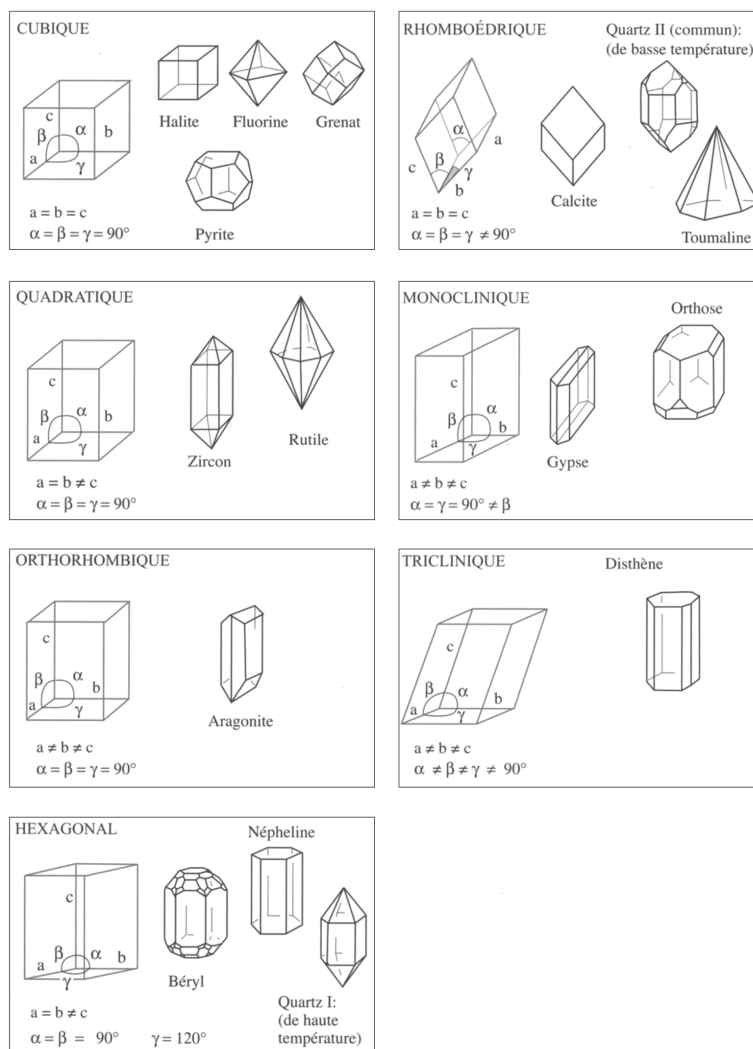


Fig. I.4. Les sept familles des cristaux [Parriaux, A. 2006]

On ne citera pas ici toutes les différentes caractéristiques des cristaux, mais il est utile d'en rappeler deux, qui ont une liaison directe avec les caractéristiques des roches: la dureté et le clivage.

La dureté des minéraux peut être mesurée sur le terrain selon l'échelle de dureté relative établie par Mohs en 1822. Basée sur dix échelons, son principe est très simple: un minéral de numéro inférieur, lorsqu'il est frotté contre un minéral de numéro supérieur, est rayé. La dureté des minéraux constitutifs d'une roche est un bon renseignement sur son abrasivité, donnée importante lors du choix, par exemple, du type d'outil de découpe.

Echelle de Mohs [Cailleux, A. 1974:19]:

1	Talc (kaolin, graphite)
2	Gypse
	<i>Sel gemme</i>
	<i>Anthracite</i>
	<i>Ongle</i>
	<i>Or, argent, cuivre</i>
3	Calcite
	<i>Dolomie</i>
4	Fluorine
	<i>Bronze</i>
5	Apatite
	<i>Verre, acier ordinaire</i>
6	Orthose (Feldspath)
	<i>Acier dur</i>
7	Quartz (agate)
8	Topaze
9	Corindon (émeri)
10	Diamant

«Les clivages sont des plans de cassure particuliers selon lesquels un cristal se rompt préférentiellement quand il est soumis à une contrainte mécanique» [Parriaux, A. 2006:146]. Si les cristaux ne possèdent pas de clivages, ils se rompent d'une manière quelconque, comme dans le cas du quartz. Les minéraux qui possèdent un seul clivage ont une structure en lamelles, d'où la dénomination de minéraux feuilletés: c'est le cas des micas. Les cristaux à deux clivages dominants ont une forme de prisme allongé et peuvent former, dans certains cas, des fibres. Ceux à trois clivages dominants sont en forme de prisme compact, comme pour l'orthose ou la calcite. La propriété de cassure de la roche influence la technique utilisée pour son extraction, par exemple dans le cas de roches riches en micas qui ont tendance à se casser selon un plan assez précis et pour lesquelles on utilise encore l'éclatement par des coins écarteurs.

La couleur des cristaux est à l'origine des différentes teintes des roches.

On donnera un aperçu des différents groupes de minéraux fondamentaux dans la constitution des roches, selon une classification géochimique.

Les silicates sont un vaste groupe de minéraux formés par l'élément tétraédrique SiO_4 très abondant dans le manteau et dans la lithosphère. Ils se forment soit dans le cycle endogène soit exogène, et sont donc des constituants essentiels des roches magmatiques et métamorphiques.

Le quartz, SiO_2 , peut être assimilé à une forme particulière de silicates, vu l'absence du groupe SiO_4 . Il est un minéral majeur dans les roches cristallines et détritiques. Sa forme est variable, surtout par le fait qu'il est le dernier minéral à cristalliser. Il est le constituant essentiel des roches plutoniques, notamment des granites, mais aussi des sédimentaires vu qu'il est très abondant dans les sables et les limons. Sa dureté est de 7 sur l'échelle de Mohs et sa densité de 2,65. Les sables quartziques sont utilisés comme base pour la fabrication du verre. Le quartz est aussi abondant dans les granulats pour le béton et les mortiers.

Les feldspath sont la famille la plus importante des constituants des roches (60% des roches magmatiques). Ils se partagent en deux pôles, le potassique et sodique (K, Na) et le calcique (Ca), suivis par un radical $AlSi_3O_8$. Dans les trois pôles se situent l'orthose, l'albite et l'anorthite. Les feldspath sont des cristaux compacts, de teinte blanchâtre qui peuvent être pigmentés en rose ou vert, à cause des inclusions de fer, et ils présentent deux ou trois clivages. Leur dureté est de 5 à 6 et leur densité de 2,5 à 2,7. Ils constituent, avec le quartz, les plages claires des roches magmatiques et métamorphiques, par exemple des granites et des gneiss.

Les silicates ferro-magnésiens sont aussi une vaste famille de silicates dans lesquelles sont présents le fer et le magnésium. On les trouve dans les roches magmatiques. On citera l'olivine, les pyroxènes et les amphiboles. Les deux derniers ont deux clivages. Leur dureté est comprise entre 5 et 7 sur l'échelle de Mohs et leur densité est supérieure à 3.

La famille des silicates ferromagnésiens comprend aussi celle des phyllosilicates ferromagnésiens qu'on peut trouver dans les roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires. Ils se composent d'une succession d'empilement de couches, sous forme de feuillets ou lamelles, et ils ont donc un clivage parfait et net. Les familles principales sont les micas et les serpentines. Le principal mica ferromagnésien est la biotite (mica noir) de dureté comprise entre 2,5 et 3 et densité entre 2,8 et 3,2. On trouve la biotite dans les roches magmatiques comme les granites, dans les métamorphiques comme les gneiss ou les micaschistes, ainsi que dans des roches sédimentaires détritiques.

Les serpentines sont des minéraux qui résultent de l'altération primaire des silicates magnésiens. Ils forment une roche qui est appelée serpentinite (on utilisera ici ce nom pour désigner les roches, en accord avec les géologues. Il faut noter que dans le marché on trouve encore souvent le mot serpentinite aussi pour les roches [Foucault, A., Raoult, J.-F. 1988:294-295]). Les principaux minéraux sont l'antigorite et le chrysotile, la première se présente sous forme massive et grenue, le deuxième est fibreux. Ils ont une dureté comprise entre 3 et 5 et une densité de 2,5 à 2,6. L'antigorite est de couleur dominante verte, le chrysotile blanc. Ce dernier est la seule forme d'amiante encore exploitée. Le talc appartient aussi à cette famille. Sa dureté est égale à 1 et sa densité de 2,7 à 2,8.

Les phyllosilicates non ferromagnésiens comprennent, entre autres minéraux, la muscovite et les argiles. La muscovite est un mica alumineux transparent, appelé aussi mica blanc. Sa structure est feuilletée, sa dureté varie entre 2 et 2,5 et sa densité entre 2,76 et 2,88. Elle est présente dans les roches magmatiques et métamorphiques. Elle a une bonne résistance à la chaleur.

Les argiles forment un groupe de très grande importance pour leur utilisation de la part de l'Homme: elles sont à la base de la poterie et de la fabrication des éléments de terre cuite, tels briques et tuiles. Au niveau des cristaux, les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés sous forme de petits cristaux en plaquettes. Ils forment des empilements de couches très lâches. Les principales argiles sont l'illite, la kaolinite et les smectites.

Parmi les nombreux silicates non ferromagnésiens, on cite le groupe des grenats, qui sont des minéraux secondaires des roches métamorphiques. Ils ont une forme compacte, une couleur variable, même si la gemme du même nom est de couleur rouge, leur dureté est comprise entre 6,5 et 7,5 et leur densité entre 3,5 et 4,3.

Les carbonates sont une famille de minéraux qui contiennent le radical CO_3 et qui sont essentiels dans la composition des roches sédimentaires et métamorphiques. Les deux minéraux principaux sont la calcite et la dolomite.

La calcite est la forme stable du carbonate de calcium. Elle forme des cristaux blancs ou incolores et translucides. Sa dureté est de 3 et sa densité de 2,7. Elle possède trois clivages parfaits et elle se dissout dans les acides forts. Elle se forme par transformations avec le temps des squelettes des mollusques ou autres organismes. Sa précipitation donne lieu à des concrétions de calcite, comme le tuf calcaire, et à la cimentation de la majorité des roches détritiques. Les marbres, roches calcaires métamorphisées, contiennent des cristaux de calcite de plus grande taille. La calcite est aussi à la base de la fabrication de la chaux et du ciment Portland, deux des principaux constituants des mortiers de construction.

La dolomite est le terme intermédiaire allant du carbonate de calcium à celui de magnésium. Comme la calcite, elle présente trois clivages parfaits, elle est d'incolore à blanc-gris, sa dureté varie entre 3,5 et 4 et sa densité est de 2,85. La dolomie est une roche constituée essentiellement par la dolomite et, si la dolomite est mélangée à la calcite, on a un calcaire dolomitique.

Les sulfates, famille peu représentée sur terre, comprennent deux formes importantes: le gypse et l'anhydride.

Le gypse est un minéral à deux clivages, transparent ou de couleur blanche, de dureté 2 et densité 2,32. Il est très soluble et de ce fait les roches qu'il forme ont une durabilité réduite en présence d'humidité et d'eau. L'albâtre est une variété microcristalline de gypse.

L'anhydride est souvent associée au gypse dans les dépôts sédimentaires. Elle a trois clivages, transparente ou incolore, sa dureté est de 3 à 3,5 et sa densité de 3. Elle se retransforme en gypse par hydratation.

Les sulfures sont la forme stable de la plupart des métaux. Leur abondance est faible, mais ils composent la majorité des gisements de métaux.

La pyrite se présente comme cristal de forme cubique, en prismes à facettes pentagonales ou en masses granulaires. Elle a une dureté de 6 à 6,5 et une densité de 5. La pyrite est un minéral présent en de nombreuses roches. Elle est stable en milieu réducteur, mais elle s'oxyde facilement à l'affleurement, ce qui explique la rouille qui se produit à la surface des roches dont elle est l'un des constituant.

Le principal minerai de fer est l'hématite, un oxyde de fer qui se trouve surtout dans les roches volcaniques. De couleur noire ou brun rougeâtre, l'hématite a une densité de 5,3 et une dureté variable entre 5,5 et 6,5.

1.2.2. Composition et caractéristiques des roches

Après avoir abordé le sujet de la formation des roches et celui des parties qui les constituent, les minéraux, il est possible de traiter les roches-mêmes du point de vue de leur composition et de leurs caractéristiques. Il est impossible, dans le cadre de cette recherche, de traiter de façon exhaustive de toutes les roches. On se limitera donc à celles qui sont présentes en Suisse et qui revêtent un intérêt dans le cadre de la construction en pierre. On a choisi d'utiliser la même suite que dans le cas de la formation des roches, c'est-à-dire de traiter en premier les roches magmatiques, après les sédimentaires et en dernier les métamorphiques.

Les roches magmatiques sont souvent appelées endogènes, du fait que leur matière constitutive provient de l'intérieur de la Terre. Les roches magmatiques se divisent, selon leur formation, en plutoniques et volcaniques. On utilisera comme critère de classification celui qui se base sur la teneur en silice de la roche et le contexte géodynamique [Parriaux, A. 2006:204]. Les quatre familles principales qui en découlent sont: les granites, les diorites, les gabbros et les péridotites. Dans le cadre de l'utilisation comme pierre de construction, ce sont surtout les familles des granites et des gabbros, qui sont exploitées en majorité. Les roches magmatiques sont souvent formées par des cristaux visibles à l'œil nu, si ces cristaux sont le seul constituant, on les appelle roches cristallines [Cailleux, A. 1974:27].

La famille la plus répandue est celle des granites. Ces derniers sont des roches plutoniques dans lesquelles il y a coexistence entre le quartz, un feldspath alcalin (souvent l'orthose) et un plagioclase acide, qui forment la matrice claire, et des micas blancs et/ou noirs. La structure est grenue et la roche est acide par son haut contenu en silice. Une composition similaire, mais d'origine volcanique, produit la rhyolite et, si le refroidissement est rapide et la lave riche en gaz, des ponces.

Les gabbros sont constitués essentiellement de plagioclase basique, de pyroxènes, d'amphibole et d'olivine. Ils ont aussi une structure grenue et sont acides. Leurs correspondants volcaniques sont les basaltes, qui possèdent, par contre, une structure microlithique.

On peut citer aussi les roches formées par lithification des projections volcaniques, tels les tufs, à l'origine desquels sont les lapillis, et certaines brèches, qui dérivent des blocs et des bombes.

Les roches sédimentaires, appelées aussi exogènes, trouvent leur origine à l'extérieur de la croûte terrestre. Dans leur structure, souvent, on ne peut pas distinguer à l'œil nu des minéraux, et parfois, elles renferment des fossiles, d'origine marine ou terrestre. Les roches sédimentaires sont généralement classées selon leur origine en roches détritiques, biogènes (ou organiques) et hydrochimiques (ou chimiques) [Parriaux, A. 2006:375-396].

Les roches détritiques sont encore classées par granulométrie décroissante. Les conglomérats se composent de blocs, de pierres et de graviers cimentés. Si ces éléments sont arrondis, ils sont appelés poudingues, s'ils sont anguleux, ce sont des brèches sédimentaires. Selon la qualité du ciment, on peut avoir, comme dans le cas des conglomérats avec ciment siliceux, des roches très dures et résistantes. Les conglomérats permo-carbonifères des Alpes valaisannes en sont un exemple [Parriaux, A. 2006:375]. Les grès sont issus de la cimentation des sables et sont souvent composés de grains de quartz. Selon la nature du ciment, l'on distingue les grès calcaires ou carbonatés, dolomitiques, argileux et siliceux. Deux grès à ciment calcaire sont importants pour le contexte alpin et suisse: la molasse et le flysch. L'expression qu'on utilisera dans le contexte de cette recherche pour éviter toute confusion entre roche et dépôt détritique est "grès de la Molasse". Cette roche est un grès riche en grains de feldspath qui contient souvent des minéraux verts. Elle possède une porosité élevée qui la rend sensible au gel et à la pollution atmosphérique. Les flyschs sont des roches détritiques de mer profonde. Les flyschs ont été transportés dans les Alpes par les nappes de recouvrement. Les grès présents dans les flyschs, en alternance avec des microgrès et des argilites, sont des roches peu poreuses. Les microgrès susmentionnés résultent de la cimentation des limons et ils se trouvent, outre dans les flyschs, dans les séries molassiques.

Les roches biogènes seront énumérées selon leur composition chimique, plutôt que selon le milieu

de sédimentation. En premier lieu, on traite les roches biogènes carbonatées, dont les calcaires sont les plus utilisés dans la construction. Les sédiments qui forment les calcaires proviennent soit des marges continentales soit du grand large et leur composante principale est le carbonate de calcium CaCO_3 . Les caractéristiques communes des différents calcaires sont directement liées avec celles de la calcite: faible dureté, 3 sur l'échelle de Mohs, mais souvent caractère massif; solubilité dans les eaux acides (karstification); alcalinité. Les principales familles de calcaires sont ordonnées selon le milieu de sédimentation, on a ainsi les calcaires récifaux (ou calcaires construits) produit par la sédimentation des anciens récifs. Les couches sont très massives et ne comportent presque aucune stratification. Ils contiennent des fossiles de coraux, de mollusques et d'algues. Les calcaires spathiques (sparitiques ou à échinodermes) sont essentiellement constitués de débris d'échinodermes, leurs squelettes étant autant de petits cristaux de calcite. À la cassure de la roche, ces cristaux sont visibles grâce à leur clivage luisant. Les calcaires coquilliers sont aussi constitués par des squelettes d'organismes, la dimension des fossiles des coquillages est souvent visible à l'œil nu. Les calcaires oolithiques ne sont pas des roches biogènes pures parce qu'ils se composent d'oolithes, de fines granules produites par précipitation concentrique de calcium autour d'un noyau d'origine organique ou minérale. Ils sont moins massifs que les calcaires récifaux et plus poreux. Les calcaires lithographiques se produisent par diagenèse des vases calcaires des grands fonds, leur structure est très fine sur des couches minces. La craie est une forme particulière de calcaire lithographique produite par une vase à coccolithophoridés qui a subi une faible diagenèse. Les calcaires siliceux se forment lorsqu'une fraction siliceuse présente dans la boue calcaire se transforme en quartz et qu'elle reste répartie de façon homogène dans la matrice de la roche. Le quartz confère à cette roche une dureté accrue, ce qui fait qu'elle est utilisée comme granulats pour les enrobés et le ballast ferroviaire. Les tufs calcaires sont le produit du dépôt des infiltrations à travers des couches calcaires, et si la déposition se fait en milieu lacustre, on obtient les travertins. Ce sont deux types de roches très importantes dans la construction, surtout par le passé. On cite aussi dans cette famille les marnes, terme moyen entre le calcaire franc, l'argilite franche et les dolomies.

Les roches biogènes siliceuses, sur lesquelles on ne s'attarde pas vu leur faible intérêt dans la construction, ont par contre eu une grande importance dans le développement de l'Homme au Paléolithique. Les premiers outils de coupe furent en effet produits par des éclats de roches à silex. Une autre famille très importante des roches biogènes est celle constituée par les combustibles fossiles, qui ne seront pas traités en détail.

Les roches hydrochimiques sont de moindre intérêt dans l'utilisation comme pierre de construction, mais on doit au moins citer les gypses, pour leur importance dans la préparation d'enduits, et les roches à halite, auxquelles appartient le sel gemme.

Après les roches magmatiques et sédimentaires, abordons les roches métamorphiques produites par la transformation des deux premières. On se limite aux roches produites par un métamorphisme régional [Parriaux, A. 2006:407], ce dernier étant le type principal, et les roches produites celles qui revêtent la plus grande importance dans la construction. Les séquences métamorphiques permettent, à partir d'une roche d'origine, de décrire les roches produites par métamorphisme croissant.

La séquence pélitique, ou argilo-quartzéuse, comporte comme roche de départ l'argilite, qui est particulièrement sensible à l'intensité du métamorphisme. La première roche métamorphique de

cette séquence est le schiste ardoisier, caractérisé par la présence de micas blancs et qui se débite naturellement en plaques minces. La roche est souvent de couleur foncée et est utilisée pour les plaques de couverture des toits. Après le chloritoschiste, la transformations des phyllosilicates se complète, pour obtenir les micas, muscovite et biotite, et le quartz commence sa recristallisation. On assiste à la formation des premiers lits, la roche a une structure schisteuse, mais à grain plus grossier, et elle est plus résistante grâce à la présence du quartz. Le terme final de la séquence pélitique est représenté par le gneiss, plus précisément paragneiss, dans lequel on trouve, avec les micas et le quartz, le feldspath. La structure foliée est formée par des couches claires de quartz et feldspath, alternées à celles de micas et phyllosilicates. La roche qui en résulte est anisotrope, ce qui produit une cassure facile parallèlement aux lits. Les gneiss sont très utilisés dans la construction.

La séquence quartzo-feldspathique comporte des roches de départ riches en silice, d'origine sédimentaire, surtout détritiques, et d'origine magmatique. Les grès contenant du quartz et à ciment siliceux produisent, par métamorphisme régional, le quartzite. La taille des cristaux de quartz grandit avec l'intensité du métamorphisme. La roche est de couleur blanc-beige ou parfois verdâtre, celles des Alpes du Permo-Trias contiennent de la pyrite et acquièrent par oxydation une patine brune. L'épaisseur des couches est décimétrique. Les roches magmatiques felsiques, tels les granites, soumises au métamorphisme régional, produisent le gneiss, appelé orthogneiss pour le distinguer de celui de la séquence pélitique. Il se caractérise par son anisotropie, à l'origine de laquelle se trouve la réorientation des minéraux suite à la recristallisation des micas. C'est une excellente pierre de construction.

La séquence carbonatée, dont les roches de départ sont des calcaires et des dolomies, comprend la pierre décorative par excellence, le marbre, qui se produit par recristallisation des microcristaux de calcite. Si le calcaire d'origine est pur, on obtient un marbre blanc, homogène et massif. Si on a des roches riches en fer, il se produit des marbres rubanés colorés: vert pour le fer réduit, rouge pour le fer oxydé, ocre ou beige pour le fer combiné aux hydroxydes. Si le contenu de magnésium est élevé, le résultat est un marbre dolomitique. Les impuretés argileuses ou quartzieuses du calcaire de départ, par métamorphisme intense, produisent des marbres à minéraux, contenant des minéraux silicatés calciques. La calcite détermine une dureté faible, qui facilite la taille, et la solubilité dans l'eau acide. Les gisements peuvent se présenter sous forme de couches massives exploitables.

En prenant les marnes comme roches de départ et en les soumettant à un métamorphisme régional, on obtient la séquence calcaro-pélitique, qui comprend deux termes: le calcschiste et l'amphibolite. Les calcschistes sont des roches de faible métamorphisme, dont la structure est litée et schisteuse. Elles sont peu résistantes et anisotropes. L'amphibolite, de métamorphisme plus intense, a une structure formée par une alternance de lits de feldspath et d'amphiboles et elle est schisteuse.

La séquence mafique, qui trouve dans le gabbro la roche de départ, produit elle aussi des amphibolites, qui sont plus massives que celles de la séquence calcaro-pélitique. Si elle sont riches en albite, en épidote et en chlorite, elles sont appelées prasinites.

Les roches ultramafiques, comme les peridotites, donnent lieu à la séquence ultramafique, à laquelle appartiennent les serpentinites. Elles ont une coloration vert profond, presque noir, et une texture non orientée. Celles des Alpes se trouvent dans les nappes internes et résultent du métamorphisme des roches des dorsales océaniques de la Téthys.

Pour traiter de la géologie de la Suisse, qui est le domaine géographique de cette recherche, on se réfère principalement aux ouvrages "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz" [Kündig, R., éd. 1997] et "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz" [de Quervain, F. 1969], qui sert de base au premier. En accord avec ces derniers, et avec de nombreuses autres sources, la Suisse sera subdivisée en trois régions géologiques principales, c'est-à-dire, le Jura, le Plateau ou Moyen Pays, et les Alpes [Fig. I.5]. Les ouvrages susmentionnés ont le mérite de décrire la géologie de la Suisse afin d'identifier les différentes ressources naturelles du sous-sol, la pierre naturelle en étant une, cette façon de faire s'adaptant aussi à la présente recherche. On pourra, par le biais de cas concrets se référant à notre territoire, introduire d'autres concepts de géologie qui ne figurent pas dans les paragraphes précédents.

2.1. Le Jura

La chaîne du Jura, que l'on appelle aussi simplement Jura, est une zone qui occupe les parties occidentales et nord-occidentales de la Suisse. Elle est bordée au sud et à l'est par le Plateau et au nord par le fossé rhénan. Le Jura a une longueur d'environ 300 km et s'étend entre Chambéry, en France, et la Lägern, au nord nord-ouest de Zurich, où il s'enfonce sous la Molasse du Plateau. La

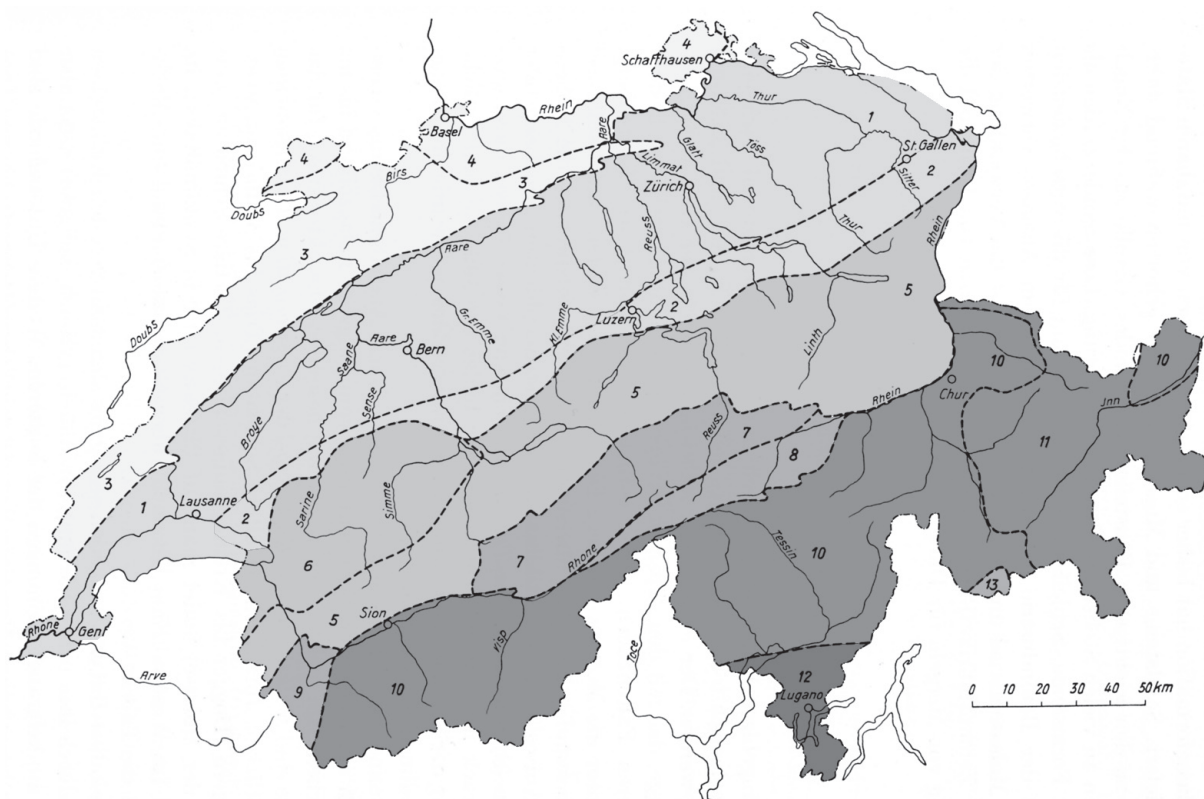


Fig. I.5. Carte géologique simplifiée de la Suisse, d'après Francis de Quervain [de Quervain, F. 1969]
 1. Molasse; 2. Molasse subalpine; 3. Jura Plissé; 4. Jura Tabulaire; 5-6. Nappes Helvétiques; 7. Massif de l'Aar; 8. Massif du Gothard; 9. Massif du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges; 10. Nappes Penniniques; 11. Nappes Austroalpines; 12. Sudalpin; 13. Jeune Intrusif, granite du Bergell.

chaîne de montagnes ne dépasse pas 1'600 à 1'700 m d'altitude. Le Jura est une digitation¹ des Alpes, dont l'individualisation date des mouvements tardifs du Tertiaire [Labhart, T. et al. 1997:40]. Le Jura

1. "Digitation, n. f., Géologie Structurale: Division d'une nappe en plusieurs unités structurales indépendantes détachées par repli et chevauchement." (Office de la langue française, 1991. Le Grand Dictionnaire Terminologique: <http://w3.granddictionnaire.com>, consulté le 23.08.2010).

est essentiellement constitué de sédiments qui datent du Mésozoïque, son socle cristallin étant peu touché par les plissements. Cette région est donc le lieu privilégié pour l'observation des fossiles du Mésozoïque: c'est elle qui a donné le nom à la deuxième période de cette ère, le Jurassique. Pendant le Mésozoïque le Jura se trouvait au-dessous d'une mer tropicale, la partie septentrionale de la Téthys, et fut donc le lieu de dépôts de différents sédiments pendant environ 200 millions d'années sur une épaisseur de 1'000 à 1'500 m. Ces sédiments ont produits une richesse de roches, telles les calcaires, les marnes, les argiles, les dolomies, les grès, les anhydrites et le sel gemme, qui forment aujourd'hui la majorité des reliefs. Dans la période suivante de l'Eocène, le Jura se trouvait au-dessus du niveau de la mer. Les fissures karstiques qui se formèrent dans les sols calcaires furent remplies d'argiles et de sable quartzique. Pendant les périodes glaciaires du Quaternaire, le Jura fut soit complètement recouvert par les glaces, soit seulement touché par quelques langues glaciaires. Cela explique l'insignifiance des dépôts glaciaires et la présence de dépôts morainiques et de blocs erratiques sur les sommets. Le Jura est donc caractérisé par une morphologie fortement marquée par la géologie plutôt que par l'érosion glaciaire.

Le Jura Suisse peut être divisé en deux unités principales, le Jura Plissé et le Jura Tabulaire, et les Franches-Montagnes. Ces dernières forment un plateau, à une altitude d'environ 1'000 m, et sont caractérisées par une abondance de cavités et sources karstiques qui déterminent une absence d'eaux superficielles. Le plissement de cette zone remonte au Miocène supérieur ou au Pliocène [Fig. I.6].

2.1.1. Le Jura Plissé

Le Jura Plissé est ainsi appelé parce qu'il est caractérisé par un système complexe de plissements de direction sud-ouest nord-est ou est. Les plis principaux sont parallèles à la chaîne de montagnes, ils se divisent en anticlinaux, plis en voûte, et synclinaux, plis en auge. Un deuxième système de plis, perpendiculaire au premier, est formé par des ruz et de cluses, étroites vallées érodées par l'eau. Le Jura Plissé est une chaîne de couverture, formée par des plissements superficiels, vu que sa profondeur est de l'ordre de 1 à 2 km. La largeur de cette bande diminue de l'ouest vers l'est: elle est de 30 km à la Vallée de Joux et de 1,5 km à la Lägern. Les plis, qui jouxtent le Plateau, forment une importante frontière morphologique qui caractérise le paysage de cette partie de la Suisse.

2.1.2. Le Jura Tabulaire

Le Jura Tabulaire est la partie septentrionale du Jura qui s'étend sur le territoire des cantons de Bâle-Campagne et Argovie. Il est constitué de sédiments mésozoïques non plissés qui ont été découpés, avec leurs socles cristallins, par des failles de direction nord nord-est sud sud-ouest et qui datent de l'Oligocène. Cette découpe a produit des montagnes tabulaires qui sont à l'origine du nom de cette partie du Jura. Le Jura Tabulaire constitue la couverture sédimentaire du massif de la Forêt-Noire. En remontant vers le nord, on assiste à l'affleurement de couches de plus en plus anciennes. La région de Laufenburg est la seule, en Suisse, où il est possible d'observer l'affleurement des gneiss à biotite et des granites rouges, intrusions du Carbonifère, qui constituent le socle cristallin du Jura.

2.2. Le Plateau

Le Plateau, ou Moyen Pays ("Mittelland"), est une cuvette de 300 km de longueur et de 40 à 70 km de largeur. Son sous-sol est caractérisé par une série de couches successives, dont la plus récente est la

Molasse. Ce mot, qui est couramment utilisé pour désigner un type particulier de roche, signifie, en géologie, une: «formation sédimentaire détritique marine et/ou d'eau douce qui se dépose à l'avant ou

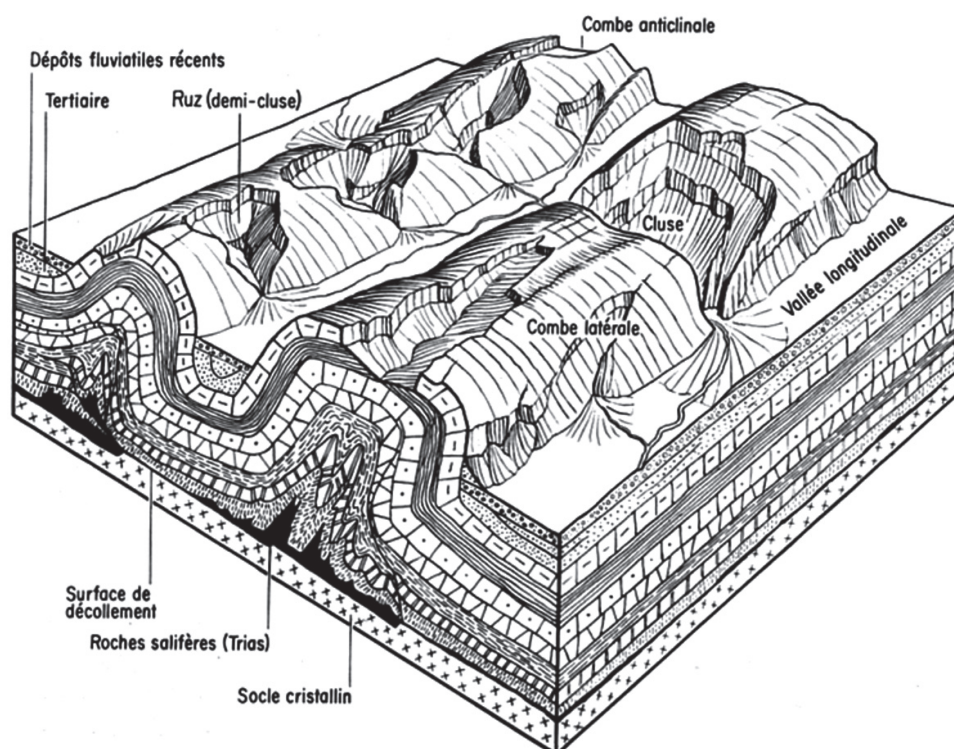


Fig. I.6. La structure tectonique du Jura suisse [Labhart, T. et al. 1997]

à l'arrière d'une zone orogénique en fin de tectonisation: conglomérats, grès, marnes, argiles, (flysch)» [Labhart, T. et al. 1997:196]. La Molasse est posée sur une couche de sédiments du Mésozoïque, similaires à ceux qui constituent le Jura, qui se déposèrent dans une mer tropicale et d'épaisseur décroissant de l'ouest vers l'est, de 2,5 à 0,8 km. Cette couche mésozoïque est posée sur un socle cristallin, formé par des gneiss et des granites.

Sur la surface du Plateau, on trouve des dépôts des glaciations du Quaternaire, comme les blocs erratiques, graviers et moraines, et des couches de tufs calcaires.

Le Plateau est la région de plus grande concentration de population en Suisse et elle comporte aussi les principaux centres économiques et politiques.

2.2.1. La Molasse

On traitera la couche la plus récente, celle de la Molasse, avec plus de détails que les autres. La Molasse s'est déposée au cours de 30 millions d'années dans le bassin au nord des Alpes, entre l'Oligocène et le Miocène. Cette couche a une épaisseur moyenne de 1 km, mais elle diminue du pied des Alpes, où l'épaisseur mesure 5 km, vers le nord, où elle atteint quelques centaines de mètres. Cela s'explique par le fait que les sédiments de la Molasse sont des produits de l'érosion alpine, transportés par les fleuves. Leur granulométrie est aussi liée à ce processus de déposition, les particules les plus légères ont été transportées à plus grande distance des zones d'érosion que les morceaux les plus lourds. Au pied des Alpes, on trouve les conglomérats ("Nagelfluh" dans le Plateau), puis les grès,

les argiles et enfin les marnes. La Molasse est caractérisée par une alternance de couches liées aux différents niveaux du bassin de sédimentation et de la mer. On a ainsi une Molasse marine et une d'eau douce. Il y eut deux fois la venue et le retrait de la mer, ce qui a produit quatre différents types de Molasse. On ajoute donc les suffixes inférieur et supérieur aux deux termes de la Molasse pour en désigner l'âge (la supérieure étant la plus récente). Enfin on a les quatre séries suivantes, en ordre stratigraphique: Molasse marine inférieure (UMM); Molasse d'eau douce inférieure (USM); Molasse marine supérieure (OMM) et Molasse d'eau douce supérieure (OSM).

La molasse marine est bien stratifiée en couches épaisses, elle est formées par des grès, des argiles et des marnes qui renferment souvent des fossiles marins. La Molasse d'eau douce, qui s'est déposée sur une terre émergée, se compose d'une alternance de grès grossiers et fins, d'argiles et marnes rouges et contient des fossiles de mammifères et de végétation subtropicale.

Un troisième type de Molasse existe, c'est la Molasse subalpine qui a été produite par les événement tectoniques liés aux derniers plissements des nappes Helvétiques pendant le Pliocène. Ces dernières ont chevauché sur une profondeur de 15 à 25 km les couches de Nagelfluh, qui ont été plissées. Cette zone, qui s'étend le long de la bordure septentrionale des Alpes, se caractérise par une morphologie marquée par des collines avec des parois où les Nagelfluh apparaissent fortement redressés et des niveaux de marnes recouverts de végétation.

À la suite des événements tectoniques qui portèrent à la formation de la Molasse subalpine, un important soulèvement de la partie occidentale du bassin molassique eut lieu. Cela impliqua une érosion d'environ 2'000 m de couches de Molasse, à laquelle il faut rajouter l'effet érosif des glaciations du Quaternaire. Aujourd'hui on assiste donc à l'affleurement de séries molassiques de plus en plus anciennes de l'ouest vers l'est: en Suisse orientale la Molasse d'eau douce inférieure, dans la région de Berne et de Fribourg la Molasse marine supérieure et dans la région lémanique la Molasse d'eau douce supérieure. Ce fait explique, en partie, la variation dans la qualité des grès de la Molasse utilisés comme pierre de construction sur le Plateau, notamment la différence entre les "molasses" de Berne et Fribourg et celle de Lausanne.

2.3. Les Alpes

Les Alpes sont une jeune chaîne de montagnes. L'orogénèse alpine a commencé vers la fin du Crétacé et elle a duré pendant 100 millions d'années et continue, par ses effets secondaires, encore aujourd'hui. Les Alpes s'étendent de Nice à Vienne, la partie Suisse, que l'on appellera par la suite "Alpes", est la plus centrale et la plus élevée. Elles se sont produites suite à la collision et à l'enfoncement du continent Eurasien sous le Gondwana. Le rétrécissement énorme subi par la lithosphère (de 500-700 km des zones de sédimentation d'origine aux actuels 120 à 150 km de largeur) a produit un épaississement de cette dernière et la formation d'un système complexe de plis et de nappes. En effet, les Alpes ne sont pas formées par un bloc massif, mais plutôt par une série de massifs et de nappes. Ce dernier mot nécessite d'être expliqué, vu son importance dans la compréhension de la structure de l'édifice alpin. Par nappe on entend généralement: «des ensembles de roches d'une certaine extension qui ont été déplacés (c'est-à-dire allochtones). Leur apparence est extraordinairement variée» [Labhart, T. et al. 1997:55]. L'étude, la description et la définition de ce système remontent au début du XXe siècle et font partie des grandes contributions géologiques fournies par des chercheurs suisses,

particulièrement par le neuchâtelois Emile Argand et sa carte tectonique des Alpes publiée entre 1911 et 1916. Les nappes sont constituées de roches, les plus profondes sont souvent métamorphisées, dont la sédimentation originale a eu lieu dans un bassin marin. Les mouvements de chevauchement et de plissement ont fait déplacer ces "paquets" de roches. Elles sont donc allochtones, en opposition aux autochtones qui n'ont pas subi de déplacements, comme par exemple le Jura Tabulaire. Aujourd'hui on observe les roches des nappes dans des zones très éloignées par rapport à leur milieu de formation. Le nom de la nappe est lié au lieu de sédimentation dans la Mésogée, l'Océan Alpin qui se forma au Jurassique suite à la dislocation de la Pangée. La direction des mouvements, des plissements et chevauchements en résultants, suivit une orientation nord-ouest, ce qui a produit une asymétrie dans l'édifice alpin. Les nappes méridionales furent, en général, charriées sur les roches septentrionales. De ce fait dérive l'épaississement de la lithosphère en correspondance des Alpes: elle atteint 60 km environ à la hauteur du nord du Tessin et 25 à 30 km dans le Jura.

À partir d'il y a environ 30 millions d'années, on assiste dans les Alpes à un phénomène de surrection de l'ordre de quelques millimètres par année. Il est lié aux mouvements tectoniques et au rétablissement de l'équilibre isostatique de la croûte, épaisse, mais allégée par l'érosion. Les roches légères, comme, par exemple, les roches métamorphiques, qui étaient enfouies dans les profondeurs de l'édifice alpin, ont donc tendance à remonter à la surface. En même temps on assiste à une continuelle érosion qui, elle aussi, fait affleurer des roches plus profondes. L'érosion, dans le cas des Alpes, est inférieure au soulèvement, ce qui fait que les Alpes sont en légère croissance. Le soulèvement est inégal, cela produit des culminations, où l'érosion fait aussi affleurer les unités les plus profondes, et des dépressions, où les unités profondes sont conservées. Un témoignage de ces phénomènes d'orogénèse consiste dans les séries de roches sédimentaires, brèches, grès et schistes argileux, appelés flysch, qui se trouvent en qualité de lubrifiant, entre les nappes.

Les Alpes, comme les précédentes zones, se subdivisent dans des unités plus petites, notamment les Massifs Cristallins, les domaines Helvétique, Pennique et Austroalpin, caractérisés par les nappes, et les Alpes méridionales ou Sudalpin.

2.3.1. Les Massifs Cristallins: Massif des Aiguilles Rouges et de l'Arpille; Massif du Mont Blanc; Massif de l'Aar; Massif du Gothard et Massif Intermédiaire du Tavetsch

Les Massifs Cristallins sont des morceaux d'une ancienne chaîne de montagnes européenne qui n'ont pas été impliqués dans l'édification des nappes. Ils remontent probablement au Paléozoïque. Ces morceaux ont été déplacés vers le nord, suite aux mouvements de l'orogénèse, et constituent aujourd'hui les plus hauts reliefs des Alpes. Ils sont généralement constitués par un cristallin très ancien, composé de roches métamorphiques et de roches magmatiques plus jeunes, souvent des granites sans ou avec intrusion de roches volcaniques. Dans la partie centrale des Alpes, appelée Massif Central, on distingue quatre Massifs principaux et un intermédiaire.

Dans la Suisse occidentale on trouve, au nord, le Massif des Aiguilles Rouges et de l'Arpille, les deux étant séparés par le synclinal permo-carbonifère de Salvan-Dorenaz. Le socle cristallin est constitué de paragneiss et de schistes micacés, auxquelles s'intercalent des quartzites, des marbres, des roches calc-silicatées, des amphibolites et de l'orthogneiss œillé. Un vrai granite central manque, mais il se trouve en profondeur. Au sud on trouve le Massif du Mont Blanc, dont le socle cristallin est semblable au

précédent, sauf par la présence d'un puissant corps granitique hercynien. Dans la partie orientale, on a des roches volcaniques plus jeunes comme recouvrement, des rhyolithes d'âge permien.

Le Massif de l'Aar est le plus grand des Massifs cristallins. Il se divise en zones allongées, du nord vers le sud, on trouve: le Cristallin de Lauterbrunnen et Innerkirchen, formé par des migmatites et des intrusions de gneiss, ainsi que par le granite du Carbonifère de Gasten; le Vieux Cristallin, dans lequel des marbres et des roches calc-silicatées s'intercalent au gneiss; le Granite Central de l'Aar, qui est le plus gros corps granitique de Suisse avec son étendue d'environ 500 km², et la Zone gneissique méridionale, où les gneiss ocellés sont abondants.

Le Massif du Gothard est celui qui a le plus subi les effets liés à l'orogénèse alpine, de cela dérive la grande richesse de pierres métamorphiques et l'isolement des granites. Ce massif peut être vu aussi comme une nappe avec des structures verticales [Labhart, T. et al. 1997:74]. La Zone Septentrionale est formée par des paragneiss, des schistes micacés et des intercalations de roches calc-silicatées, serpentinites, gabbros et amphibolites, qui sont liées à un métamorphisme de degré très élevé d'âge calédonien. La Zone Centrale est riche, par contre, en orthogneiss et en "Streifengneiss", un granite métamorphisé d'âge calédonien. La Zone Méridionale se caractérise par la présence de paragneiss et de schistes à grenats et à hornblende.

Le Massif Intermédiaire du Tavetsch divise celui de l'Aar et celui du Gothard, il est formé essentiellement par des paragneiss.

2.3.2. Les nappes: Helvétiques; Penniques et Austroalpines

On a déjà décrit plus haut les unités appelées nappes. On illustrera les principales des Alpes, en partant du nord.

Les Nappes Helvétiques occupent une zone étendue, au nord-ouest des Massifs Centraux, entre la vallée du Rhône et celle du Rhin. Ces nappes sont formées exclusivement de sédiments, d'âge mésozoïque et tertiaire, jusqu'à permien dans l'est. La partie méridionale du domaine Helvétique se compose surtout de roches sédimentées dans un milieu profond, argileuses et marneuses: elle est appelée Ultra-Helvétique. Elle appartient à une phase de formation des Alpes antérieure à celle de l'Helvétique. Ce domaine n'est pas une nappe à vrai dire, mais plutôt une série de zones disloquées autour des Nappes Helvétiques.

Les sédiments qui forment les Nappes Helvétiques ont été décollés de leurs socles cristallins dans une phase tardive de la formation des Alpes. Ils ont subi un déplacement vers le nord de 30 à 50 km. Ce phénomène dura environ 25 millions d'années, à partir de l'Oligocène moyen. Les paquets de roches qui n'ont subi qu'un léger déplacement sont définis comme parautochtones (nappes de Morcles et du Dolderhorn).

Le plissement des Nappes Helvétiques s'est fait de manière plus plastique que dans d'autres domaines, les calcaires ont subi seulement des fissurations.

Les roches qui constituent les Nappes Helvétiques sont séparées en couches de compétences diverses. Les couches les plus dures sont formées par des calcaires, dont les plus importants sont le calcaire Urgonien du Crétacé et les calcaires du Malm, le remplissage souple étant formé par des marnes et des schistes argileux.

Le domaine Ultra-Helvétique est constitué de sédiments incompetents, surtout des marnes, des gypses et du flysch schisteux.

Les Nappes Penniques touchent une région très étendue qui comprend les Alpes valaisannes au sud du Rhône, le Tessin septentrional, les Grisons occidentaux ainsi que la Fenêtre Tectonique de la Basse Engadine. À la différence des Nappes Helvétiques, dans la formation des Penniques, le socle cristallin a été impliqué dans les plissements. Ces Nappes cristallines sont formées par des paquets de gneiss d'épaisseur kilométrique, dirigés vers le nord, lesquels, du nord vers le sud, passent d'une structure plissée à une pelliculaire. Le charriage a atteint 50 km. Les différentes couches sont séparées par des sédiments fins et leur orientation reste plate jusqu'à la Ligne Insubrienne, ou du Tonale. Le long de cette dernière, les Nappes passent à la position verticale. Ici, pendant l'époque Tertiaire, les mouvements verticaux ont été de l'ordre de 15 km, les horizontaux de 60 à 70 km. La Ligne Insubrienne est riche d'affleurements de roches métamorphisées riches en minéraux, comme dans le cas des gisements de Castione, dans le canton du Tessin.

Les sédiments du Pennique se composent de schistes calcaires et argileux, appelés aussi schistes des Grisons ("Bündnerschiefer"), de schistes lustrés, de serpentinites. «Les nappes Penniques et en particulier la Nappe de la Leventina représentent très probablement l'unité tectonique la plus profonde de l'arc alpin. Les gneiss lepontins, définis ainsi par Wenk (1953) et typiques des nombreuses carrières de la Riviera, nous offrent donc la possibilité de regarder dans le "coeur" des Alpes» [Cotti, G. et al. 1990:76].

Les Nappes Cristallines comprennent surtout des gneiss. Celles du Lepontin, dans le Tessin septentrional, sont probablement les plus profondes de l'édifice alpin, en particulier celles de l'Antigorio et du Simano. Dans les Grisons occidentaux, les différentes Nappes s'imbriquent de plus en plus les unes sur les autres, jusqu'à atteindre une épaisseur d'environ 18 km.

Les Nappes Austroalpines se trouvent dans les Grisons orientaux et sont formées par des éléments appartenant au continent africain qui ont été charriés sur plus de 100 km. Ce domaine se divise en inférieur, moyen et supérieur. Elles sont constituées par des parties de sédiments et de cristallin, selon une structure très complexe. Leur position élevée dans les Alpes fait que les roches qui les composent ont subi un métamorphisme léger. Les couches de sédiments se composent surtout par des séries puissantes de dolomies et de calcaires du Trias de plusieurs kilomètres d'épaisseur. Les couches cristallines sont formées par différentes sortes de sédiments métamorphisés, des plutonites et des volcanites.

2.3.3. *Le Jeune Intrusif: le granite du Bergell*

La partie septentrionale du Bergell, de la Valtelline et de la Valle della Mera, est caractérisée par la présence de roches intrusives jeunes, d'époque Tertiaire et qui ont environ 30 millions d'années. Ces sont en particulier des granites et des tonalites. Le granite est massif et riche en feldspath rougeâtre. Ces roches ne sont pas exploitées en Suisse, vue leur situation géographique défavorable, mais par contre en Italie dans la région de Novate au nord du Lac de Côme.

2.3.4. *Les Alpes méridionales (Sudalpin)*

Les Alpes méridionales sont divisées des Alpes centrales par la Ligne Insubrienne. Une petite partie de cette unité se trouve sur le territoire suisse et affleure dans la partie méridionale du Tessin,

le Sottoceneri. La caractéristique principale de cette unité est qu'elle n'a pas été touchée par les plissements liés à l'orogénèse alpine. Les roches qui la constituent n'ont pas subi de métamorphisme. Les traces des phénomènes ante-alpins sont donc conservés, notamment en ce qui concerne les fossiles.

Le socle cristallin est traversé par des roches volcaniques d'âge Permien et il est recouvert de sédiments du Mésozoïque. Le socle se divise en deux unités principales, formées par des roches métamorphiques calédoniennes et hercyniennes: la zone Strona-Ceneri et celle d'Ivrea. Les roches de la première proviennent des parties supérieures de la croûte terrestre et sont principalement des gneiss, des amphibolites, des schistes à micas, intercalés à des marbres, des quartzites et des roches calc-silicatés. Celles de la zone d'Ivrea proviennent de la partie inférieure de la croûte.

Dans la zone du Lac Ceresio, le socle cristallin est couvert par des séries de roches volcaniques permienes sur une épaisseur d'environ 1000 mètres et une étendue de 50 km². C'est le plus grand affleurement de ce type de roches connu en Suisse. Sur cette couche reposent les sédiments mésozoïques, auxquels appartient aussi la brèche d'Arzo. Plus au sud, dans la région du Monte San Giorgio, la dolomie bitumineuse du Trias renferme le plus riche gisement de fossiles de reptiles d'Europe.

Il faut encore noter que la morphologie du territoire Suisse, tel qu'on la connaît aujourd'hui, est fortement liée aux phénomènes des glaciations et à l'érosion fluviale. Ces phénomènes d'époque Quaternaire, et qui se poursuivent encore, ont produit principalement des dépôts de différents types qui sont une partie importante des sols exploités par l'agriculture, par l'industrie des granulats et qui constituent les terrains de fondations d'un grand nombre d'édifices. On ne traitera pas en détail ces formations, vu leur faible intérêt dans l'activité extractive de la pierre naturelle. Les blocs erratiques, déplacés lors des glaciations, ont pendant longtemps fourni des bonnes pierres pour la construction. Aujourd'hui ils sont protégés par la loi et leur exploitation a cessé.

3. DESCRIPTION PÉTROGRAPHIQUE DES ROCHES SUISSES

Afin de pouvoir donner un aperçu le plus complet possible des roches exploitées en Suisse pour la construction, nous nous sommes basé sur les ouvrages, déjà cités, "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz" [Kündig, R., éd. 1997] et "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz" [de Quervain, F. 1969] et sur l'étude la plus complète sur les pierres de construction suisses, c'est-à-dire, "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz" [Niggli, P. 1915]². Cet ouvrage, dont l'âge atteindra bientôt le siècle, nous donne un corpus d'informations très complètes, pour l'époque, mais qui seront ici, dans certains cas, mises à jour et corrigées par rapport à la pétrographie actuelle.

On a choisi de suivre le principe d'un exposé par type de roche, comme dans l'ouvrage de 1915, plutôt que celui d'une reprise de la division du territoire utilisée plus haut, et qui a été utilisée dans le livre de 1996 ou par familles géologiques, pétrographiques ou géographiques comme dans celui de 1969. En effet certains types de roches se trouvent dans des lieux différents de notre pays, certains autres étant par contre typiques d'une région géologique. On essaiera d'inclure la donnée géographique dans les

2. On fait référence ici à l'édition de l'ouvrage faite dans le cadre des "Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie V", Bern, Francke, 1915, qui contient aussi la partie sur la géographie des carrières suisses par Paul Niggli. La version parue comme "Mitteilungen der Materialprüfungsanstalt an der ETHZ, Heft14, Zürich, Aschmann und Scheller, 1915" ne contient pas cette première partie.

informations fournies pour chaque type de roche.

3.1. Les grès

Les grès sont des roches sédimentaires détritiques, formées principalement de grains de quartz, au moins 85% [Foucault, A., Raoult, J.-F. 1988:156]. Les autres composantes principales sont les feldspaths et les micas, auxquelles s'ajoutent des minéraux variés, tels les grenats, les épidotes, la tourmaline.

La forme des grains est très variable, d'arrondie à très anguleuse, et elle dépend surtout de la distance de transport des sédiments. Dans le cas de la Suisse, les grains sont surtout anguleux, à cause de la petite distance entre les lieux d'érosion, en général les Alpes, et les lieux de sédimentation, les Préalpes et le Plateau.

La dimension des grains est très variable.

La forme et la dimension des grains de quartz ont une influence négligeable sur la résistance aux agents atmosphériques de la roche.

L'influence majeure sur la résistance aux agents atmosphériques des grès est produite par le type de liaison entre les grains et par la nature du ciment. On distingue deux types principaux de liaisons, auxquelles correspondent deux types de ciments. Le premier type est la liaison par contact entre les grains, dans laquelle le ciment est une fine couche de nature généralement siliceuse. Le deuxième type est la liaison formée par une masse de ciment dans laquelle les grains sont pris, dans ce cas le ciment est surtout calcaire. Il est donc clair qu'un ciment siliceux est moins altérable qu'un autre à base calcaire, de même pour le grès qui en dérive.

De la structure des composantes grenues et du ciment dérive l'autre caractéristique des grès, leur porosité primaire. Dans ce cas aussi, cette donnée est très variable: on a des grès microporeux jusqu'à caverneux, comme des pores capillaires ou des pores non communicants. Cette donnée influence de façon considérable la résistance de la roche aux agents atmosphériques: un grès microporeux dont les pores sont capillaires sera plus sensible au gel qu'un grès caverneux, par exemple un grès coquillier.

Les principaux grès suisses se trouvent dans le Plateau et appartiennent à la Molasse.

3.1.1. Grès arkosiques

Les grès arkosiques sont appelés en Suisse "grès granitiques" [Kündig, R., éd. 1997] ou "grès de type Zug" [Niggli, P. 1915].

Ils appartiennent principalement à la Molasse d'eau douce inférieure de l'Aquitainien. Les gisements se situent le long d'une bande entre St-Margrethen, SG, et Entlebuch, LU.

Le quartz n'est pas la composante dominante, mais il est présent à côté de nombreux autres minéraux, surtout des feldspaths (orthoclases, microclines et plagioclases) et des micas (biotites et muscovites).

Les feldspaths, en particulier, peuvent atteindre le même pourcentage que le quartz. La pyrite est rare.

Les grains sont surtout anguleux et de dimension variable, parfois supérieure à 1 mm.

Les liaisons entre les grains sont surtout du type par contact et le ciment est siliceux. Si la calcite est présente, son rôle est essentiellement celui de matériau de remplissage.

La porosité est presque nulle à l'apparence, mais elle est visible dans une lame mince [Niggli, P. 1915].

Aucune stratification n'est apparente au niveau de la roche, elle est par contre visible au niveau du gisement.

La résistance des grès arkosiques aux agents atmosphériques est bonne, même si les sels en solutions peuvent être une source de dommage, en particulier d'exfoliation. À long terme, l'altération des feldspaths peut aussi constituer une cause de dommage, surtout au niveau de l'aspect de la roche.

La couleur est grise avec des tons verts, bleus ou rouge, s'il y a présence d'oxydes de fer.

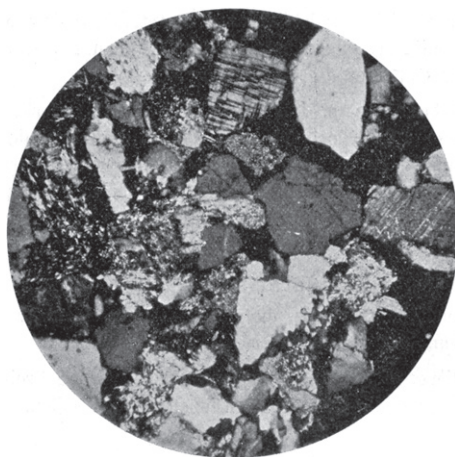


Fig. I.7. Grès arkosique, agrandissement 27,5x [Niggli, P. 1915]

3.1.2. Grès calcaires

Les grès calcaires se divisent en deux types principaux: les "grès en plaquettes" [Kündig, R., éd. 1997] ou "grès de type Lucerne" [Niggli, P. 1915] et les "grès de la Molasse" ou "grès de type Berne" [Niggli, P. 1915].

Les "grès en plaquettes" du Burdigalien appartiennent à la partie subalpine de la Molasse marine supérieure. Les gisements se trouvent entre Entlebuch, LU, et Rorschach, SG, à proximité de ceux du "grès granitique".

La composition est semblable à celle des grès arkosiques, mais le quartz est dominant. Il y a présence de glauconite et, parfois, de restes de Foraminifères et d'Echinodermes. La pyrite est rare.

Les grains sont plus réguliers et la forme plus arrondie que pour les grès arkosiques; la dimension moyenne des grains est de 0,2 à 0,3 mm.

La liaison est constituée par une masse de ciment formé par de la calcite cristalline à cryptocristalline, parfois poecilitique, dans le cas où plusieurs grains de quartz, de 3 à 5, sont englobés dans un cristal de calcite.

La porosité est causée surtout par le remplissage lacunaire de la calcite entre les grains, ces vides sont parfois remplis d'argile. La stratification est apparente et constituée par des couches de micac, de cela dérive le nom de "grès en plaquettes" ("Plattensandstein"). La résistance aux agents atmosphériques est moindre que pour les grès arkosiques, ils sont sensibles à l'exposition aux gaz de combustion, ce qui produit une exfoliation. La couleur est grise avec des tons verts, bleus ou rouges.

Les "grès de la Molasse", de Berne et de Fribourg du Burdigalien, appartiennent à la Molasse marine supérieure, dans une vaste zone qui s'étend de Schaffhouse à Lausanne, VD.

La composition est semblable au type précédent, la glauconite est encore plus présente, ce qui détermine la couleur souvent verte ou bleue. La pyrite est presque absente.

La forme et la dimension des grains est aussi semblable au type de Lucerne.

La calcite cristalline forme des éléments isolés, mais rarement elle constitue un ciment de base. Le ciment siliceux entre les grains est pratiquement absent. Cette faiblesse au niveau des liaisons est due à une diagenèse plus légère par rapport au type de Lucerne, même si les deux roches appartiennent au même niveau stratigraphique. La porosité est élevée, ce qui produit une faible résistance mécanique. La roche ne présente aucune stratification apparente. La résistance à l'exposition aux agents atmosphériques est mauvaise, les dommages assument surtout la forme de désagréments et exfoliations. La couleur est gris-vert ou gris-bleu.

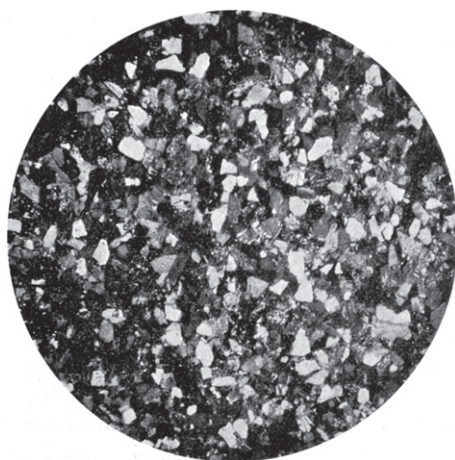


Fig. I.8. Grès de la Molasse de Berne, agrandissement 6x [Niggli, P. 1915]

3.1.3. Grès coquilliers

Plutôt qu'à un type, on peut faire référence à une famille de grès calcaires à calcaires arénacés, dont la caractéristique commune est d'être formés par des restes de coquillages. Ils remontent au Burdigalien et dans le Plateau Suisse se trouvent intercalés à la Molasse marine supérieure sous forme de bancs. Les principaux gisements se trouvent dans la région de la Broye dans le canton de Fribourg et dans le canton d'Argovie. Les bancs atteignent environ 20 mètres d'épaisseur. Les roches plus pauvres en quartz et riches en carbonate de calcium sont appelées calcaires coquilliers ("Muschelkalksteine"), celles plus riches en galets, Nagelfluh coquilliers ("Muschelnagelfluh") [Kündig, R., éd. 1997; de Quervain, F. 1969:182]. La dénomination allemande "Muschelkalkstein" (calcaire coquillier) est utilisé dans le marché de la pierre, cela parce que les types exploités sont ceux à plus haute teneur en carbonate de calcium [de Quervain, F. 1969:182].

La composition est très variable. La teneur en carbonate de calcium est proportionnelle à celle de restes de coquillages. La glauconite est présente comme dans les grès du type de Berne.

Les grains sont de forme et de dimension variables, pouvant atteindre la taille de centimètres

(Nagelfluh coquiller).

La liaison entre les grains de quartz est généralement formée par de la calcite. Il en dérive une structure microcristalline compacte.

La porosité élevée est due aux coquillages qui n'ont pas été remplis par la calcite. Les pores sont souvent de grosses dimensions, mais peu capillaires.

La stratification est absente ou peu marquée.

La résistance des grès coquilliers est généralement bonne, même très bonne dans le cas des grès coquilliers du canton d'Argovie. En effet, plus la teneur en calcium est élevée, plus la roche est résistante.

La couleur est variable du gris clair au gris-vert ou gris-bleu.

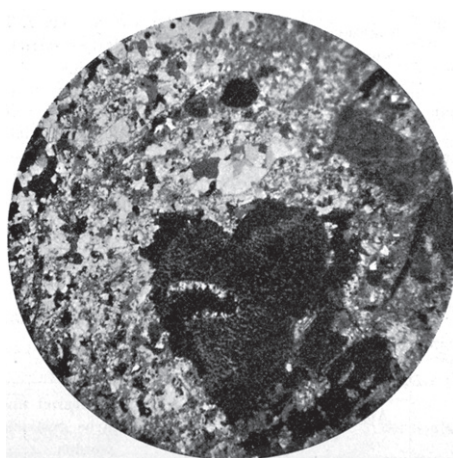


Fig. I.9. Grès coquilliers, agrandissement 6x [Niggli, P. 1915]

3.1.4. Calcaires arénacés et grès du Flysch

Ces deux types de roches proviennent de deux unités distinctes, mais leur composition et caractéristiques sont semblables. Les calcaires arénacés, appelés aussi "grès du type Appenzell" [Niggli, P. 1915] appartiennent à la Molasse d'eau douce inférieure et ils figurent à cause de cela dans la catégorie des grès. Les gisements se trouvent dans la partie orientale du Plateau. Les grès du flysch appartiennent, par contre, à l'Ultra-Helvétique. Les gisements se concentrent dans la marge septentrionale entre les Alpes et le Plateau.

La composition est semblable à celle des autres types de grès. La glauconite est rare ou absente. La teneur en carbonate de calcium est élevée dans le cas des calcaires arénacés et réduite pour les grès du Flysch.

Les grains sont anguleux, de forme complexe et leur dimension varie, en moyenne, entre 0,5 et 1 mm.

La liaison entre les grains est formée par de la calcite microcristalline à mésocristalline, qui remplit tous les espaces, et qui se couple à des liaisons siliceuses entre les grains. Dans le cas des grès du

flysch, les liaisons siliceuses sont dominantes.

La porosité est absente ou très réduite.

La résistance aux agents atmosphériques est de bonne à très bonne, et de même celle à l'abrasion, ce qui explique une utilisation préférentielle comme pierre de pavage.

3.2. Les brèches et conglomérats

Sous ces différents noms, on trouve des roches classifiées selon la dimension de leurs constituants et du ciment qui les lie. Dans le cas des brèches, la dimension des éléments est, pour plus de la moitié des cas, supérieure à 2 mm [Foucault, A., Raoult, J.-F. 1988:50]. Le terme conglomérat comprend aussi les brèches sédimentaires, jusqu'aux poudingues [*ibid*].

Les types de plus grand intérêt dans la construction sont les brèches quartzieuses du Verrucano et les conglomérats ou Nagelfluh. Il faut noter que l'exploitation est actuellement très réduite.

Les brèches calcaires d'Arzo, dans le sud du Tessin, seront traitées avec les calcaires.

3.2.1. Brèches quartzieuses du Verrucano

Les brèches quartzieuses du Verrucano sont d'époque Triasique.

Les brèches quartziques, comme le nom l'indique, sont riches en quartz, surtout sous forme cataclastique, les plagioclases sont absents. Des débris de roches quartziques sont présents. Les grains sont de dimensions variables, jusqu'à grosses.

Le liant des grains est constitué par un ciment siliceux, formé par du quartz et de la séricite. La calcite est présente comme liant seulement dans certains types, comme celui de "Mels pierre meulière" [Niggli, P. 1915]. Les vides sont absents.

La porosité est réduite. La stratification est présente seulement dans les brèches quartziques de Mels.

La résistance aux agents atmosphériques et à l'abrasion est bonne, vu les éléments constitutifs.

3.2.2. Conglomérats (Nagelfluh)

Ces conglomérats du Tertiaire, appelés Nagelfluh dans le Plateau, sont répandus surtout dans la région du Rigi et dans le canton d'Appenzell.

Ils présentent des compositions très variables et leurs caractéristiques sont semblables à celles des brèches quartzieuses susmentionnées.

3.3. Les calcaires

Les calcaires appartiennent aux roches sédimentaires biogènes carbonatées. La composante principale est la calcite à laquelle s'ajoute de la dolomite et, souvent, des fossiles de différents organismes vivants marins ou terrestres.

En Suisse, les principaux gisements se situent dans le Jura et dans la région septentrionale des Alpes, où l'on trouve les calcaires alpins et les types siliceux. Dans différentes régions, on a aussi des gisements, de taille différente, de tufs calcaires.

Les calcaires clairs du Jura sont surtout d'âge Jurassique (Malm) et du Crétacé. Dans la partie occidentale du Jura, on trouve souvent des calcaires du Séquanien, plus anciens, qui sont parfois des calcaires oolithiques et qui présentent des dépôts d'argile. Les calcaires du Kimmerdgien sont présents dans la plus grande partie du Jura. Dans la partie occidentale affleurent aussi des roches plus jeunes qui datent du Portlandien. Les calcaires du Crétacé, dans le Jura, sont de l'Hauterivien, leur structure est plus poreuse et les gisements se trouvent dans la région de Neuchâtel.

Les calcaires alpins et du flysch remontent surtout à l'Eocène. Ceux du Trias sont de moindre qualité par rapport aux autres, ils sont donc rarement exploités.

La résistance aux agents atmosphériques est généralement bonne, mais, à cause du haut contenu en calcium, ces calcaires sont sensibles aux attaques des acides. Il faut noter que la variation à l'intérieur d'un même banc est très grande et donc les caractéristiques doivent être déterminées dans chacun des cas particuliers.

Par rapport à l'ouvrage "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz" [Niggli, P. 1915], on ne traite pas dans la catégorie des calcaires les marbres, qui seront décrits dans une catégorie à part, et les calcaires arénacés, qui ont été évoqués dans la catégorie des grès.

La classification choisie pour les roches calcaires est la même que celle utilisée dans le sous-chapitre "Composition et caractéristiques des roches" (I.1.2.2), ci-dessus, et elle utilise comme discriminant le milieu de sédimentation [Parriaux, A., 2006:280-283]. Ce principe diffère sensiblement de celui adopté par la plupart des sources historiques, lesquelles mélangent généralement le milieu de sédimentation avec la dimension des cristaux formant les différents calcaires. Il a été nécessaire de se baser sur les analyses pétrographiques et géologiques des roches calcaires suisses contenues dans "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz" [Niggli, P., 1915] et "Die nutzbaren Gesteine der Schweiz" [de Quervain, F. 1969] afin de pouvoir introduire la classification choisie.

Il faut préciser que, selon les sources consultées, on trouve rarement en Suisse des formes pures de calcaires contenant des fossiles. En effet la plupart des calcaires récifaux, spathiques et oolithiques, contiennent d'autres traces fossiles. L'appartenance à une catégorie est déterminée par la composante principale.

3.3.1. Calcaires récifaux (ou construits)

À ce groupe appartiennent les calcaires exploités dans la région de Neuchâtel, de Schaffhouse et de la Lägern. Ce sont là les plus importants lieux d'exploitation historiques, dont survivent surtout ceux situés à l'est.

La structure compacte est formée par de la calcite micro- à cryptocristalline. On trouve des traces de coraux, de mollusques, d'algues et d'organismes tels les Foraminifères.

La porosité est généralement faible, mais elle dépend des types de fossiles.

Grâce à la haute teneur en calcium, sous forme de calcite cristalline et de carbonate de calcium issu des fossiles, la résistance mécanique est élevée, de même pour la résistance aux agents atmosphériques, sauf dans le cas des attaques acides.

3.3.2. Calcaires spathiques (sparitiques ou à échinodermes)

Dans ce groupe, on trouve des calcaires provenant des mêmes régions que pour la catégorie susmentionnée, de la région lémanique du Mont d'Arvel, de Villeneuve, de Mendrisio, dans le Sud du Tessin, et les calcaires à spiraloides de la région de Soleure. Ces roches sont constituées en majorité par des squelettes d'échinodermes sous forme de cristaux de calcite.

La composante principale est la calcite microcristalline. Dans cette masse compacte peuvent apparaître des cristaux plus gros. La présence de pyrite produit des plages colorées. La porosité est nulle ou très réduite. Les calcaires de ce type ont généralement une bonne résistance aux agents atmosphériques.

3.3.3. Calcaires oolithiques

À ce groupe appartient la deuxième moitié des calcaires exploités en Suisse surtout dans le Jura, par exemple ceux de Laufen et une partie de ceux de Neuchâtel, ou encore dans la région de Collombey.

Dans le cas des calcaires micro-oolithiques, les oolithes ont une taille inférieure à 1 mm. Si elle est supérieure à 1 mm, on se trouve généralement face à des calcaires macro-oolithiques, dans lesquels la taille des oolithes peut varier de 0,5 à 3 mm [Niggli, P., 1915]. La forme des oolithes varie de sphérique à elliptique, leur structure étant radiale.

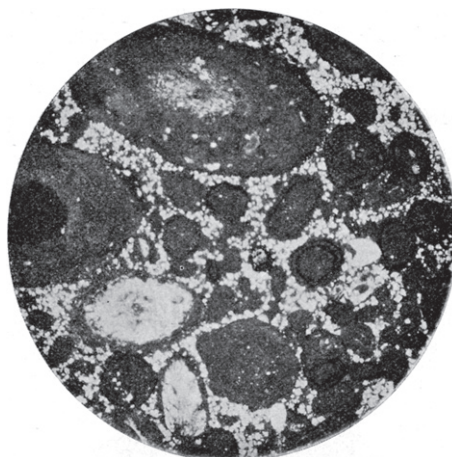


Fig. I.10. Calcaire oolithique de Laufen, agrandissement 6x [Niggli, P. 1915]

Les calcaires oolithiques purs sont presque absents, on y trouve toujours des traces de fossiles, surtout des Echinodermes et des Foraminifères, de cristaux de quartz, de pyrite et parfois de limons dans les fissures.

La structure compacte est formée par une masse de calcite micro- à cryptocristalline qui enveloppe les oolithes. Les liaisons entre les oolithes sont assurées par des minces couches de calcite. Les variations entre les différents types de calcaires sont au niveau de l'agrégation des oolithes et de la texture de la masse de calcite.

La porosité est nulle.

La résistance aux agents atmosphériques est de bonne jusqu'à très bonne, sauf dans les cas où des fissures sont présentes.

3.3.4. Calcaires siliceux

À cette famille appartiennent les calcaires exploités dans les Alpes Centrales des Nappes Helvétiques, et qui datent du Crétacé inférieur, surtout Hauterivien et Valanginien.

Les gisements se trouvent dans la zone du Lac de Brienz, du Lac de Thoune et de la vallée de Kander, dans le canton de Berne. Les plus connus sont ceux de Sevelen, Weesen, Emmeten, Hergiswil et Ringgenberg.

La silice est présente comme cristal de quartz ou comme liant dans la masse. Sa teneur varie entre quelques pourcents et 20%. La calcite est présente dans la masse brunâtre de micro- à cryptocristalline ou sous la forme de gros rhomboèdres incolores. Il y a parfois des insertions sous forme de cristaux de pyrite, de glauconite et de fossiles.

La structure est très dense.

La porosité est nulle.

La haute teneur en silice produit une résistance élevée à l'abrasion et aux agents atmosphériques, pour cela ils sont souvent utilisés pour les pavages.

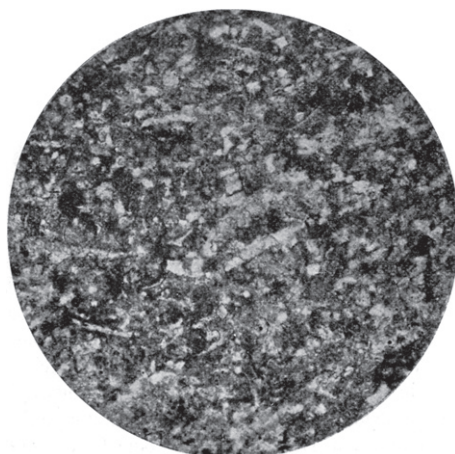


Fig. I.11. Calcaire siliceux de Weesen, agrandissement 27,5x [Niggli, P. 1915]

3.3.5. Tufs calcaires

Les tufs calcaires sont produits par le dépôt de calcium contenu dans les eaux d'infiltration.

Les gisements principaux, qui ne sont pratiquement plus exploités de nos jours, se situent dans le Toggenburg, à Corpataux (FR), Lenzerheide, Surava (GR) et Büren bei Oberdorf (NW). L'épaisseur de ces gisements est en général réduite, et ils se trouvent proches de la surface.

La structure est poreuse, la masse calcaire est constituée de calcite micro- à cryptocristalline, et souvent on y reconnaît des traces de fossiles de végétaux.

La porosité est élevée.

La résistance des tufs calcaires est bonne, en dépit de leur porosité, et elle augmente dans le temps, vu

que les tufs ont tendance à durcir à l'air. Dans la mise en œuvre, il faut veiller à éviter toute remontée d'eau.

3.3.6. *Les roches calcaires d'Arzo*

On traite de façon indépendante ces roches parce qu'elles appartiennent à des familles particulières de roches sédimentaires biogènes. Les noms commerciaux utilisés désignent des groupes de roches qui ont des caractéristiques semblables plutôt que des types précis de roches [Wiedenmayer, F. 1963:586]. Le type connu sous le nom commercial de "Broccatello" est un calcaire bioclastique [Labhart, T., Thierstein, F. 1987] ou biohermal [Wiedenmayer, F. 1963:586], celui appelé "Macchiavecchia" une brèche calcaire. Les deux remontent au Lias inférieur du Sudalpin [Labhart, T., Thierstein, F. 1987]. Le "Rosso di Arzo" est un calcaire récifal appartenant au groupe dit du "Calcaire de Besazio" et il remonte au Lias moyen [Wiedenmayer, F. 1963:600-601]. Ces roches sont connues sous le nom de "marbres", ce qui est faux d'un point de vue pétrographique parce que ce ne sont pas des roches métamorphiques.

Le type "Broccatello" possède une structure formée par des fines particules, une couleur de base rouge brunâtre avec, parfois, des plages jaunes ou grises et des fossiles sous forme de coquillages.

Le type "Macchiavecchia" ou "Macchia Vecchia" est caractérisé par sa structure de brèche avec des insertions de taille variable entre le millimètre et le décimètre. La masse est de couleur rouge ou jaune et les insertions ont des couleurs très variables, du gris brunâtre au jaune, du vert au violet.

Le type "Rosso di Arzo" a une structure plus homogène du "Broccatello", dont la masse assez compacte est de couleur rougeâtre et où sont contenus des fossiles de Crinoïdes et de Brachiopodes.

3.4. Les marbres

Les seuls vrais marbres exploités en Suisse actuellement se trouvent dans le canton du Tessin dont les roches de départ sont des sédiments mésozoïques. Ces gisements affleurent le long de la Ligne Insubrienne, dans le cas du marbre de Castione, et dans la zone de contact entre les nappes Penniques et le Massif du Gothard, pour le marbre de Peccia [Pro Naturstein, éd. 2002:10].

Ces marbres alpins, de couleur claire et de structure compacte possèdent de très bonnes qualités mécaniques et de résistance aux agents atmosphériques. Leur utilisation est surtout comme pierre de revêtement ou, dans le cas du marbre de Peccia, pour la sculpture.

3.4.1. *Marbre de Castione*

Le gisement de marbre de Castione affleure le long de la Ligne Insubrienne à Castione, au nord de Bellinzona dans le canton du Tessin. Le gisement, d'une taille d'environ 800 m à Castione, dans la direction est-ouest, se trouve entre la nappe du Simano, au nord, et celle de la Cima Lunga, au sud. À l'intérieur de ce gisement, on trouve des marbres de grains fins à grossier, des calcaires marmorisés jusqu'à des roches calcsilicatées métamorphisées.

Le marbre de Castione, ou Castione clair, provient de la zone méridionale du gisement. Sa structure de grain variable est souvent siliceuse. On trouve aussi des cristaux de diopside, foncés, et des micas foncés, surtout des phlogopites.

La couleur de base est gris clair avec des stries plus foncées.

Dans la partie centrale du gisement, au nord de la carrière du marbre gris, on exploite le "Castione nero", appelé aussi parfois "Marmo nero" qui est en vérité une roche calcsilicatée [de Quervain, F. 1969:141-142]. Dans une matrice de base formée par du calcaire spathique, on trouve du quartz, du feldspath (plagioclase), de la scapolite, de la diopside, de la biotite et les caractéristiques grenats de taille variable entre 2 et 10 mm.

La couleur est gris foncé avec des plages brunes et vertes.

Probablement la roche de départ était une marne sableuse [Pro Naturstein, éd. 2001:19].

3.4.2. *Marbre de Peccia*

Les marbres de Peccia, au pluriel vu la richesse chromatique des roches, proviennent d'un gros gisement de roches métamorphisées carbonatées, qui remontent au Trias.

Le marbre est cristallin et de grain grossier, mais de taille assez constante. Les incorporations d'autres minéraux ne sont pas toujours présentes, et se composent de cristaux de quartz, de biotite, de chlorite et d'autres minéraux silicatés. La quantité et la structure de ces composantes additionnelles produisent les différents types de bandes qui distinguent chaque type de marbre.

La couleur est très variable et passe du blanc pur aux tons striés de gris, de brun et de vert [Pro Naturstein, éd. 2002:10-11].

3.5. Les schistes³

On regroupe dans cette famille les roches métamorphiques des séquences pélitique (schistes ardoisiers, chloritoschistes, micaschistes) et calcaro-pélitique (calcschistes) [Parriaux, A. 2006:408-409; Foucault, A., Raoult, J.-F. 1988:201; de Quervain, F. 1969:111-115]. Les schistes sont des roches qui ont acquis une schistosité sous l'effet de contraintes tectoniques, et, selon l'intensité du métamorphisme, on passe des schistes ardoisiers à des schistes dans lesquels la cristallisation des micas est plus marquée. Les feldspaths, par contre, sont absents.

Historiquement, ces roches ont été utilisées pour la production de tableaux noirs ou comme matériaux de couverture pour les toitures.

En Suisse, les gisements les plus importants sont ceux du Carbonifère et du Jurassique dans le canton du Valais et ceux du Flysch (Tertiaire) dans les cantons de Glaris et de St-Gall. Des gisements accessibles de micaschistes se trouvent dans la vallée d'Airolo, dans le canton du Tessin, et dans le Fextal, au canton des Grisons.

La composition est assez variable, mais on trouve toujours du quartz; des micas, séricite, chlorite verte, biotite brune; de l'argile, plus ou moins métamorphisée; de la calcite et du charbon ou du graphite, dans les types foncés.

La structure des schistes varie entre très fine à grossière, et, dans cette dernière, on a des insertions de cristaux lenticulaires. Elle est toujours schisteuse. On distingue les différents types selon la structure qui apparaît lors de la cassure, selon un autre plan que celui de clivage.

3. Il faut bien noter que dans la littérature de langue allemande les termes "Schiefer" et "Phyllite" sont souvent utilisés comme synonymes, "Phyllite" signifie aussi "séricoschiste".

On distingue, en Suisse, les types suivants de schistes: les schistes ardoisiers, produits par un métamorphisme léger, de couleur gris à noir; les séricitoschistes, dans lesquelles la Séricite est abondante, un mica embryonnaire, de couleur gris clair, violet ou rouge; les chloritoschistes, dont la couleur gris-vert est donnée par l'abondance de Chlorite; les calcschistes, dont la teneur en calcite est élevée, la roche d'origine étant une marne, de couleur gris, et les micaschistes, composés de quartz cristallin et de micas (Biotite et Muscovite), des traces de phyllosilicates peuvent être présentes, souvent de la Chlorite de couleur verte.

La structure de la roche influence sa résistance aux agents atmosphériques: la richesse en micas détermine une meilleure imperméabilité, comme dans le cas de la présence d'une structure lenticulaire par rapport à une fine, et la richesse en quartz augmente la résistance des schistes par rapport à ceux qui sont riches en calcite.

3.6. Les granites

Les granites sont des roches plutoniques formées essentiellement par du quartz cristallin; de l'orthoclase; des micas, muscovite et biotite, et parfois de la hornblende.

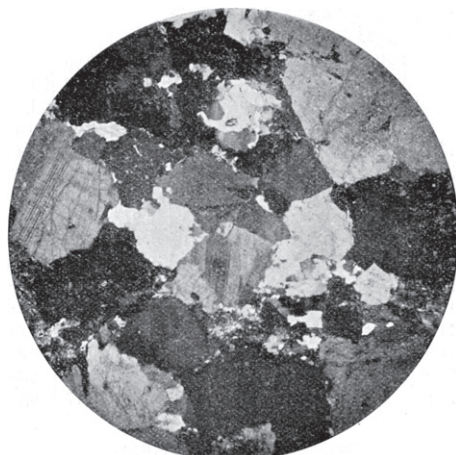


Fig. I.12. Granite à biotite, agrandissement 6x [Niggli, P. 1915]

Les gisements de granites se trouvent en Suisse dans les Alpes, ce qui les rend d'accès très difficile, voir impossible dans certains cas. L'exploitation des granites a donc toujours été limitée et souvent l'on exploitait des blocs isolés, surtout dans le Plateau. C'était le cas, par exemple, pour les blocs erratiques de granite du Mont-Blanc, exploités de manière intensive jusqu'à la moitié du XXe siècle, dans une zone comprise entre les communes de Conthey, Collombex et Monthey, au Canton du Valais [Bollin, R. 1996:57; de Quervain, F. 1969:70-71]. Les blocs erratiques de grandes dimensions, permettait d'extraire, autour de 1890, 5'000 à 6'000 tonnes de granite par année [Bollin, R. 1996:57] qui étaient, par la suite, acheminées vers les villes de la Suisse romande pour la réalisation de bordures de trottoir, marches d'escalier, mais aussi d'éléments architecturaux. Les seuls gisements accessibles, et qui ont subi une importante exploitation, sont ceux des vallées de la Reuss et de l'Aar dans le canton d'Uri, des environs du Col du Grimsel, UR, et de Campascio, GR. Il subsiste un malentendu sur la dénomination des gneiss du Tessin et des Grisons qui furent appelés, surtout au XIXe siècle, "granits".

Les granites exploités dans le canton d'Uri appartiennent aux granites centraux du Massif de l'Aar.

Celui qui est exploité dans les Grisons près de Campascio appartient à la Nappe Bernina.

La structure est compacte et massive, formée par des cristaux de grain moyen à grossier. Parfois une légère schistosité peut apparaître, de même une variation de la taille des cristaux, qui sont à imputer à des transformations subies par la roche pendant les différents accidents tectoniques.

Les qualités techniques sont excellentes comme la résistance aux agents atmosphériques, le seul risque est celui d'une possible altération des feldspaths en kaolin.

3.7. Les gneiss

Les gneiss sont des roches métamorphiques appartenants à la séquence pélitique, gneiss para-, ou à la séquence quartzo-feldspathique, gneiss ortho-. La détermination pétrographique précise des gneiss, dans le cas suisse, est souvent difficile.

Les gneiss alpins constituent aujourd'hui la majorité des pierres naturelles exploitées en Suisse. Cela à cause des gisements Penniques du nord du canton du Tessin et à ceux des Grisons. Il existe aussi un gisement exploité dans le canton du Valais, dans la zone d'Oberwald et de Gletsch.

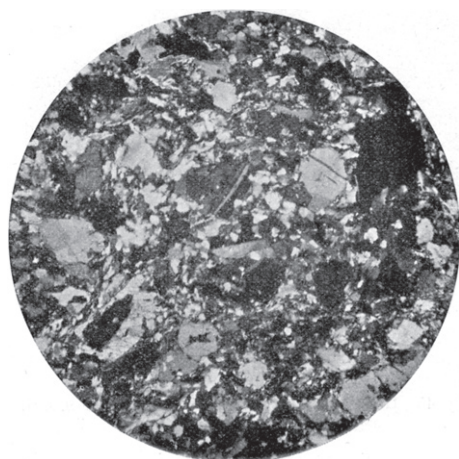


Fig. I.13. Gneiss San Bernardino, agrandissement 6x [Niggli, P. 1915]



Fig. I.14. Gneiss à structure foliée, agrandissement 6x [Niggli, P. 1915]

Les gneiss des Nappes Penniques du Tessin se divisent en deux familles principales: ceux de l'unité Leventina de la vallée du fleuve Tessin au nord de Bellinzona (Valle Riviera, Leventina et Blenio) et ceux des Nappes Simano et Antigorio des vallées au nord de Locarno (Valle Maggia, Verzasca et Onsernone). On exploite aussi des gneiss dans la Valle Calcanca, une vallée de la partie italophone du canton des Grisons⁴.

Les gneiss des Grisons ont été appelés pendant longtemps "quartzite des Grisons", mais leur origine pétrographique précise est celle des gneiss. Ils appartiennent, comme les précédents, aux Nappes Penniques, en particulier aux Nappes Adula, Suretta et Tambo. Les principaux gisements exploités se trouvent à Andeer, dans la région du Bergell près de Soglio et Promontogno, dans la région de Hinterrhein et dans la vallée de Vals.

4. Pour un exposé plus détaillé à propos des différents types de gneiss exploités au Tessin, voir, en particulier, le fascicule publié par la Pro Naturstein [Pro Naturstein, éd. 2002]. Une partie de cet article a été résumée et traduite en français, dans: Zerbi, Stefano, *La Via della Pietra. 1. Un parcours dans les vallées de pierre*, Rapport final du Projet de Master, Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006, 91 p. (une copie est consultable à la Bibliothèque de l'EPFL de Lausanne).

La structure foliée est caractéristique: le quartz et les feldspath sont présents comme cristaux de forme ocellée; les micas, biotite, muscovite, séricite, fucsite, phengite, sont disposés selon des plans qui s'alternent aux précédents. Les différents degrés de foliation, produits par une variation de l'intensité du métamorphisme, produisent un plan de clivage plus ou moins net. De cela dépend la possibilité d'une cassure en plaques plus ou moins minces.

Dans le cas des gneiss du Tessin, la variation la plus importante au niveau de la structure est constituée par la présence des micas: on passe de gneiss à un seul mica, la biotite noire des gneiss de la Valle Verzasca, à des gneiss à deux micas, biotite et muscovite, de la région des Tre Valli. Un gisement particulier se trouve à l'embouchure de la Valle di Blenio et il est constitué par un gneiss ocellé de la Nappe Simano.

De même pour les gneiss des Grisons où on constate l'absence de micas foncés, comme la biotite, qui sont substituées soit par les micas clairs, Muscovite et Séricite, soit par les micas verdâtres, Fucsite et Phengite, ce qui donne à ces roches leur couleur caractéristique.

Comme dans le cas des granites alpins, les gneiss alpins suisses sont d'excellentes pierres de construction. Leur résistance aux agents atmosphériques est élevée, les seules sources de dommages peuvent être constituées par la présence de pyrite et par l'altération des feldspaths, surtout la kaolinisation.

3.8. Les amphibolites et serpentinites

Ces roches métamorphiques appartiennent à la séquence mafique, amphibolite, et à la séquence ultra-mafique. Les roches de départ étant des roches magmatiques mafiques, gabbro, à ultra-mafiques, péridotites.

En Suisse, on trouve des gisements de ces pierres dans les nappes alpines internes, ce qui les rend, comme dans le cas des granites, souvent d'accès difficile. Les gisements d'amphibolites sont éparpillés: Airola, Vaglio, dans le canton du Tessin, et dans des vallées d'accès difficile dans les cantons d'Uri et des Grisons. Les gisements de serpentinites sont présents surtout dans le Canton d'Uri et dans celui des Grisons.

Les amphibolites se composent de feldspaths, de plagioclases, riches en chaux, et de lits d'Amphiboles, comme la Hornblende. La structure est rubanée. Grâce à leur structure compacte et leur dureté superficielle, elles ont souvent été utilisées comme pierre de pavage.

Les serpentinites et la pierre ollaire, qui sont très proches [Kündig, R., éd. 1997:242], sont des roches dans lesquelles le quartz est rare ou absent. Leur structure principale est formée par de fines fibres voire de fines lamelles de minéraux de serpentinite (Antigorite, Chrysotile, Lizardite) qui s'accompagnent de composantes plus dures (Olivine, Magnetite) ou plus tendres (Chlorite, Talc). Un plus haut contenu en talc est caractéristique des pierres ollaires [de Quervain, F. 1969:102].

La pierre ollaire est tendre et facile à travailler, elle possède aussi une bonne capacité thermique, les serpentinites sont par contre des roches d'aspect plus attrayant, mais elles ne sont que peu exploitées en Suisse.

Les principaux gisements de pierre ollaire se trouvent éparpillés le long de l'arc alpin, ceux qui ont encore une certaine importance se trouvent surtout dans le nord du canton du Valais, dans la région

d'Ulrichen et du Col du Nufenen, dans le canton d'Uri, dans les environs de Hospenthal⁵.

Les gisements de serpentinites se trouvent aussi dans le canton du Valais, dans la Vallée de Goms, dans le canton d'Uri, vallées de Hospenthal et Disentis, et dans le canton des Grisons, dans la Valle Poschiavo. Ces derniers appartiennent à un bras du corps Malenco.

4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES ROCHES SUISSES

4.1. Introduction

Pour déterminer les caractéristiques techniques des pierres naturelles employées dans la construction, on réalise des essais de différentes natures. Les résultats de ces essais permettent de comparer les caractéristiques d'un même type de roche, selon sa provenance, ou de roches différentes, et de déterminer leur aptitude à un certain type d'utilisation. Pour cela il est important de réaliser ces essais de façon normalisée et reproductible. En ce qui concerne l'Europe, les nouvelles normes EN permettent une standardisation dans les essais. Ceux déjà effectués en Suisse faisaient référence, généralement, aux normes allemandes DIN.

Autre condition fondamentale pour que ces données soient utilisables est que les essais soient réalisés de manière cyclique afin de témoigner de l'évolution dans la qualité des roches extraites. Dans le cas des roches utilisées pour les granulats, on dispose généralement de données récentes vu les assez strictes exigences auxquelles ce type de produit est soumis, surtout dans la fabrication des bétons et des enrobés. Dans le cas des pierres naturelles, les données sont plus ou moins récentes selon les carrières et les types de roches. Les nouvelles utilisations demandent, parfois, des nouvelles données, comme dans le cas de la résistance à la traction qui est une donnée essentielle pour les pierres utilisées en plaques minces pour le revêtement des façades ventilées.

La dernière série d'essais faite à l'échelle nationale est celle commencée en 1904 à l'*Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich* et qui avait abouti dans la publication des fiches contenues dans le déjà cité "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz" [Niggli, P. 1915]. Il est intéressant de noter que déjà à cette époque le nombre d'essais était inférieur à celui des carrières recensées (289 contre 763 [*ibid*:347]) à cause du fait que nombre de carriers n'avaient pas envoyé l'échantillon de roche requis, de dimension 0,12x0,10x1 m [*ibid*:71]. Depuis cette époque, les essais sont de la compétence de chaque carrière, ce qui produit un manque de données récentes pour certains types de roches. On se référera souvent aux données de 1915 pour esquisser les profils de chaque famille de roches, pour le type précis de roche on essayera de se référer à des données plus récentes.

On a deux types principaux de données qui concernent les pierres naturelles: les données techniques mesurables selon des essais standardisés, tels la masse spécifique, la résistance à compression et à traction, le module d'élasticité, le coefficient d'absorption d'eau, la porosité, la gélivité et les données qualitatives qui influencent la durabilité de la pierre, en particulier la résistance aux agents atmosphériques. Cette dernière caractéristique, déterminante dans les utilisations liées à la construction, est la plus difficile à mesurer et ses résultats sont souvent critiqués. La composantetemporelle, d'un côté, et des conditions très variables comme le climat, l'exposition, la mise en œuvre, etc., de l'autre, permettent d'affirmer, en accord avec plusieurs sources consultées, que

5. Pour une description plus précise des gisements et de leur exploitation, voir: [de Quervain, F. 1969:105-108].

la connaissance et l'observation directe des pierres en œuvre, ainsi que l'expérience professionnelle des carriers et des tailleurs de pierre, sont encore la meilleure manière de pouvoir juger de la durabilité d'une pierre. La même observation est valable pour la gélimité, laquelle, même si elle est déterminée par un essai standardisé, donne des résultats qui peuvent souvent s'écarter de la réalité. En effet, trop de variables devraient être prises en compte, rendant l'essai expérimental impossible. On essaiera donc d'intégrer ces observations aux données fournies par les carrières et les normes.

Les chiffres reportés ci-dessous sont des valeurs moyennes provenant surtout des essais de 1915, les seuls qui permettent de réaliser de telles approximations, vu le nombre de résultats à disposition. Elles sont classifiées selon le type d'essais et ensuite par les principales familles de roches, comme nous l'avons exposé dans la description pétrographique des roches suisses.

4.2. Masse volumique et porosité

On regroupe ces données ensemble, conformément à la norme EN 1936⁶ "Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale" (Anciennement DIN 52 102).

La masse volumique apparente est le rapport entre la masse, en kilogrammes, de l'échantillon sec et son volume apparent (volume délimité par la surface extérieure, en m³)⁷. La masse volumique réelle, ou solide, est le rapport entre la masse de l'échantillon sec et le volume réel de sa partie solide (en m³). L'écart entre la valeur de la masse volumique apparente et réelle nous renseigne sur la porosité de la roche.

La porosité ouverte est le rapport, en pourcentage, entre le volume des pores ouverts, donc en contact avec l'extérieur, et le volume apparent de l'échantillon. La porosité totale est le rapport entre le volume total des pores ouverts et fermés, donc internes à la roche, et le volume apparent de l'échantillon.

Valeurs moyennes de la masse volumique réelle (densité) et apparente (masse volumique) et de la porosité totale (porosité absolue) et ouverte (porosité apparente) selon les essais de 1915 [Niggli, P. 1915:73].

Type de pierre	Masse volumique réelle t/m ³	Masse volumique apparente t/m ³	Porosité totale %	Porosité ouverte %
Pierres cristallines	2,63 – 2,94	2,52 – 2,83	0,70 – 6,70	0,44 – 2,58
Pierres calcaires	2,65 – 2,84	2,03 – 2,75	0,36 – 25,64	0,11 – 22,51
Grès	2,64 – 2,76	2,09 – 2,73	0,36 – 22,14	0,38 – 19,30

Les écarts très importants, surtout dans les valeurs de la porosité, sont dus aux nombres limités d'essais et aux conditions d'essai de l'époque.

6. Pour la nomenclature des normes européennes, on s'est basé sur les françaises, disponibles auprès de l'Association Française de Normalisation: <http://www.afnor.org>, consulté le 23.08.2010.

7. Pour les définitions des différentes caractéristiques techniques, on s'est référé au chapitre "Le pietre naturali. Fondamenti. Caratteristiche e proprietà" dans: [Di Sivo, M. 2004:84-105].

Les valeurs d'ensemble, plus récentes, datent de 1996, mais leurs sources sont variées et non spécifiées [Kündig, R., éd. 1997:247 et 255]. Dans le tableau n'apparaissent que les valeurs de la masse volumique réelle (densité) et de la porosité totale. Dans ce cas, les valeurs se réfèrent à des catégories de roches moins générales que celles de 1915.

Type de pierre	Masse volumique réelle t/m ³	Porosité totale %Vol.
Granites	2,6 - 2,8	0,4 - 1,5
Diorite, Syénite, Gabbro	2,7 - 3,0	0,5 - 1,5
Rhyolite	2,4 - 2,8	0,5 - 2,0
Andesite, Dasite	2,5 - 2,8	0,4 - 1,6
Trachite, Tuf volcanique	1,6 - 2,2	10 - 30
Basalte	2,9 - 3,1	0,2 - 0,9
Calcaire, Dolomie	2,6 - 2,8	0,6 - 2,0
Travertin, Tuf calcaire	1,7 - 2,5	2 - 25
Calcaire léger	1,5 - 2,0	5 - 25
Grès	2,0 - 2,6	1 - 25
Grès calcaire	2,0 - 2,6	2 - 20
Brèche, Conglomérat	2,4 - 2,6	0,5 - 5
Gneiss	2,5 - 2,8	0,4 - 2,0
Quartzite	2,6 - 2,7	0,4 - 2,0
Micaschiste, schiste ardoisier	2,5 - 2,7	0,6 - 3,0
Serpentinite	2,6 - 2,75	0,3 - 2,0
Marbre	2,5 - 2,7	0,3 - 0,8

La connaissance de la valeur de la porosité d'une roche est très importante pour son utilisation dans la construction, du fait que celle-ci nous renseigne sur son comportement vis-à-vis de l'eau, qui est l'une des principales sources, directes ou indirectes, d'altération.

Pour mieux comprendre cela, il est nécessaire de préciser quelques autres notions liées à la porosité. Tout d'abord, l'existence de différentes types de porosité, déjà cités, c'est-à-dire la porosité ouverte, ou connectée, qui est constituée par des pores communiquant les uns avec les autres, et la porosité piégée, ou occluse, dont les pores sont isolés à l'intérieur de la roche. Ces derniers ne sont pas concernés par les échanges de vapeur d'eau ou d'eau à l'état liquide entre la roche et son environnement. La dimension des pores est aussi un paramètre important: la limite entre micro- et macro-porosité est, en général, assumée à 7,5 μm [Rousset, B. 2009]. Ceci parce que la dimension des pores détermine leur comportement capillaire. Le coefficient de Hirschwald, ou coefficient de saturation capillaire, exprime, en pourcentage, le rapport entre la porosité ouverte et la porosité totale. Une valeur faible de coefficient de Hirschwald signifie que la roche possède un grand nombre de pores piégés. Le coefficient du Hirschwald est utilisé, dans la pratique, comme indicateur de la résistance au gel d'une roche: si ce coefficient est mineur de 75%, on considère la roche comme peu sensible au gel. Ceci du fait qu'elle accumulera dans ses pores peu d'eau qui va dilater lors de son passage à l'état solide, ce qui peut entraîner des altérations à la structure de la roche. Toute roche présentant un coefficient majeur de 85% est, par contre, retenue gélive.

Une dernière considération autour de la porosité concerne la cinétique des échanges capillaires. Ceux-ci sont à différencier en deux valeurs: la capillarité linéaire, c'est-à-dire la vitesse avec laquelle la frange capillaire progresse dans la roche, et la cinétique massique qui exprime l'augmentation de la quantité d'eau, en masse, à l'intérieur de la roche et donc son degré de saturation. Selon la structure de la roche ces deux phénomènes ne sont pas directement liés, ce qui signifie qu'à une roche poreuse

correspondra une grande capillarité linéaire, l'eau progressant vite à son intérieur, mais, si cette même roche possède une grande porosité piégée, la quantité d'eau à son intérieur restera en tout cas faible. Ce qui détermine, par exemple, une sensibilité réduite au gel de cette roche, par rapport à une moine poreuse, mais dont la majorité des pores sont ouverts et dont la cinétique massique est, par conséquent, élevée.

4.3. Résistance mécanique: compression, traction et module d'élasticité⁸

Les valeurs de la résistance à la compression des essais de 1915 ont été recueillies en trois tableaux [Niggli, P. 1915:76-77] et résumées dans des écarts selon les mêmes familles de roches que ceux du point précédent [*ibid*:82-83]. Pour les roches sédimentaires, on avait indiqué aussi la porosité moyenne. Les données se réfèrent à la résistance à la compression perpendiculaire au plan de stratification ou de clivage.

Pour les grès, on constate une augmentation de la résistance en fonction de la diminution de la porosité. Deux tiers des échantillons présentaient une résistance inférieure à 100 N/mm² (dans l'ouvrage l'unité de mesure est le kg/cm²) pour une porosité totale supérieure à 7,5%. Un sixième des échantillons appartenait à des grès durs, leur résistance à la compression était supérieure à 150 N/mm².

Dans le cas des calcaires, les résultats indiquent une bonne résistance générale à la compression. Seulement un dixième des échantillons avait des valeurs inférieures à 100 N/mm²; 47% entre 100 et 150 N/mm²; 34% entre 150 et 180 N/mm² et 9% supérieur à 180 N/mm². Dans le 90% des échantillons la porosité ouverte était de 2,5%.

Les roches cristallines essayées avaient aussi des bonnes valeurs de résistance à la compression: 7% montraient des valeurs inférieures à 100 N/mm²; 32% de 100 à 150 N/mm²; 43% de 150 à 180 N/mm² et 21% supérieur à 180 N/mm². La porosité ouverte était, en moyenne, inférieure à 2,5% et celle absolue de 2,5 à 5%.

Les essais de résistance à la traction, ou flexion, avaient été réalisés seulement sur des échantillons de roches tessinoises, dans la plupart des cas des gneiss [Niggli, P. 1915:84]. Les valeurs variaient en moyenne de 5 à 8% de celle de la résistance à la compression, seul le marbre de Castione présentait une valeur de 10%. Dans ce même tableau figure aussi la valeur du module d'élasticité.

Les valeurs publiées en 1996 sont plus précises et complètes, mais leurs sources ne sont pas explicites.

Type de pierre	Résistance à compression N/mm ²	Résistance à traction N/mm ²	Module d'élasticité dynamique kN/mm ²
Granites	100 – 270	10 – 40	37 – 72
Diorite, Syénite, Gabbro	80 – 300	10 – 40	50 – 120
Rhyolite	80 – 300	12 – 40	30 – 76
Andesite, Dasite	80 – 250	11 – 40	30 – 70

8. Les normes EN concernées sont: EN 12372 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance à la flexion sous charge centrée"; EN 13161 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance en flexion sous moment constant"; EN 14146 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination du module d'élasticité dynamique (par la mesure de la fréquence de résonance fondamentale)"; EN 14580 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination du module d'élasticité statique"; EN 1926 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance en compression uniaxiale". (Anciennes normes DIN 52 105 pour la résistance à compression et DIN 52 112 pour la résistance à la traction). Une nouvelle valeur très importante dans l'utilisation de la pierre comme matériau de revêtement en plaques minces ancrées est celui déterminé par la norme EN 13364 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de l'effort de rupture au niveau du goujon de l'agrafe" (ancienne norme DIN 18 516).

Type de pierre	Résistance à compression N/mm ²	Résistance à traction N/mm ²	Module d'élasticité dynamique kN/mm ²
Trachite, Tuf volcanique	10 – 100	5 – 20	10 – 40
Basalte	16 – 400	15 – 60	45 – 100
Calcaire, Dolomie	50 – 200	3 – 30	16 – 80
Travertin, Tuf calcaire	10 – 80	3 – 20	10 – 40
Calcaire léger	8 – 25	2 – 8	8 – 20
Grès	40 – 250	7 – 33	12 – 70
Grès calcaire	30 – 180	3 – 18	6 – 32
Brèche, Conglomérat	14 – 160	2 – 12	12 – 55
Gneiss	70 – 200	8 – 45	25 – 65
Quartzite	100 – 300	14 – 60	50 – 75
Micaschiste, schiste ardoisier	50 – 150	8 – 40	20 – 60
Serpentinite	55 – 200	11 – 60	50 – 100
Marbre	40 – 230	10 – 40	65 – 105

4.4. Coefficient d'absorption d'eau

La norme EN 1925 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité" règle l'essai de cette valeur (ancienne norme DIN 52 103). Il existe aussi la norme EN 13755 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de l'absorption d'eau à la pression atmosphérique", qui nous renseigne sur la quantité d'eau qu'une roche absorbe en condition de mise en œuvre, sauf dans le cas de constructions immergées, et de ce fait indirectement sur sa teneur en pores capillaires.

Dans les données de 1915, les moyennes du coefficient d'absorption d'eau figurent dans le même tableau récapitulatif des masses volumiques et des porosités [Niggli, P. 1915:73].

Type de pierre	Coefficient d'absorption d'eau %
Pierres cristallines	0,165 – 0,975
Pierres calcaires	0,04 – 16,80
Grès	0,15 – 9,15

Les valeurs publiées en 1996.

Type de pierre	Coefficient d'absorption d'eau % Vol.
Granites	0,2 – 1,2
Diorite, Syénite, Gabbro	0,5 – 1,2
Rhyolite	0,5 – 1,8
Andesite, Dasite	0,4 – 1,4
Trachite, Tuf volcanique	8 – 25
Basalte	0,1 – 0,5
Calcaire, Dolomie	0,5 – 1,5
Travertin, Tuf calcaire	1,5 – 20
Calcaire léger	5 – 20
Grès	1 – 20
Grès calcaire	1 – 18
Brèche, Conglomérat	0,5 – 4
Gneiss	0,25 – 1,5
Quartzite	0,2 – 1,5
Micaschiste, schiste ardoisier	0,5 – 2,5
Serpentinite	0,18 – 0,25
Marbre	0,2 – 0,5

4.5. Gélivité

L'appréciation de l'aptitude de la roche à résister au gel s'exprime avec la variation de sa résistance à la compression par rapport à celle mesurée sur l'échantillon sec. Normalement l'essai est fait par changement cyclique de température, +20°C/-20°C à des différentes saturations en eau de l'échantillon. Si la variation est supérieure à 25%, la roche est considérée comme gélive [Di Sivo, M. 2004:90]. La norme est la EN 12371 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au gel" (ancienne norme DIN 52 104). Une norme reliée est la EN 14066 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au vieillissement accéléré par choc thermique".

Dans les essais de 1915, les roches avaient été classifiées dans quatre groupes selon le pourcentage de la perte de poids de l'échantillon après avoir été soumis au cycle de gel. Les essais n'avaient pas été réalisés sur les échantillons de roches cristallines, de porosité réduite, sur les roches calcaires de porosité inférieure à 8% et sur les grès de porosité inférieure à 6%. Le tableau ne reporte pas des données moyennes, mais les résultats des essais sur les échantillons [Niggli, P. 1915:89-90]. Les roches les plus résistantes au gel sont celles qui présentent une porosité ouverte réduite, sauf dans le cas des grès coquilliers dans lesquels la dimension des pores est si élevée que les effets de la dilatation de l'eau glacée ne provoquent aucun dommage à la roche.

Dans la publication de 1996, où l'on trouve la description de l'essai de résistance au gel, manque l'appréciation qualitative correspondante.

4.6. Caractéristiques thermiques des roches

4.6.1. Conductivité thermique

Les données concernant la conductivité thermique des roches sont très variables en quantité et qualité. La mesure n'est pas normalisée par les codes européens. De plus, les roches présentent une forte variation de leur structure, ce qui amène à des différences de la conductivité thermique dans un même type de roche d'un facteur de 2 à 3 [Clauser, Ch., Huenges, E. 1995:107.]; ceci est dû aussi à la variation de la composition en minéraux. Pour les roches sédimentaires, c'est surtout la porosité qui détermine la conductivité thermique; il en est de même pour les roches volcaniques. La conductivité thermique des roches plutoniques varie surtout selon leur contenu en feldspath, les roches pauvres en feldspath sont plus conductrices; pour les roches métamorphiques c'est, par contre, le contenu en quartz qui influence la conductivité, les roches riches en quartz présentent des valeurs de conductivité plus élevés [Clauser, Ch., Huenges, E. 1995:108-109.].

Nous allons reporter donc des valeurs issues des différentes sources, sous forme d'intervalles.

Type de pierre	Conductivité thermique λ en W / m K
Roches cristallines	3,5 ¹
Granite	2,8 ¹
Tuf volcanique	0,6-1,7 ²
Basalte	3,5 ¹
Roches sédimentaires	2,3 ¹
Tuf calcaire	0,85-1,7 ⁴

Type de pierre	Conductivité thermique λ en W / m K
Calcaire	2,5 ³
Grès	2,0 ³ -2,3 ¹
Brèche, Conglomérat	2,3 ⁴
Gneiss	1,6 ⁴ -3,5 ⁴
Quartzite	3,5 ⁴
Micaschiste, schiste ardoisier	2,2 ³
Marbre	2,0 ⁴ -3,5 ¹

1: [Documentation SIA D0170 2002]; 2: [Di Sivo, M. 2004]; 3: [Zürcher, C., Frank, T. 2004]; 4: [Zimmermann, A. ed. 2009]

4.6.2. Coefficient de dilatation thermique linéaire

Le coefficient de dilatation thermique linéaire se mesure à l'aide d'essais normalisés contenus dans la norme européenne EN 14581 "Méthodes d'essai des pierres naturelles – Détermination du coefficient linéaire de dilatation thermique". La valeur représente la variation de longueur, en millimètres, par mètres de longueur, suite à une variation de température de 100 degrés [Kündig, R., éd. 1997:211], par rapport à la longueur de l'échantillon à une température de 0°C. Elle est généralement exprimée en $\text{mm } 10^{-3}$ sur mètre par degrés Kelvin. La connaissance de cette valeur est importante pour déterminer la nécessité de prévoir des joints de dilatation dans les maçonneries, mais encore plus pour évaluer le risque de fissuration d'une plaque de façade et en déterminer le type de fixation.

Les valeurs publiées en 1996.

Type de pierre	Dilatation thermique linéaire $\text{mm } 10^{-3} / \text{m K}$
Granites	5-8
Diorite, Syénite, Gabbro	5-8
Rhyolite	6-8
Andesite, Dasite	2-7
Trachite, Tuf volcanique	3-8
Basalte	2-8
Calcaire, Dolomie	4-8
Travertin, Tuf calcaire	4-8
Calcaire léger	-
Grès	8-12
Grès calcaire	8-12
Brèche, Conglomérat	5-8
Gneiss	8-13
Quartzite	5-8
Micaschiste, schiste ardoisier	-
Serpentinite	-
Marbre	5-10

4.7. Résistance aux agents atmosphériques

Cette donnée est une appréciation de la résistance aux agents atmosphériques. Elle est tirée des différentes caractéristiques mécaniques de la roche et de l'observation de cas historiques de mise en oeuvre. Souvent, cette deuxième source, probablement la plus significative pour cette appréciation, n'est pas considérée et l'on obtient donc des valeurs qui sont peu ou pas fiables. En général, la donnée de la résistance aux agents atmosphériques s'exprime par une courte appréciation écrite et non par

une valeur numérique. Dans le cas de l'utilisation d'une roche particulière, l'observation directe des constructions et l'expérience des spécialistes de la pierre sont toujours la meilleure garantie pour la bonne mise en oeuvre. Cela est très important quand on est confronté à des roches tendres et de durabilité réduite: les solutions qu'on peut observer sur les exemples traditionnels et historiques valent plus que toute expérience de laboratoire. Cette démarche subjective, qui était conseillée, entre autres, par Leon Battista Alberti dans le "De rae aedificatoria"⁹, se heurte aujourd'hui au besoin croissant de normalisation. On trouve, par conséquent, dans les normes européennes, toute une série de prescriptions sur des essais de résistance aux intempéries: EN 12370 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance par un essai de cristallisation des sels"; EN 13919 "Méthodes d'essai pour éléments en pierre naturelle – Détermination de la résistance au vieillissement accéléré au SO₂ en présence d'humidité"; EN 14066 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au vieillissement accéléré par choc thermique"; EN 14147 "Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance au vieillissement accéléré au brouillard salin"; EN 14157 "Pierres naturelles – Détermination de la résistance à l'usure" (ancienne norme DIN 52 106 sur la résistance aux agents atmosphériques).

Dans le cadre de cette recherche, on donnera des appréciations générales par familles de roches qui sont tirées des sources déjà citées pour les pierres naturelles suisses. "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz" [Niggli, P. 1915] contient une abondance d'informations sur la résistance aux agents atmosphériques soit au niveau de la roche, soit au niveau des différentes carrières et édifices, organisées par canton¹⁰. Dans l'ouvrage "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz" [Kündig, R., éd. 1997] l'aspect de la résistance aux agents atmosphériques est traité de façon plus succincte et les appréciations sont regroupées par familles de roches et selon le mode d'utilisation. On trouve aussi une partie dédiée aux différents types de dommages qui affectent les pierres naturelles en oeuvre.

La connaissance des diverses formes d'altération de la pierre naturelle est, dans le cadre de cette recherche, fonctionnelle à une meilleure mise en oeuvre pour les nouvelles constructions plutôt qu'à la reconnaissance de ces altérations dans l'existant. Pour les aspects liés à la conservation, le *Comité Scientifique International pour la Pierre Naturelle* de l'ICOMOS (ICOMOS-ISCS) a publié en 2009 un glossaire illustré des formes de dégradation, désormais consultable en-ligne, et qui est organisé selon type d'altération [ICOMOS 2009]. Nous renvoyons à cette publication pour des plus amples détails.

4.7.1. Principaux types d'altérations et de dégradations des pierres naturelles de construction

L'altération et la dégradation ne sont pas synonymes, en effet une altération est une modification du matériau qui ne constitue pas une réduction de sa durabilité ou de sa résistance mécanique. La dégradation est, par contre, une modification du matériau qui en réduit les qualités et qui peut être dangereuse pour la durabilité de la construction [Rousset, B. 2009; ICOMOS 2009].

9. «En vérité, l'expérience et la pratique révèlent admirablement ce que sont les pierres en fonction de la diversité et de la nature des lieux dont elles proviennent, si bien que les vieux édifices te font connaître les qualités de chacune d'entre elles mieux que les écrits et les avertissements des philosophes.» Livre 2, chap. 8 [Alberti, L. B. 2004:119]

10. Confronter pour cela la partie finale "Volkswirtschaftliche Mitteilungen" de l'ingénieur Dr. Robert Moser de Zurich, pp. 319-409, et en particulier la partie "III Wirtschaftliche Betrachtungen. 1. Die Dauerhaftigkeit und Wetterbeständigkeit", pp. 352-389.

Il est essentiel de rappeler ici les principaux types d'altérations qui affectent les pierres naturelles dans la construction, cela afin de mieux comprendre les appréciations faites sur une roche particulière. On se base aussi sur la partie dédiée à ce thème spécifique par le livre "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz" [Kündig, R., éd. 1997:276-294], du fait qu'elle traite des altérations les plus fréquemment observées sur des pierres naturelles suisses.

«Toutes les réactions qui ont lieu à l'état solide, soient-elles biologiques, physiques, chimiques ou nucléaires produisent un réarrangement des atomes dans l'espace, et de là un changement du volume spécifique [...] Là où ces changements de volume sont contraints, des pressions se développent et la question est de savoir si ces pressions ont une grandeur suffisante pour déformer ou fracturer soit l'objet qui subit le changement même soit chaque élément environnant.» [Harris, J.E. 1992:233]

L'altération des pierres naturelles est un processus qui existe en nature et qui dépend de sources internes et externes à la pierre même; les externes sont essentiellement dues à l'action des agents atmosphériques. Les activités humaines ont, surtout depuis la fin du XIXe siècle, accéléré la dégradation soit disant "naturelle" en augmentant la concentration dans l'atmosphère de certains agents dégradant à travers les différentes formes de pollution atmosphérique. Il faut noter que la dégradation des roches dans le bâtiment se mesure en millimètres sur des périodes allant du siècle au millénaire; par contre, dans la nature, ces mêmes dégradations atteignent des mètres d'épaisseur sur des millénaires [Harris, J.E. 1992:236].

Les altérations sont des processus de différentes origines: physique, chimique, biologique et anthropique. Les principales sources d'altération dues aux actions externes sont: les variations de température; l'humidité relative de l'air et celle du sol; les gaz; les précipitations de poussières et d'acides; les organismes végétaux et animaux; les chocs mécaniques (causés aussi par la pluie battante); l'érosion due au vent; les catastrophes, et d'autres matières qui ont sur la pierre un effet nuisible (surtout les sels, les matériaux alcalins, le fer, etc). Les actions intérieures qui détériorent la pierre sont: l'humidité de la roche et les solutions salines contenues dans les pores.

L'eau joue un rôle décisif dans l'altération des pierres naturelles dans la construction, soit-elle physique, chimique ou biologique. L'eau assume différentes formes: humidité, solution avec d'autres substances ou déclencheur de réactions chimiques ou biologiques.

La connaissance des conditions géographiques, climatiques et historiques d'une pierre dans une construction est la condition *sine qua non* pour la compréhension des dégâts que cette même pierre présente [Kündig, R., éd. 1997:290-291].

Nous énumérons les principales formes d'altérations, en partant de celles qui ont peu d'effets sur la durabilité de la pierre naturelle.

La première famille est formées par les altérations chromatiques. Dans aucune forme ces dernières ont des effets nuisibles sur la durabilité de la roche et de la construction. Elles peuvent être entraînées par des matériaux autres que la pierre, comme dans le cas des taches, par l'exposition aux agents atmosphériques, comme pour la décoloration ou la rubéfaction (cette dernière due à l'oxydation des minéraux ferreux, souvent après un incendie), et par accumulation à la surface de fines couches d'autres minéraux ou matériaux, comme pour les patines.

Les altérations biologiques ne constituent pas un danger directe pour la durabilité de la roche ou de

la construction. C'est le cas des algues, des bactéries et des lichens. Certaines mousses peuvent, par contre, présenter des racines qui, agrippées à la roche, produisent des acides qui peuvent dissoudre certains minéraux. Les plantes poussent aussi dans des maçonneries de pierre naturelle, leur effet nuisible est celui de produire des fractures par leur accroissement.

Les diverses formes de dépôts surfaciques peuvent avoir parfois des effets négatifs sur la durabilité de la pierre et devenir donc des dégradations. Les croûtes, produites par accumulation de matières exogènes à la pierre (poussières, sels, suie, etc...) ou endogènes (sels et calcite), sont donc toujours différentes de leur substrat. Elles ont souvent un effet hydrofuge, ce qui entraîne des cristallisations entre la roche et la croûte qui peuvent amener à des dégradations de la surface. Les croûtes gypseuses, produites par la transformation de la calcite contenue dans la roche en gypse grâce au dioxyde de soufre présent dans l'air, sont entre les plus répandues. Les films et les pellicules sont généralement des couches fines qui adhèrent à la surface de la pierre sans y pénétrer. Souvent d'origine organique, un film peut être appliqué pour protéger la pierre (par exemple, film hydrofuge ou anti-graffiti), mais il peut avoir comme effets secondaires le changement de la couleur de la pierre ainsi qu'un effet de barrière aux échanges, comme une croûte. Les graffitis sont aussi une forme de pellicule qui peut parfois avoir des effets de barrière aux échanges, surtout si leur surface est étendue. Des formes particulières de dépôts surfaciques sont ceux liés à la migration de l'eau à l'intérieur de la roche: les remontées capillaires d'eau forment de taches d'humidité, les efflorescences sont formées par accumulation de sels dissouts dans l'eau et les subflorescences sont des dépôts de sels au-dessous de la surface de la pierre. Les sels constituant les efflorescences et les subflorescences peuvent, si mis en contact avec d'autres substance et de l'eau, produire des acides qui dissolvent les minéraux de la roche. C'est le cas de certains sels alcalins présents dans les mortiers, des nitrates contenus dans les matières organiques ou des sels de déverglaçage, dangereux parce que contenant du chlore (formation d'acide chlorhydrique).

Les altérations d'origine physique ou mécanique sont souvent des vraies formes de dégradation, vu qu'elles entraînent des importantes pertes de matière. Les principales formes sont les éclatements dus à des chocs de différentes origines ou à l'expansion des mortiers, des éléments métalliques et en bois; les fissurations et fractures causés par des chocs, par des mortiers de pose trop rigides par rapport à la roche, par l'action du gel ou par des charges de compression ou traction trop élevées.

La structure de la roche peut amener à une décohérence de ses composantes qui constitue une dégradation. La désagrégation sableuse concerne surtout les roches sédimentaires et a comme effets une augmentation de la porosité et une réduction de la résistance mécanique. Les grès de la Molasse présentent souvent à l'origine une désagrégation sableuse, ce qui ne signifie pas pour autant un mauvais comportement statique ou de durabilité. L'exfoliation consiste dans le détachement de plaques de roche parallèlement à la surface d'exposition de la pierre et cela indépendamment de son éventuelle stratification. La cause principale est l'alternance d'un cycle d'imbibition en eau suivit d'un rapide assèchement (expositions Sud et Ouest). Certains produits hydrofuges présentant une perméabilité à la vapeur d'eau insuffisante peuvent aussi entraîner des exfoliations. Le délitage est une forme particulière d'exfoliation qui se produit selon la stratification de la roche. Elle concerne par conséquent surtout les roches sédimentaires et métamorphiques. Les pierres posées en délit sont souvent affectées par ce type de dégradation.

Une autre forme d'altération qui comporte une perte de matière est l'érosion qui peut, dans des cas avancés, devenir une dégradation et dont l'origine est mécanique et/ou chimique. L'érosion différentielle se produit à l'interface entre matériaux de dureté et cohésion différentes: c'est le cas de pierres naturelles dures et tendres ou, à l'intérieur d'une même roche, de couches diverses. L'origine est soit mécanique, érosion due au vent, au ruissellement de l'eau ou à des systèmes de nettoyage trop agressifs, ou chimique, dissolution de minéraux. L'alvéolisation prend son nom de la formation, à la surface de la pierre, d'alvéoles produites par l'exposition directe à la pluie ou au vent, ce dernier cause parfois une cristallisation de sels au-dessous de la surface. L'érosion anthropique peut être chimique ou physique et est liée surtout aux techniques et aux produits de nettoyage. C'est le cas, par exemple, de l'hydrogommage appliqué aux roches tendres.

4.7.2. Durabilité des différentes familles de pierres naturelles dans la construction

Les roches cristallines tels les granites et les gneiss présentent une très bonne durabilité pour toute forme d'utilisation. Les points faibles sont représentés par les feldspaths, à risque de kaolinisation, et par le contenu en pyrite qui peut produire de l'oxyde de fer. Les nombreux exemples de bâtiments anciens, par exemple les églises romanes du nord du Canton du Tessin, et les nombreux édifices et ouvrages d'art réalisés au XIXe en Suisse ne présentent que peu d'altérations et témoignent donc de la bonne qualité de ces roches. La cristallisation de sels en surface, aussi grâce à l'interaction avec des matériaux alcalins, tels le ciment Portland, peuvent, s'il y a fissuration, provoquer des ruptures locales. Les calcaires ont été les roches les plus utilisées en Suisse dans la construction, dans les cas où une plus grande résistance par rapport aux grès était requise. Les calcaires sont très sensibles aux attaques acides qui ont tendance à dissoudre la calcite, à la formation de croûtes noires de gypse par action du dioxyde de soufre sur le calcium et par les ruptures causées par la dilatation des argiles sous l'effet de l'eau. Les calcaires siliceux résistent mieux aux attaques acides, mais, s'ils sont exposés à l'eau de pluie, ils développent des croûtes noires de silice.

Les marbres du canton du Tessin présentent, vu leur haute teneur en calcium, les mêmes sensibilités que les calcaires.

Les grès sont de nature variée et donc leur durabilité est très différente. Les grès de la Molasse du Plateau sont durables si utilisés, comme dans le passé, en éléments massifs et protégés des intempéries par des avant-toits ou par des couches peintes. Ces roches sont très sensibles aux effets de l'humidité, de l'érosion par la pluie battante et par la cristallisation de sels qui provoque l'exfoliation et la pulvérisation de la masse¹¹. Les grès arkosiques et ceux du Flysch sont, grâce à leur structure siliceuse, plus compacts et résistants; leur durabilité est parfois comparable à celle des granites.

En conclusion, la durabilité des roches suisses est bonne, surtout si on considère celles qui sont actuellement extraites: leur présence sur le marché est aussi une conséquence de leur durabilité. Cette résistance aux agents atmosphériques est d'autant plus élevée que les solutions de mise en oeuvre

11. Ceci était déjà connu aux architectes de la moitié du XIXe siècle, comme en témoignent les notes écrites de Henri Perregaux, architecte à Lausanne: «[...] le grès molasse est généralement employé comme pierre de taille. Sa nature spongieuse doit faire éviter de l'employer en contact avec le sol dont il prend bientôt l'humidité. [...] Aussi, dans toute construction bien entendue, on prend soin de l'isoler au moyen d'un soubassement en pierre dure et de le couvrir autant que possible au moyen de la saillie du toit. Au moyen de ces précautions et lorsqu'il n'est pas de l'espèce la plus friable, il peut durer longtemps sans éprouver d'altération bien sensible.», Perregaux, Henri, "De l'architecture dans le Canton de Vaud" (1844-1845) [Bissegger, P. 2007:639].

sont adaptées à chaque type de pierre naturelle: en partant de la position et de la pose des éléments dans l'ensemble de l'édifice jusqu'aux matériaux des liaisons et des jointoyage. Dans certain cas, cette "bonne façon" est la seule condition pour l'utilisation d'une pierre naturelle, comme dans le cas des grès. Dans tous les cas, une utilisation par éléments massifs permet une durabilité accrue, ainsi que la possibilité d'utiliser des roches qui ne possèdent pas les caractéristiques techniques suffisantes pour résister sous forme de plaques minces.

5. CONCLUSIONS AU CHAPITRE

Les connaissances de ce chapitre, même si elles sont d'ordre général, constituent le point de départ indispensable de toute réflexion autour de la pierre naturelle comme ressource exploitable. Dans la construction, notamment, la compréhension des faits qui sont à l'origine de la formation des roches permettent d'utiliser au mieux le matériau, selon les règles dictées par lui-même.

Dans le cas des roches suisses, nous pouvons relever la richesse des types que le pays met à disposition par sa morphologie variée. En effet, les roches suisses rassemblent les principales familles utilisées dans l'Europe entière. Ceci est donc un argument qui soutient l'objectif de la recherche, c'est-à-dire un développement de l'utilisation des pierres naturelles comme matériau de construction. D'autre part, les résultats obtenus par une recherche sur ces roches ont une valeur qui va au-delà des simples cas régionaux.

Les caractéristiques techniques des roches suisses démontrent, avec le patrimoine bâti, leur aptitude à l'application dans la construction. Dans plusieurs cas, comme pour les roches cristallines métamorphiques, elles présentent même des excellentes caractéristiques mécaniques couplées à une bonne résistance aux agentes atmosphériques. Les roches les plus sensibles aux dégradations, comme les grès de la Molasse de la Suisse occidentale, possèdent par ailleurs des bonnes caractéristiques mécaniques: il est nécessaire de bien concevoir leur mise en oeuvre afin de ne pas se priver de la possibilité des les employer dans la construction.

Du point de vue des roches, nous pouvons donc affirmer qu'une reintroduction de la pierre naturelle de taille dans la construction est possible et même souhaitable du fait de leur abondance en Suisse et des leurs caractéristiques techniques.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Alberti, L. B. 2004: *L'art d'édifier. Texte traduit du latin, présenté et annoté par Pierre Caye et Françoise Choay*, Paris, Editions du Seuil, 604 p. (la première édition latine du traité de Leon Battista Alberti, "De re aedificatoria", fut publiée à Florence par Nicolò di Lorenzo en 1485, et la première traduction italienne, "I dieci libri de l'architettura", parut à Venise chez Vincenzo Valgrisi en 1546)
- Association Romande des Métiers de la Pierre, éd. 2000: *Charte d'éthique et de bienfaisance pour la réfection de monuments et de bâtiments (3ème édition)*, Lausanne, Association Romande des Métiers de la Pierre, 48 p.
- Bissegger, P. 2007: *D'ivoire et de marbre. Alexandre et Henri Perregaux ou l'Age d'Or de l'architecture vaudoise, 1770-1850*, ("n. 131"), Lausanne, Bibliothèque historique vaudoise, 783 p.
- Bollin, R. 1996: *Pierres naturelles à Fribourg*, ("Pro Fribourg Trimestriel n. 112"), Fribourg, Pro Fribourg, 108 p.
- Cailleux, A. 1974: *Les roches. Septième édition mise à jour*, ("Que sais-je? N. 519"), Paris, Presses Universitaires de France, 127 p.
- Clauser, Ch., Huenges, E. 1995: "Thermal Conductivity of Rocks and Minerals", in: Ahrens, T.J. éd., *Rock Physics and Phase Relations. A handbook of physical constants*, Washington DC, American Geophysical Union, pp. 105-126.
- Cotti, G. et al. 1990: *Introduzione al paesaggio naturale del Cantone Ticino. 1. Le componenti naturali*, Bellinzona, Dipartimento dell'Ambiente, 484 p.
- Craig, J. R., Vaughan, D. J., Skinner, B. J. 2001: *Resources of the earth: origin, use and environmental impact. Third edition*, Upper Saddle River, Pearson Education-Prentice Hall, 520 p.
- de Quervain, F. 1945. *Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. Teil I*, ("Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnische Serie, 23. Lieferung"), Bern, Kümmerly und Frey Ag. Geographischer Verlag, 56 p.
- de Quervain, F. 1969: *Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage*, Bern, Kümmerly und Frey Geographischer Verlag, 312 p.
- Di Sivo, M. 2004: *Atlante della pietra*, ("Grande Atlante di Architettura 16"), Torino, UTET, 354 p.
- Documentation SIA D0170 2002: *L'énergie thermique dans le bâtiment : guide d'utilisation de la norme SIA 380/1*, édition 2001, Zürich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 97 p.
- Foucault, A., Raoult, J.-F. 1988: *Dictionnaire de géologie. 3e édition*, Paris, Masson, 352 p.
- Fuchs, K. 1997: *Natursteine aus aller welt. Entdecken, bestimmen, anwenden*, München, Verlag Georg D.W. Callwey, 2 classificateurs.
- Harris, J.E. 1992: "Weathering of rock, corrosion of stone and rusting of iron", *Meccanica*, vol. 27, n. 3, 1992, pp. 233-250.
- ICOMOS 2009: *Illustrated glossary on stone deterioration patterns* (consultable en-ligne à l'adresse: <http://Irmh-ext.fr/icomos/consult/index.htm>, consulté le 11.11.2009).
- Kündig, R., éd. 1997: *Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweizerische Geotechnische Kommission*, Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 522 p.
- Labhart, T. et al. 1997: *Géologie de la Suisse*, ("Les compagnons du naturaliste"), Lausanne, Delachaux et Niestlé, 211 p.

- Labhart, T., Thierstein, F. 1987: *Die Gesteine des Parlamentsgebäudes*, ("Matériaux pour la géologie de la Suisse. Bulletin. n. 79"), Bern, Kümmerly und Frey, 32 p.
- Lienhard IV, J. H., Lienhard V, J. H. 2008: *A heat transfer textbook. Third Edition*, Cambridge, Phlogiston Press, 749 p.
- Mojon, A. 2006: *Steinkunde Kompakt. Grundwissen. Mineralogie. Petrografie. Geologie. Natursteinverarbeitung. Für Berufe der natursteinverarbeitenden Branche*, Gwatt/Thun, Weber AG Verlag, 120 p.
- Niggli, P. 1915: *Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz*, ("Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie V"), Bern, Francke, 423 p.
- Parriaux, A. 2006: *Géologie. Bases pour l'ingénieur*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 516 p.
- Pro Naturstein, éd. 2002: *Steinbrueche im Tessin*, ("Natursteinbau"), Zürich, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft Pro Naturstein, 11 p.
- Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Cho, Y. I. 1998: *Handbook of heat transfer. Third edition*, New York, McGraw-Hill.
- Rousset, B. 2009: documents du cours "Matériaux et conservation du patrimoine", Section Science et Technique des Matériaux, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Semestre d'Automne 2009.
- Schärli, U., Kohl, T. 2002: *Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete*, ("Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geophysik nr. 36"), Zürich, Schweizerische Geophysikalische Kommission, 134 p.
- Septfontaine, P. 1999: *Belles et utiles pierres de chez nous*, Lausanne, Musée géologique cantonal, 48 p.
- Smith, M. R. éd. 1999: *Stone: Building stone, rock fill and armourstone in construction*, ("Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 16"), London, Geological Society, 478 p.
- Vinx, R. 2005: *Gesteinsbestimmung im Gelände*, München, Elsevier, 439 p.
- Wiedenmayer, F. 1963: "Obere Trias bis mittlerer Lias zwischen Saltrio und Tremona (Lombardische Alpen). Die Wechselbeziehungen zwischen Stratigraphie, Sedimentologie und syngenetischer Tektonik", *Eclogae geologicae Helvetiae*, Vol. 56, n. 2, Basel, Birkhäuser, 1963, 112 p.
- Winkler, E. M. 1997: *Stone in architecture. Properties, Durability. Third, Completely Revised and Extended Edition*, Berlin-Heidelberg, Springer Verlag, 313 p.
- Zimmermann, A. ed. 2009: *Constructing Landscape. Materials, Techniques, Structural Components*, Basel, Birkhäuser, 533 p.
- Zürcher, C., Frank, T. 2004: *Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis. 2. Auflage*, Zürich, vdf Hochschulverlag AG, 245 p.

EXPLOITATION DE LA PIERRE NATURELLE DE TAILLE

1. HISTOIRE DE L'ACTIVITÉ EXTRACTIVE EN SUISSE

L'objectif de cette recherche n'étant pas de donner une vision exhaustive de la pratique de l'exploitation des pierres naturelles en Suisse dans l'histoire, on se limitera à donner un aperçu de l'évolution de la pratique de l'exploitation. Les détails de cette pratique, surtout en ce qui concerne l'histoire, sont assez bien connus et documentés. Il est possible de les trouver dans les ouvrages de référence déjà cités, [Kündig, R., éd. 1997; Schwarz, H. 1983; de Quervain, F. 1969; Niggli, P. 1915] ou dans les publications spécifiques auxquelles ces ouvrages renvoient. Là où c'est nécessaire, des références particulières seront données.

1.1. Historique

En Suisse, l'exploitation des gisements de pierre naturelle commença à l'époque romaine. Avant cette période, on connaît seulement l'utilisation de roches trouvées sur place, par exemple le cas des menhirs découverts dans les environs d'Yverdon-les-Bains.

Les Romains appliquèrent leurs connaissances de l'exploitation des roches pour se procurer des bons matériaux de construction répondant à leurs exigences. Ils exploitèrent surtout des gisements facilement accessibles et des roches qui leur étaient bien connues: les tufs calcaires, par exemple à Leuzingen (BE) et à Niedergösgen (SO); les calcaires du Jura, à La Lance (VD) ou à Dittingen (BL), et les grès coquilliers, à Würenlos (AG). L'utilisation de pierres cristallines, surtout des gneiss et des granites provenant de blocs erratiques, pour des objets spéciaux, tels les pierres tombales ou les sarcophages, est aussi connue. Les meules étaient produites à partir des grès coquilliers. Les techniques d'extraction étaient celles utilisées habituellement par les Romains: creusement de tranchées verticales avec le pic, et d'une horizontale sous le bloc dans laquelle étaient insérés des coins métalliques afin de libérer l'élément du banc [Adam, J.-P. 2005]. Les Romains utilisaient les roches les plus proches du lieu de construction pour les maçonneries, et ils se limitaient à importer des roches particulières pour les finitions et les revêtements [*ibid*:23-24].

Pendant le Haut Moyen-Âge, l'exploitation des carrières se réduisit beaucoup. On utilisait souvent les pierres trouvées sur place pour la réalisation de maçonneries de pierre sèche ou les pierres excavées lors de la réalisation des caves des bâtiments et des tombeaux, ou encore on exploitait les blocs erratiques et ceux transportés par les fleuves. Une autre pratique très répandue était celle de la réutilisation des pierres provenant d'anciennes constructions, surtout les pierres de taille romaines. Les carrières étaient donc peu nombreuses, de petites dimensions et leur exploitation se faisait selon les besoins.

Pour une reprise de l'exploitation régulière des gisements en Suisse, on dut attendre jusqu'aux environs du XIIe siècle, avec le début des importants chantiers urbains des cathédrales. La nécessité de disposer de pierres de taille de bonne qualité et en grandes quantités enclencha le rapide développement de l'activité extractive. Le problème principal étant celui de l'approvisionnement et du transport: des carrières s'ouvrirent soit dans les villes ou leurs environs (par exemple à Bâle, Berne,

Fribourg, Lausanne, Lucerne, Soleure, Schaffhouse), soit dans des lieux facilement joignables par voie d'eau (par exemple Zürich-Obersee, Rorschach-Bondesee-Schaffouse, la région lémanique). Les pierres exploitées étaient, vu la position géographique des villes principales, les grès de la Molasse du Plateau et les calcaires du Jura. L'obligation donnée par les administrations communales de l'époque de réduire les risques d'incendies dans les centres des villes, fut aussi à l'origine de la croissance de la demande des pierres de construction.

De la même façon qu'à l'époque romaine, les pierres locales étaient utilisées pour les maçonneries, mais souvent des éléments spéciaux qui demandaient des caractéristiques techniques ou esthétiques particulières, pouvaient parcourir de longues distances. En Suisse, par exemple, les meules étaient des outils dont la demande était très forte et elles étaient extraites à partir de grès ou de conglomérats coquilliers. Les carrières de roche pour meules les plus connues sont celles de La Molière, d'Ins, de Brüttelen, de Schnottwil, de Würenlos, de Mels. Parfois on exploitait aussi des blocs erratiques. Les bassins de fontaines étaient aussi des produits particuliers qui provenaient surtout des calcaires du Jura ou du Flysch alpin. Leur demande s'accrut pendant les siècles avec les améliorations des réseaux d'approvisionnement en eau des villes et des villages.

La construction d'édifices de prestige pour les familles riches et pour les autorités, et la diffusion parallèle des goûts architecturaux influencés par l'Italie de la Renaissance, produisit en Suisse aussi une demande croissante de pierres de revêtement et de décoration. Les marbres et les calcaires furent de plus en plus demandés. Au début du XVIIe siècle les pierres les plus recherchées furent les "marbres noirs", qui en vérité étaient des roches calcaires alpines. L'évolution des goûts vers une plus grande polychromie fit la gloire des "marbres" de la vallée du Rhône, de Grindelwald, des brèches calcaires d'Arzo et de ceux du Chablais vaudois. Ces dernières pierres étaient, par exemple, exploitées dans différentes carrières par la famille Doret de Vevey qui connut, grâce à cette activité, richesse et renommée [Bissegger, P. 1980]. Le XIXe siècle et le retour à des goûts influencés par l'époque Classique produisirent, en ce qui concerne les pierre d'ornement, un attrait vers les pierre étrangères, dont une des plus demandées était le marbre blanc de Carrare.



Fig. II. 1. Début du chantier de la collégiale de Berne, vers 1420. Extrait de Diebold Schilling, *Amtliche Chronik*, 1, p.451. [Andermatten, B., De Ramey, D., éd. 1990]



Fig. II. 2. Exploitation manuelle dans les carrières de grès de Molasse de Berne dans les années 1940 [Reinhard, E., éd. 1945]

Le XIXe siècle, et en partie le XVIIIe dans le cas des "marbres polychromes" déjà cités, et en particulier sa deuxième moitié, furent une période de grâce pour l'exploitation de la pierre en Suisse, au moins en ce qui concerne les quantités et la diffusion. Le siècle de la révolution industrielle correspondit en Suisse avec une longue période pendant laquelle la Confédération et les cantons développèrent leurs réseaux de communication routière et de chemins de fer¹. La pierre naturelle fut l'un des matériaux les plus utilisés, vu la facilité de son approvisionnement dans tout le territoire. L'exploitation massive des gisements de roches dures alpines, gneiss et granits en premier lieu, qui possédaient les meilleures caractéristiques techniques pour les ouvrages d'art, remontent à cette époque. L'exemple le plus connu est celui de la construction de la Ligne Ferroviaire du Gothard à partir de la deuxième moitié du XIXe siècle, dont le chantier du tunnel dura de 1872 à 1882. On utilisa pour les ouvrages d'art de cette ligne 502'280 m³ de pierre de taille [Schwarz, H. 1983:14], provenant dans la plupart des cas des carrières situées des deux côtés du Saint-Gothard.

Si les pierres naturelles furent largement utilisées dans les ouvrages de génie civil, la construction des bâtiments publics de la Confédération et des cantons se fit aussi avec les mêmes matériaux, auxquels il faut encore ajouter les pierres ornementales. Dans ce cas, l'apogée de la construction en pierre en Suisse est probablement atteint avec le Parlement Fédéral de Berne de l'architecte Hans Auer, construit entre 1894 et 1902. Déjà dans les autres deux parties, la Bundeshaus West de 1857 et la Bundeshaus Ost de 1888-1892, les pierres suisses avaient un rôle central, mais dans le Parlement Fédéral on peut retrouver à peu près tous les types de pierres exploitées à l'époque en Suisse. On utilisa plus de trente différents types de pierres naturelles, dont seulement quatre provenant de l'étranger [Labhart, T. 1987]. Dans le même esprit furent construites les Offices de Postes des principales villes de Suisse, les sièges des Banques, les gares et les autres équipements publics "modernes" dont la nécessité se faisait pressante pour un pays en plein développement économique et touristique.

Le déclin de l'utilisation de la pierre naturelle dans les constructions commença avec la Première Guerre Mondiale. Pendant la Deuxième Guerre Mondiale, la volonté de réduire la consommation de charbon impliqua une nouvelle utilisation, pour le peu de bâtiments que l'on construisit, de la pierre naturelle indigène².

Dans l'Après-guerre, les matériaux de construction comme la brique, le béton armé et les pierres artificielles s'affirmèrent définitivement sur le marché. L'exploitation des gisements de pierre naturelle augmenta dans la catégorie de la production de granulats, surtout dans les régions du nord des Alpes, pour la production de ballast et d'agrégats. Cette situation perdure encore aujourd'hui, elle s'est même en partie empirée à cause de la concurrence croissante des pierres naturelles de provenance étrangères, surtout au niveau des prix.

1.2. Évolution du marché économique

Il serait difficile, et aussi de peu d'utilité dans le cadre de cette recherche, d'essayer de décrire l'évolution historique du marché économique de la pierre en Suisse, d'une autre façon que celle déjà exposée dans le sous-chapitre précédent. On se limitera ici à décrire l'évolution subie par ce secteur

1. Il faut rappeler que la Confédération Suisse, dans le sens actuel du terme, est née avec la Constitution Fédérale du 12 septembre 1848. La première Assemblée Fédérale se réunit à Berne le 6 novembre de la même année. Les Chemins de Fer Fédéraux sont constitués en 1898, la Banque Nationale en 1906.

2. Voir à ce sujet: [Haller, P. 1943].

économique depuis la moitié du XIXe siècle, d'une part parce que les sources d'informations au niveau national sont disponibles seulement à partir de cette époque, et d'autre part parce que c'est à partir de ce moment que l'exploitation en Suisse devient une activité "industrielle" quant à l'organisation du travail et des technologies employées. On utilisera donc le terme "industrie de la pierre naturelle" pour désigner ce secteur économique [Schwarz, H. 1983].

Il faut souligner que les études et les publications au sujet de l'industrie de la pierre naturelle en Suisse sont rares. Les deux plus importantes dans le cadre de l'analyse économique sont: "Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer des Schweiz" [Niggli, P. 1915], surtout dans la troisième section, et la thèse de doctorat de Hanspeter Schwarz "Die Steinbrüche in der Schweiz" [Schwarz, H. 1983], qui traite de façon approfondie le secteur économique dont il est question dans ce paragraphe. L'ouvrage "Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz" [Kündig, R., éd. 1997] se base sur les mêmes deux sources, en apportant quelques mises à jour dans les données. On peut tout de suite se rendre compte que les données les plus récentes, qui se réfèrent au pays entier, remontent à une dizaine d'années.

1.2.1. Problèmes de l'approche du secteur économique

L'analyse du secteur économique de l'industrie de la pierre naturelle se confronte à plusieurs problèmes qui peuvent se résumer en deux catégories. La première est celle du type d'activité, c'est-à-dire de la difficulté de pouvoir diviser de façon claire la branche de l'exploitation des pierres naturelles pour la construction ou la taille de celle de l'exploitation de carrières pour granulats. À l'intérieur de la première branche, on se confronte au même problème au niveau des entreprises s'occupant d'exploitation ou de taille. Cela parce qu'une même entreprise peut souvent rassembler en son sein tous les différents cadres d'activité. La deuxième catégorie est celle du type de données, c'est-à-dire des chiffres desquels on dispose pour un certain secteur d'activité ou pour une certaine entreprise. Les données les plus connues sont celles qui sont liées au nombre d'entreprises et d'employés. D'accès plus difficile, celles liées aux volumes, à cause de la difficulté de définir quels volumes on considère (toute roche extraite, roche extraite et utilisable, etc.) et de l'approximation avec laquelle ces données sont fournies par les carrières. Il faut coupler cela avec le fait qu'en Suisse les Associations du secteur des pierres naturelles de construction ne s'occupent pas toujours de récolter ce type de données. Les producteurs de granulats sont mieux organisés et des données plus précises sont en conséquence disponibles.

On doit donc toujours compter sur des données fragmentaires, mais qui sont suffisantes pour tracer l'évolution du secteur économique de l'industrie de la pierre naturelle.

1.2.2. Nombre de carrières

Les données concernant le nombre de carrières exploitées en Suisse sont, dans leur ensemble, assez hétérogènes. En effet, même lors du recensement de 1910-1915, le nombre total des carrières étudiées ne correspondait probablement pas au nombre réel des carrières actives. Le graphique sur l'évolution du nombre de carrières exploitées nous renseigne en tout cas de l'évolution suivie par cette activité pendant le dernier siècle. Lors de l'étude de Schwarz, le nombre de carrières en activité était en croissance suite à la conjoncture économique favorable dès les années 1970.

1.2.3. Distribution géographique des carrières

Les carrières ont été toujours distribuées sur l'ensemble du territoire suisse, vu la richesse de notre pays en gisements de roches, et cela jusqu'au XIXe siècle [Schwarz, H. 1983:41]. Au début du XXe siècle, seul le canton de Genève n'avait pas de carrières [Niggli, P. 1915:333-340]³. Dans les années 1980, le nombre de cantons possédant des carrières était de 20 sur 26.

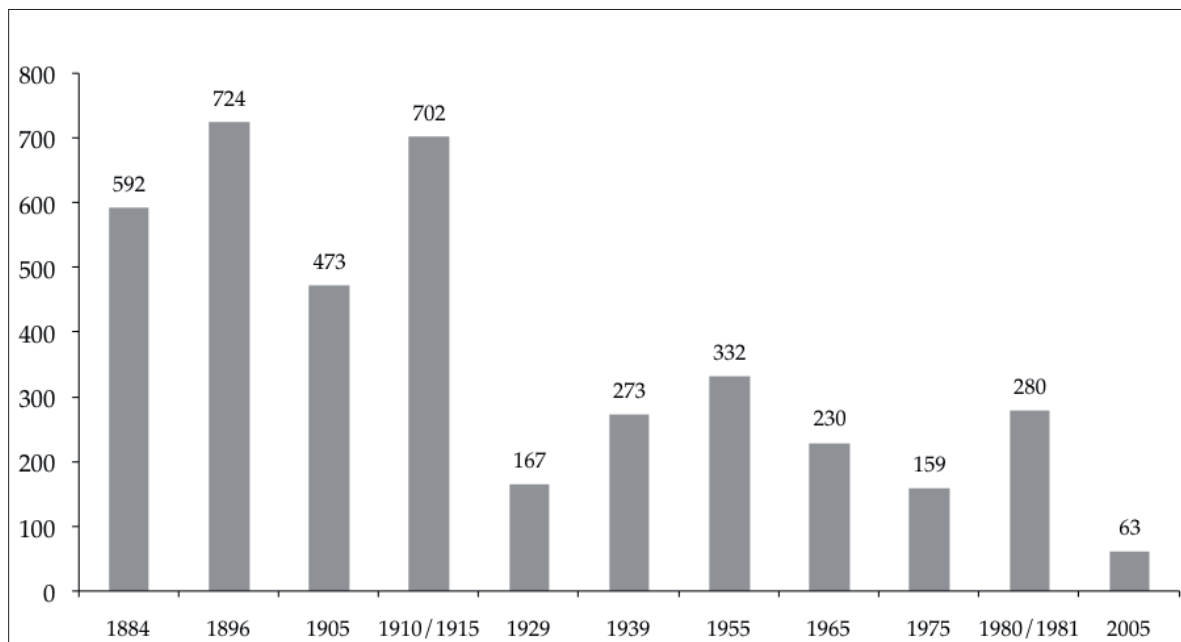


Fig. II.3. Evolution du nombre des entreprises suisses du secteur de l'exploitation de la pierre naturelle de taille

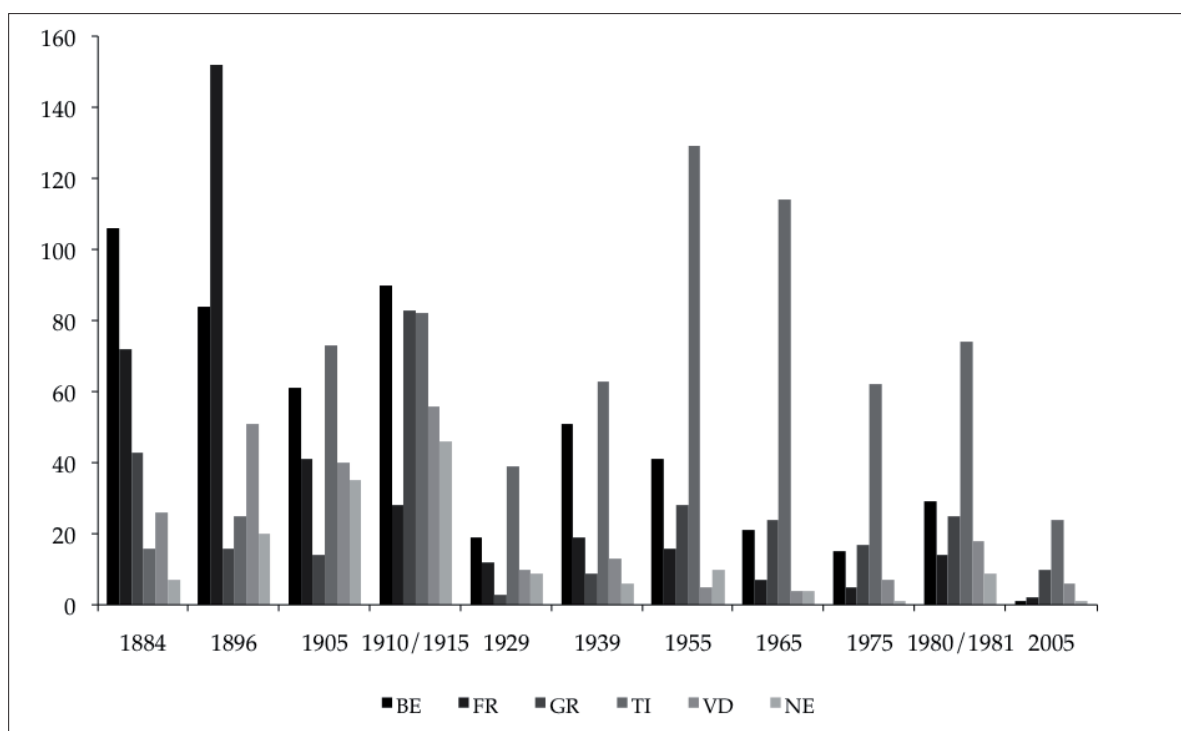


Fig. II.4. Evolution du nombre de carrières dans les six principaux Cantons suisses exploitant la pierre naturelle de taille

3. En 1915, année de publication de l'ouvrage de Niggli, le nombre de Cantons était de 25, y compris les demis-cantons, vu que le Jura est souverain depuis 1979.

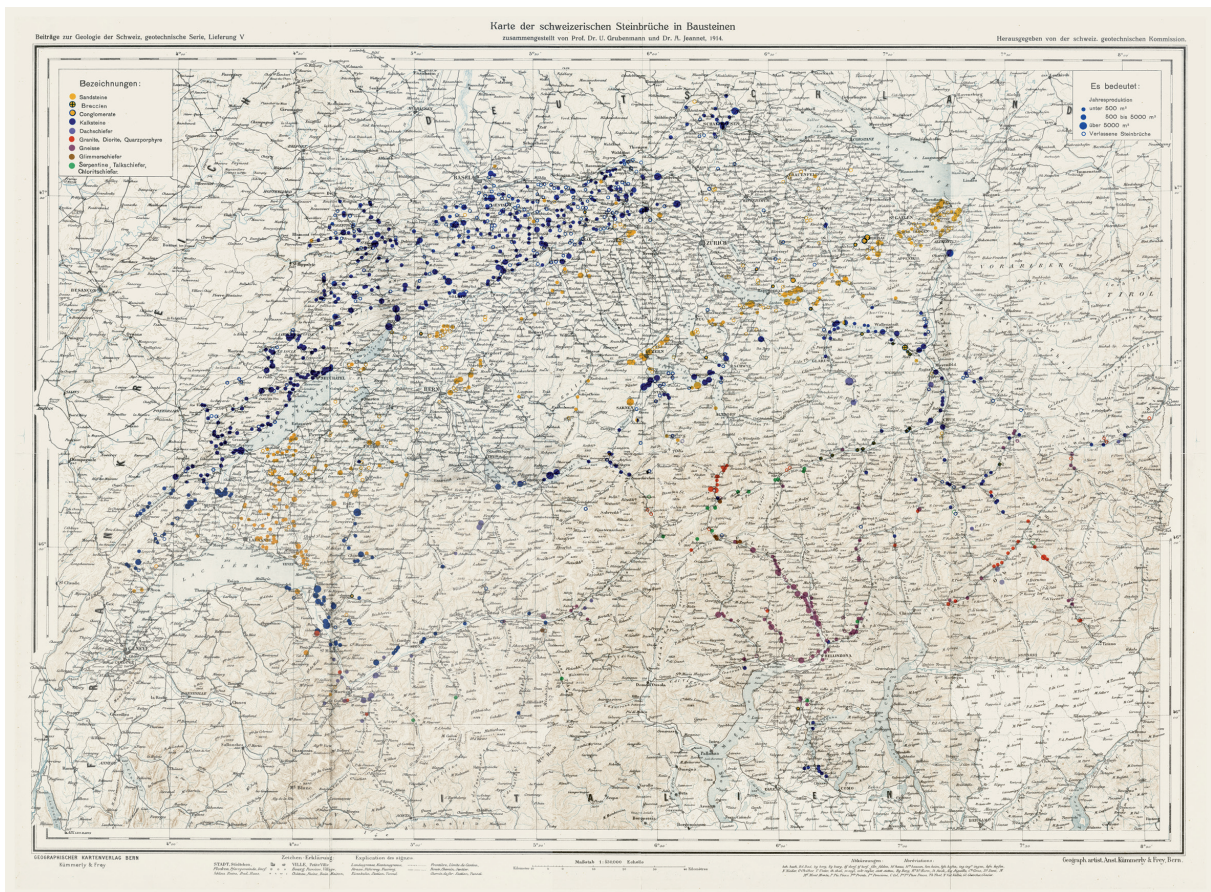


Fig. II.5. Distribution des carrières suisses de pierre naturelle actives en 1915 [Niggli, P. 1915]



Fig. II.6. Distribution des carrières suisses de pierre naturelle actives en 2010

Même si le nombre de carrières a fortement diminué, ce qui ressort fortement de ces chiffres c'est que l'activité d'exploitation s'est de plus en plus concentrée: au début du XXe siècle les premiers cinq cantons possédaient 49,6% des carrières, en 1980 ce chiffre avait passé à 68%.

1.2.4. Types de roches exploitées

Type de roche	1910/1915]	1980
Granites et gneiss	18%	33%
Grès	27%	13%
Calcaires et marbres	45%	44%
Schistes	7%	6%
Diverses	3%	4%

[Schwarz, H. 1983:72]

La donnée la plus frappante est la diminution nette dans l'exploitation des grès de la Molasse du Plateau en faveur des roches alpines, cela est en accord avec la disparition du canton de Vaud des cinq cantons avec le plus grand nombre de carrières.

1.2.5. Nombre et taille des entreprises

Si les données précédentes se référaient exclusivement à la distribution, le nombre et la taille des entreprises peut donner un meilleur aperçu du "poids" du secteur de l'industrie de la pierre naturelle à l'intérieur de l'économie suisse.

Les données sur les emplois, tirées de l'étude de Schwarz [Schwarz, H. 1983], sont divisées selon le domaine d'activité à l'intérieur du secteur de la pierre naturelle. On constate une diminution constante du nombre d'emplois, ce qui ne signifie pas seulement une diminution du "poids" du secteur, mais qui s'explique aussi par une mécanisation croissante à l'intérieur de la branche, autant dans l'extraction que dans le façonnage.

L'évolution de la taille des entreprises, dont les données proviennent de la même source susmentionnée, permettent d'évaluer la structure de cette industrie. Si on se réfère à la définition des Petites et Moyennes Entreprises adoptée par la Commission Européenne en 2005, les seuils en personnel sont ainsi définis: une Moyenne Entreprise a un effectif de moins de 250 employés; une Petite Entreprise en compte moins de 50 et une Microentreprise en occupe moins de 10 [Commission Européenne 2006]. Cette définition, en ce qui concerne le nombre d'employés, est aussi celle utilisée en Suisse à défaut d'une définition précise qui n'existe pas encore à nos jours⁴. Les entreprises suisses du secteur de la pierre naturelle ont donc toujours été des micro- à petites entreprises, avec une prépondérance de ces dernières, comme, par exemple, pour l'année 1975.

1.2.6. Production

Les valeurs de la production sont, comme il a déjà dit, approximatives, vu la difficulté de calcul et de définition. La production a diminué entre 1910-1915 et 1980 de 75%, passant de 850'000 m³ à 215'000 m³ [Schwarz, H. 1983:105]. Elle suit donc la diminution du nombre d'entreprises. La production annuelle par entreprise en 1910-1915 était en général inférieure à 1'000 m³ et elle ne dépassait jamais les 5'000 m³. Selon l'étude de Schwarz, cette donnée n'a pas vraiment changé

4. Voir à ce propos "Typologie des PME. Les classifications légales" <http://www.kmu.admin.ch/politik/00100/00102/index.html?lang=fr>, consulté le 01.09.2009.

depuis, même si les techniques modernes d'exploitation pourraient le faire supposer [Schwarz, H. 1983:103]. L'effet principal au niveau suisse de nouveaux modes de production a influencé la taille des entreprises, qui a généralement diminué. Ces dernières ont donc pu conserver les mêmes volumes de production avec un nombre d'employés réduit [Fig. II.7-8-9].

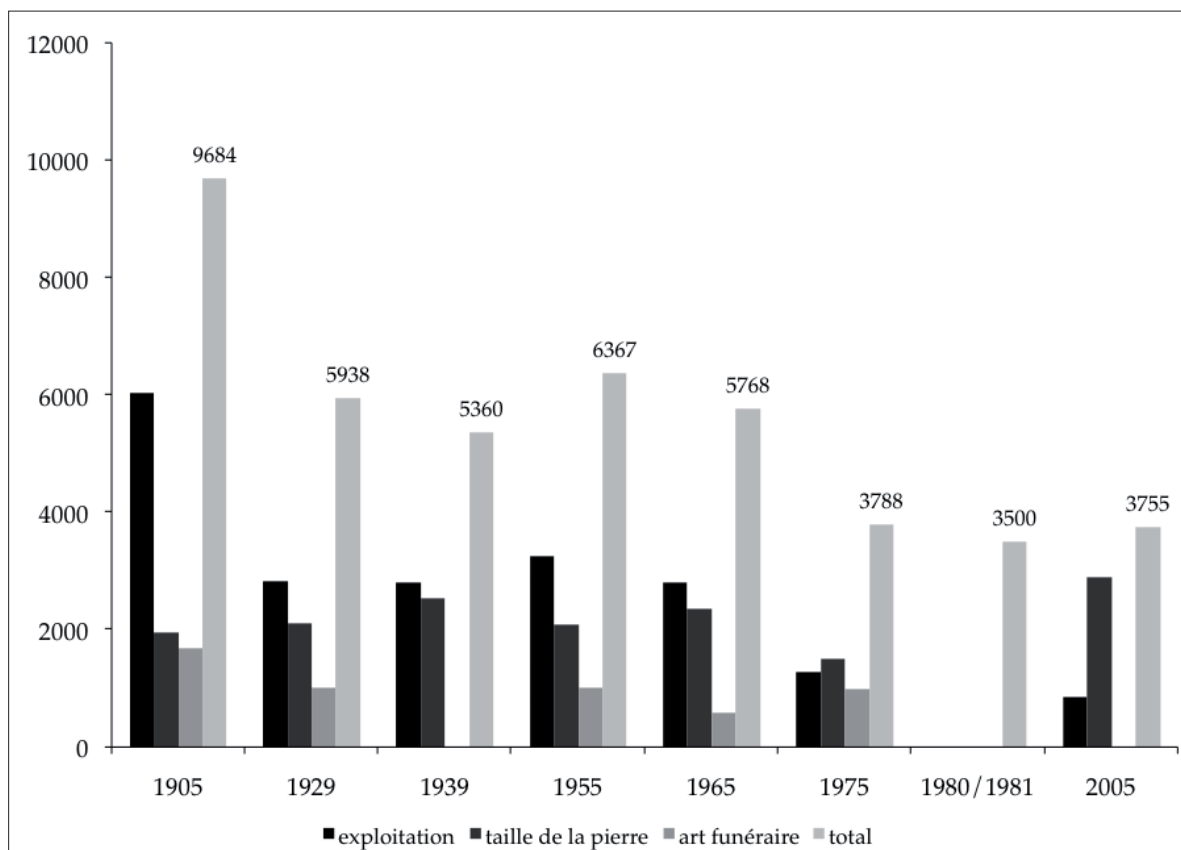


Fig. II.7. Evolution du nombre d'emplois dans le secteur économique de la pierre naturelle de taille

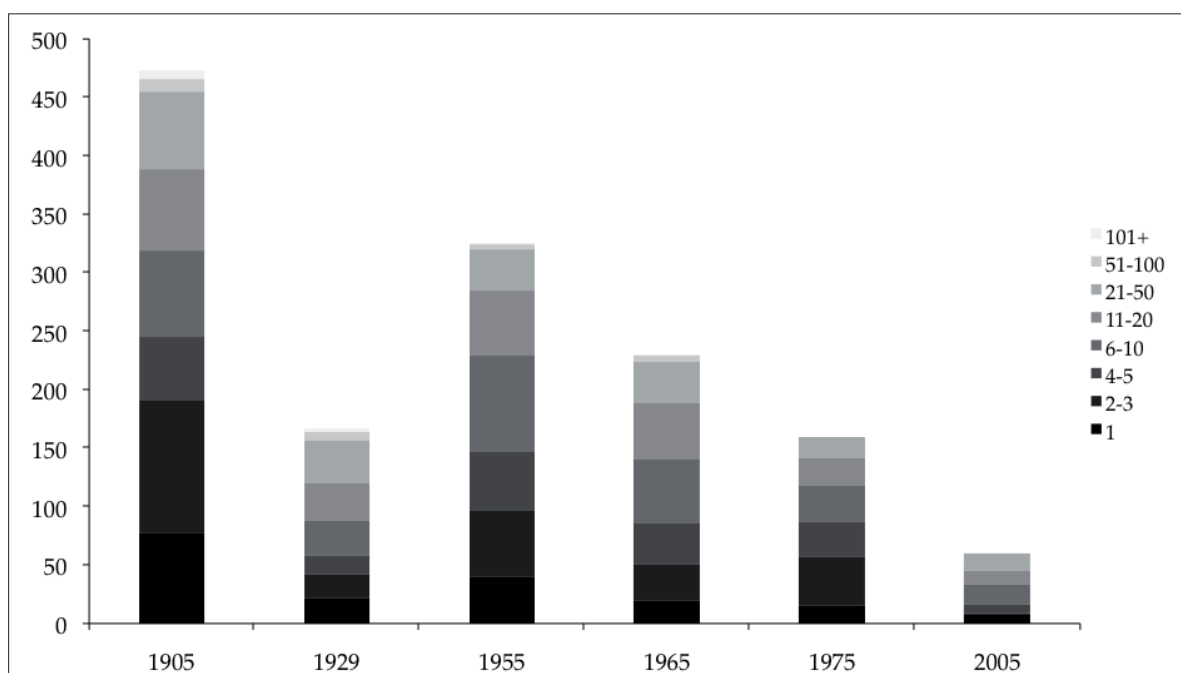


Fig. II.8. Evolution du nombre d'entreprises actives dans l'exploitation selon leur taille

En 2001 la production de pierre naturelle en Suisse était d'environ 150'000 t (correspondants à 60'000 m³) [Bradley, F. 2002], mais probablement ce chiffre se réfère à la quantité de pierre utilisable et non à celle extraite. Par rapport à l'année 2000, ce résultat indiquerait une diminution de 25%. La même valeur est reportée pour l'année 1965 par de Quervain [de Quervain, F. 1969:289] pour les produits finis. Il faut ajouter à ce chiffre au moins la même quantité de chutes [Schwarz, H. 1983:105] et une quantité d'environ 100'000 t pour les blocs de grands formats [de Quervain, F. 1969:289] : le résultat est d'environ 400'000 t (215'000 m³). On peut donc affirmer, en accord avec Schwarz, que la production de pierre naturelle n'a pas varié depuis la moitié des années 1960 [Schwarz, H. 1983:105]. De Quervain donne la distribution suivante de la production selon les types d'éléments en pierre naturelle en 1965:

Pierres de pavages et dallages	25'000 t	17%
Pierres pour la construction routière	60'000 t	40%
Pierres pour la construction	20'000 t	13%
Pierres pour les aménagements de jardins	40'000 t	27%
Pierres pour les œuvres d'art	5'000 t	3%

1.2.7. Importations et exportations

Même si la présente recherche se limite à la Suisse et donc à son marché intérieur, il est intéressant de noter que depuis la deuxième moitié du XIXe siècle les importations de pierres naturelles ont toujours surpassé les exportations. En 1873 on importa 259'068 t et l'on en exporta 22'668 t; en 1913 l'importation avait atteint 856'856 t et l'exportation 51'855 t [Niggli, P. 1915:347]. En 1980 la quantité avait diminué à 119'290 t et l'exportation à 46'280 t. La Suisse n'a donc jamais été autosuffisante du point de vue de la ressource "pierre naturelle" pendant tout le XXe siècle, cela surtout à cause de la demande de type de pierres inexistantes en Suisse (surtout ornementales) et de la concurrence au niveau des prix [Schwarz, H. 1983]. Pour l'année 1980 environ deux tiers du marché de la pierre en Suisse étaient constitués par des pierres importées [Schwarz, H. 1983].

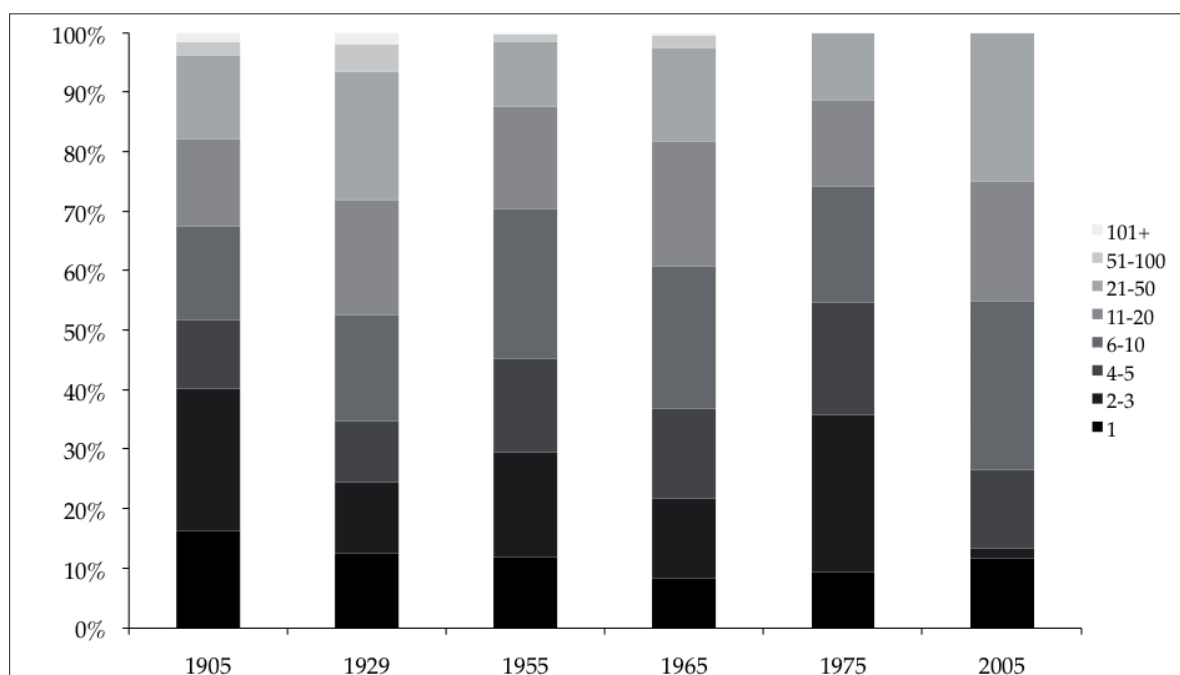


Fig. II.9. Evolution de la taille des entreprises d'exploitation

2. SITUATION ACTUELLE DU SECTEUR DE L'EXPLOITATION DES PIERRES NATURELLES

L'analyse de la situation actuelle du secteur de l'exploitation des pierres naturelles en Suisse se base sur une série de visites de carrières qui ont été effectuées entre 2006 et 2010. Les carrières recensées, en tout 23 entreprises qui exploitent 29 carrières de pierre naturelle, ont été sélectionnées, en premier lieu, parce que l'exploitation y est exercée de façon continue; l'extraction de pierre naturelle est l'activité principale; leur dimension permet une exploitation industrielle moderne.

Les visites des carrières ont été menées selon un canevas commun, ce qui a permis de disposer de données comparables. Les données recueillies concernent des informations sur l'entreprise, l'exploitation, la roche et les aspects environnementaux.

Les données des différentes carrières ont été analysées afin de produire des diagrammes sous forme de plages de pourcentage. Ceci pour pouvoir exprimer des tendances dans les différents domaines analysés. Ces diagrammes servent à illustrer les paragraphes qui suivent.

2.1. Carrières actuellement exploitées

Une liste des carrières actuellement exploitées a été dressée sur la base des données disponibles. La mise à jour s'est faite en utilisant les données du Recensement des Entreprises 2005; la recherche dans les registres de commerce disponibles; par l'intermédiaire des annuaires téléphoniques et des entreprises; ainsi qu'à travers des spécialistes de la branche de la pierre naturelle. Cette liste peut comporter des oublis ou des carrières qui ne sont plus exploitées, mais elle reflète assez bien l'état actuel du secteur (Annexe A.3). Pour les carrières qui produisent des roches utilisables sous forme massive dans la construction, des fiches, comportant les principales données techniques et les modes d'exploitation, ont été réalisées. Elles sont recueillies dans un annexe (Annexe A.1)

2.2. Types de carrières

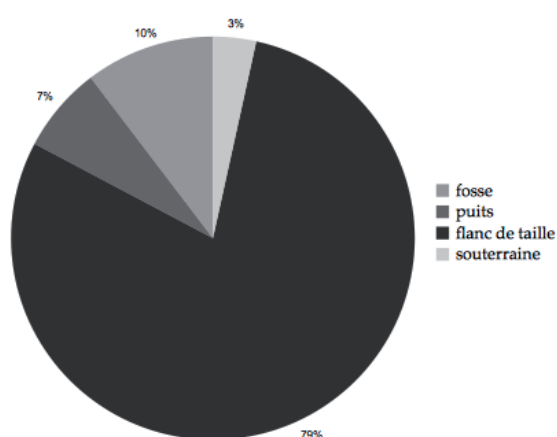


Fig. II.11. Répartition des types de carrières à l'intérieur de l'échantillon de celles visitées

Les différents types de carrières seront classifiés selon leur morphologie, cette dernière ayant un effet important sur l'exploitation et sur l'impact environnemental. Aujourd'hui on trouve en Suisse, selon ce critère de division, deux familles principales de carrières: celles de surface et celles souterraines (Tableau I). Les premières se subdivisent encore, selon la morphologie du terrain dans lequel elles

s'insèrent, en carrières en flanc de taille, en fosse et en puits [Kündig, R., éd. 1997:208-209]. Il est possible que différents types de carrière puissent exister dans un même gisement ou qu'une même carrière assume une morphologie variée, comme dans le cas de la carrière de grès de la Molasse de Berne à la Krauchthal où l'ancienne carrière en flanc de taille est actuellement exploitée en souterrain.

2.2.1. Carrière en flanc de taille

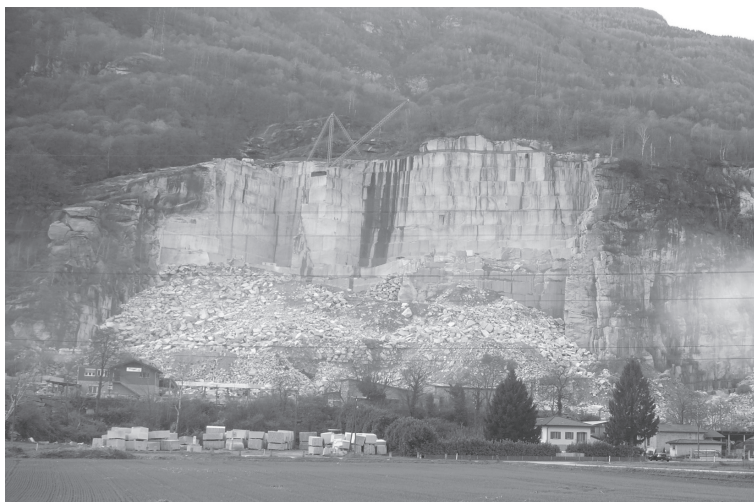


Fig. II.10. Typique carrière en flanc de taille dans les Nappes Penniques du Canton du Tessin (gneiss type Lodrino)

Le type de la carrière en flanc de taille est le plus répandu en Suisse et celui que tout le monde reconnaît comme "carrière de pierre naturelle".

L'exploitation se fait depuis le sommet en descendant par des gradins. La pierre extraite et les déchets sont simplement descendus par le biais de dumpers ou de derricks.

Les aménagements principaux sont les rampes d'accès aux différents bancs.

À ce type appartient, par exemple, la majorité des carrières alpines de roches dures dans les cantons des Grisons et du Tessin.

2.2.2. Carrière en fosse



Fig. II.11. Carrière en fosse dans le Jura suisse au Canton de Neuchâtel (Roc de Cernia)

La carrière en fosse, ou à ciel ouvert, est répandue dans les zones où les gisements n'ont pas une grande profondeur, mais ils se déploient sur des surfaces importantes. C'est, par exemple, le cas des carrières de calcaire du Jura, des carrières du Plateau ou des carrières de granulats.

L'exploitation se fait en creusant une première tranchée jusqu'à la profondeur maximale et en exploitant ensuite les côtés. La pierre extraite et les déchets sont transportés à l'aide de dumpers. Au niveau de l'environnement, surtout de l'impact visuel, ce type de carrière produit des grands "creux".

2.2.3. Carrière en puits

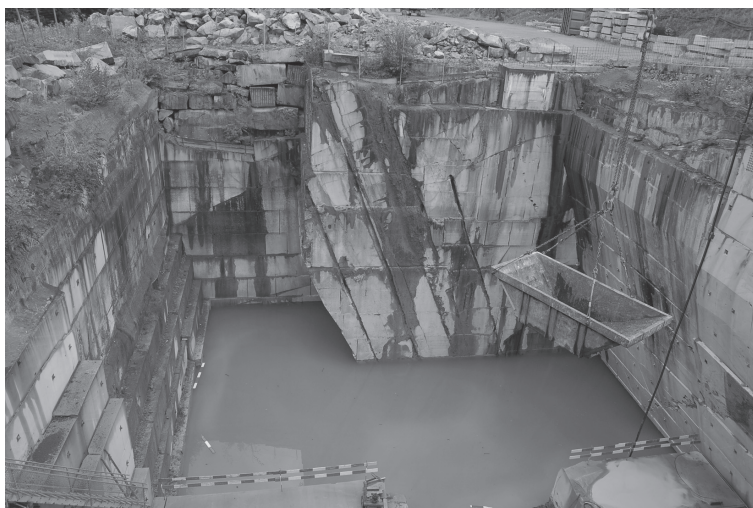


Fig. II.12. Carrière en puits dans la Molasse d'eau douce inférieure au Canton de Saint-Galle (grès de Bollingen)

Ce type est semblable au précédent, mais il est utilisé lorsque le gisement est très profond.

L'exploitation se fait en descendant dans le puits, ce qui oblige le soulèvement, normalement par un derrick, de la pierre extraite et des déchets.

Ce type est rare en Suisse, on le trouve dans les carrières de grès granitique "Brandt" et "Lehholz" près d'Eschenbach-Bollingen, SG.

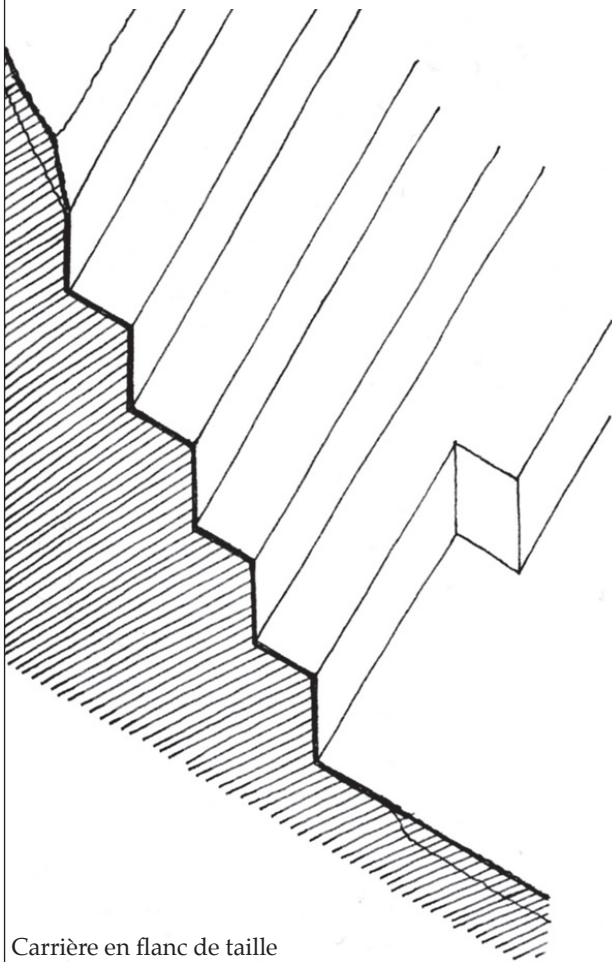
2.2.4. Carrière souterraine

Les carrières souterraines sont rares en Suisse. Ce fait est expliqué par les coûts élevés d'exploitation que cette technique comporte: stabilisation, ventilation et transport vers l'extérieur de la pierre et des déchets.

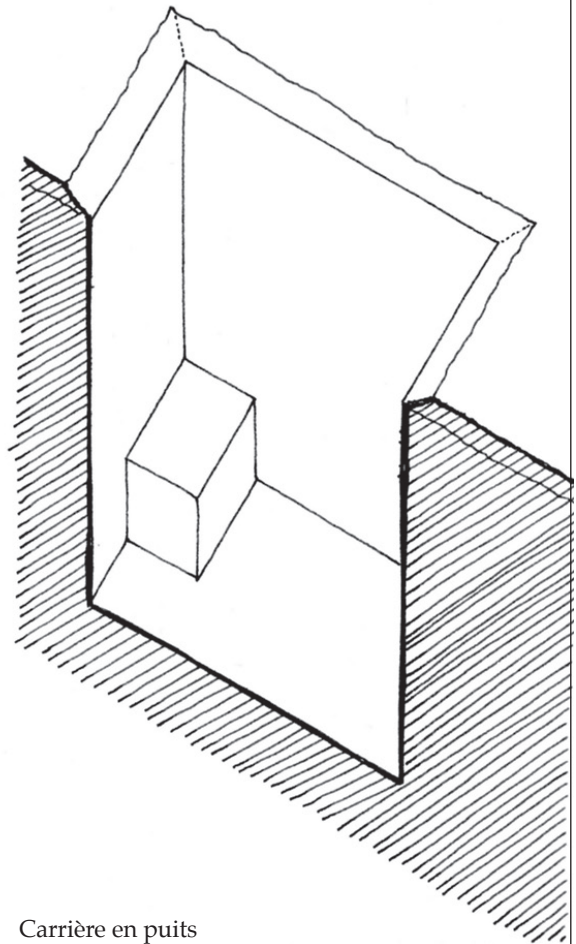
La plus importante carrière souterraine actuellement exploitée est celle de grès de la Molasse de Berne située à la Krauchthal. Elle permet notamment une exploitation lors de la période froide. Elle est donc une forme de carrière idéale pour ce type de roche particulièrement sensibles au gel à cause de l'élévée teneur en eau de la masse rocheuse.

Elle se justifie, à cause des difficultés d'exploitation et de mise en sécurité des ciels de la carrière, seulement lors de gisements de roches particulières.

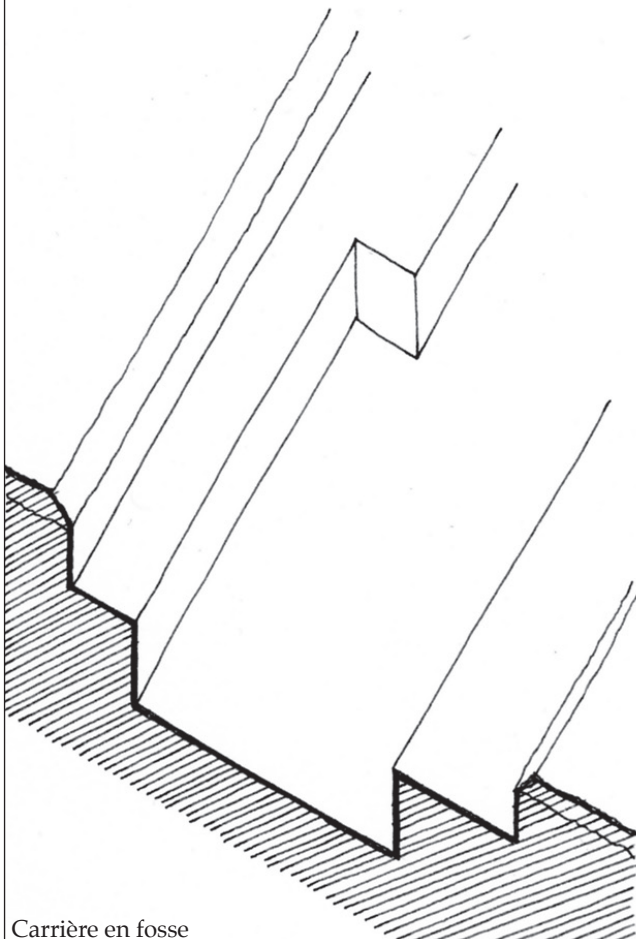
L'avantage principal de ce type de carrière est de la rendre presque invisible, en réduisant ainsi les problèmes d'impact environnemental et des nuisances sonores.



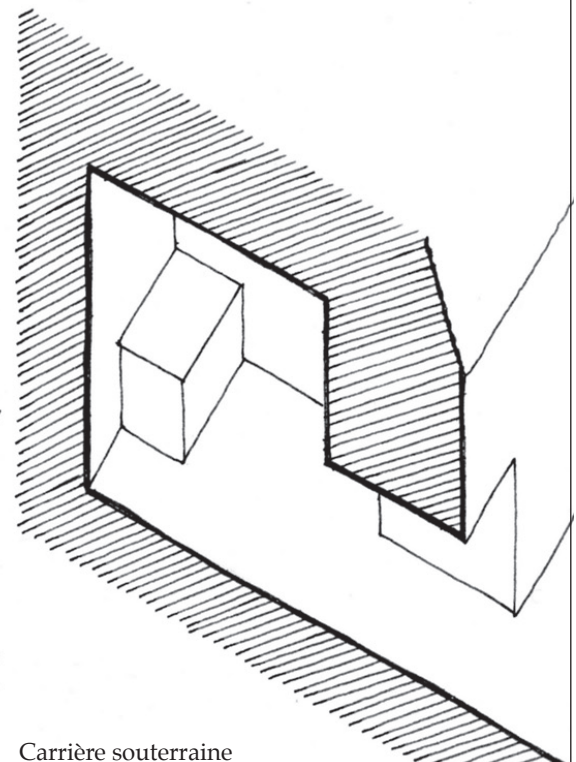
Carrière en flanc de taille



Carrière en puits



Carrière en fosse



Carrière souterraine

2.3. Techniques d'extraction

L'activité d'exploitation de la pierre naturelle commence toujours par une planification, de la part du carrier, de l'extraction: surtout en ce qui concerne la partie de gisement où extraire; la technique à utiliser et la dimension des blocs. Avant de pouvoir réaliser l'extraction proprement dite, il est nécessaire d'enlever la "découverte", c'est-à-dire la couche de terre ou de roche qui recouvre la roche à exploiter. Terminée cette première phase, le carrier peut commencer l'extraction selon des techniques qui sont traitées par la suite. Nous avons choisi d'énumérer seulement celles qui sont actuellement utilisées avec une attention particulière pour celles présentes dans les carrières suisses.

2.3.1. Planification de l'extraction

La planification de l'extraction est une phase cruciale dans le processus d'exploitation d'une carrière de pierre naturelle. Si cela était, pendant des siècles, réalisé surtout grâce à l'expérience du carrier et à sa "sensibilité", aujourd'hui le recours à l'aide d'un géologue et à différentes formes de sondages est indispensable, afin de pouvoir commencer de façon sûre l'activité extractive.

Le premier choix à faire est celui de l'emplacement de la future zone d'exploitation, dans le cas d'une nouvelle carrière, ou des nouveaux bancs à exploiter, dans une carrière déjà exploitée. Ce choix est aujourd'hui fortement contraint, en Suisse, par les différentes zones d'affectation des terrains. Cette première phase de prospection a une valeur d'*étude de faisabilité* qui doit permettre, par la suite, le choix de la technique la plus appropriée, du type de produits et de leurs usages possibles. La prospection doit être menée selon deux axes principaux: d'une part, par une recherche dans la littérature existante et, d'autre part, par des reconnaissances de terrain, qui devraient permettre de rédiger une première carte comportant la stratigraphie des roches et les infrastructures présentes. L'étude de faisabilité qui dérive de cette première phase de prospection sert pour décider si exploiter ou pas.

Si une exploitation est faisable, il faut ensuite réaliser une deuxième phase de prospection, plus précise, qui comporte des sondages profonds (forages); une représentation en trois dimensions du gisements avec les différents bancs et les discontinuités géologiques, et des éventuels essais géophysiques, pour déterminer la nature du gisement et ses propriétés. Les échantillons recueillis pendant cette deuxième phase permettent de réaliser des analyses en laboratoire pour déterminer la nature pétrographique, chimique et physique des roches présentes dans le gisement. À la fin de cette deuxième phase, il est possible de rédiger un rapport complet avec les indications pour la future exploitation.

Nous allons resumer ces différents points dans un diagramme [fig. II.13].

2.3.2. Enlèvement de la découverte

Dans toute activité d'exploitation de la pierre naturelle de taille, la première opération d'extraction correspond, dans une carrière nouvelle, à enlever la couche de découverte qui, dans la majorité des cas, recouvre la roche proprement dite. Les techniques à employer dans cette première opération dépendent: de la nature géologique de la couche de découverte; de son épaisseur; de l'accessibilité du site d'exploitation; d'une éventuelle valorisation des matériaux constituant la découverte.

Si la couche de découverte est formée par de la terre végétale ou par du terrain meuble, comme dans

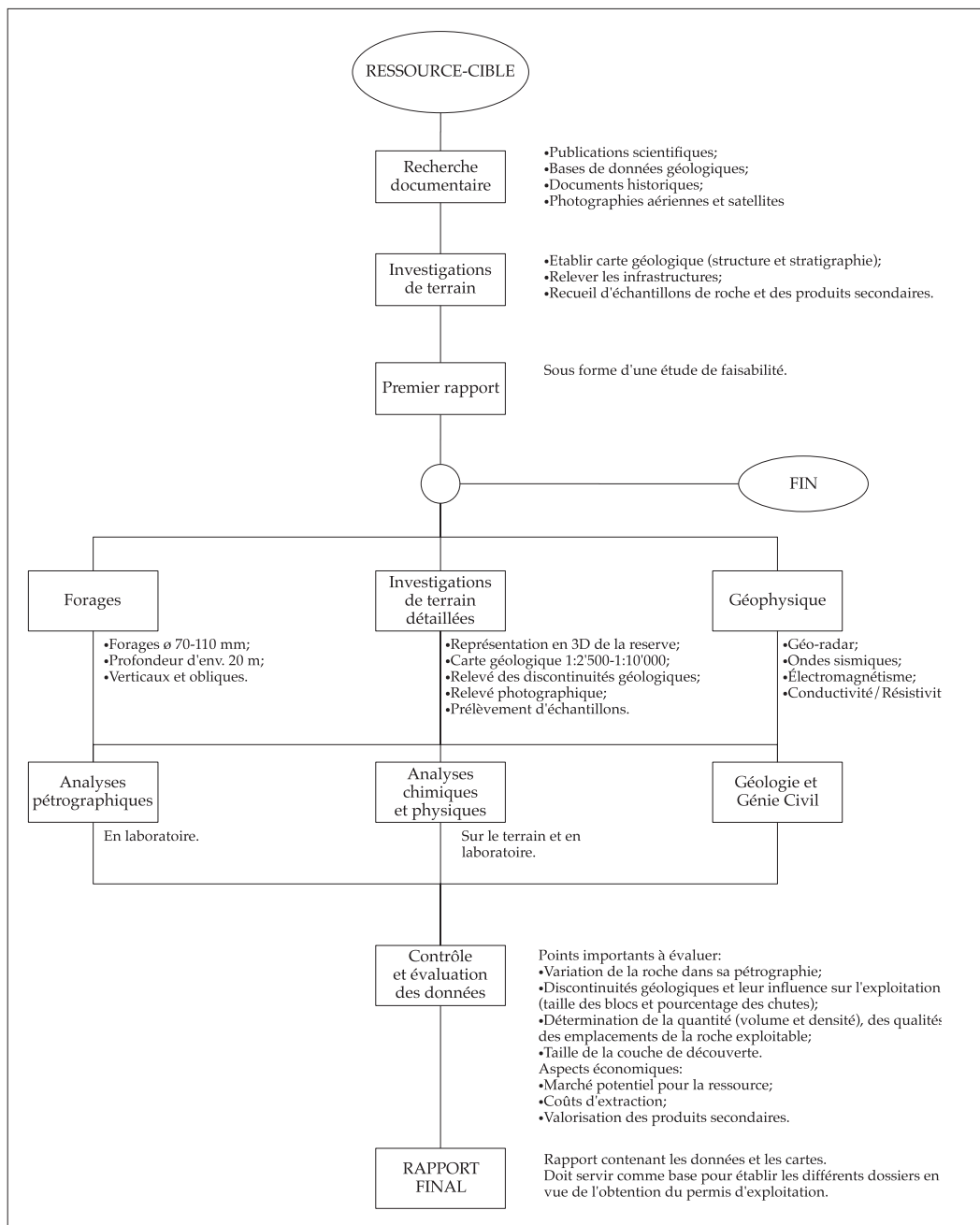


Fig. II.13. Diagramme des phases de prospection pour l'ouverture d'une exploitation [Smith, M.R., éd. 1999]

le cas d'une couche de moraine, le recours à des excavateurs permet un travail rapide ainsi que la récupération des matériaux qui peuvent ensuite être valorisés. Si cette couche est formée par de la roche, de norme moins compacte que celle à exploiter, parfois les excavateurs doivent être substitués, dans une première phase, par le recours à l'explosif. Dans ce cas de figure, il ne faut pas abîmer le gisement de roche par l'utilisation d'explosifs trop puissants ou dans des quantités excessives. Même dans ces cas, une valorisation de la roche extraite doit être envisagée.

2.3.3. Extraction de la pierre naturelle

Il n'est pas possible d'attribuer de manière univoque une technique extractive ni à un certain type de roche ni à un certain type de carrière. En effet, ce sont plutôt les caractéristiques du gisement (géologiques et morphologiques), le type de produits recherchés ainsi que la disponibilité en main d'oeuvre et en ressources (eau et énergie) qui déterminent le recours à une certaine technique d'exploitation.

La connaissance géologique et pétrographique du gisement, de ses fractures naturelles, est indispensable pour le choix de la techniques extractive. En effet, de cela dérive une première distinction: c'est-à-dire entre un gisement qui présente des fractures naturelles, qui permettent de simplement "extraire" ou mieux de "retirer" les blocs, et un gisement de roche très compacte dans lequel il faut produire des fractures [Smith, M. R., éd. 1999]. Il est clair que, dans la plupart des cas, on est confronté à des situations intermédiaires entre ces deux extrêmes. En tout cas, si des fractures naturelles sont présentes, elles peuvent être exploitées pour faciliter l'extraction et produire des blocs compacts.

Dans le cas d'un gisement présentant des fissures naturelles très marquées, il est souvent possible d'extraire les blocs par simple soulèvement. Cette action mécanique permet, par exemple, la cassure d'un bloc sur sa partie arrière quand des fractures horizontales et verticales sont présentes. Ceci est aujourd'hui produit par le biais de pelles mécaniques ou d'élévateurs à fourche montés sur des excavateurs. En Suisse, cette technique simple est utilisée dans une carrière de grès calcaire dans les Nappes Helvétiques, qui présente une stratification très marquée.

Dans le cas de gisements présentant peu de fractures naturelles, il est nécessaire de "découper" la roche afin de produire des blocs soit de la dimension requise pour les successives opérations de taille soit de grandes dimensions et qui seront redécoupés par la suite. Nous allons énumérer ici de suite les différentes techniques utilisées actuellement et leur diffusion dans les carrières suisses.

2.3.4. Coins et coins écarteurs

Celle des coins est l'une des techniques d'extraction les plus anciennes et qui nécessite un investissement en énergie très réduit: c'est avant tout un travail manuel. Les coins sont chassés à l'aide d'une masse dans des fores ou des saignés préalablement réalisées. La fracture dans la roche se produit lorsque la force latérale produite par l'enfoncement du coin dépasse la résistance à la traction de la roche. Ceci se produit souvent le long de fissures existantes ou parallèlement à des plans naturellement fragiles (comme dans le cas des plans de foliation des gneiss). Les coins écarteurs sont une évolution de la technique des coins: ils sont formés par deux éléments, un coin et deux lames métalliques qui sont écartées par l'enfoncement du coin. L'utilisation est identique à celle d'un coin simple, mais la force de cassure et la précision sont améliorées. Aujourd'hui on utilise généralement que des coins écarteurs pour l'extraction et la redécoupe des blocs de pierre naturelle. Cette technique est utilisée pour l'extraction de roches fortement stratifiées ou foliées, ou dans des régions dans lesquelles l'eau et les sources d'énergie ne sont pas disponibles ou seulement à des coûts élevés.

En Suisse, les coins écarteurs sont utilisés dans différentes carrières de gneiss du Canton du Tessin et des Grisons, pour l'extraction et la redécoupe, et dans des carrières de grès de la Molasse, pour détacher les blocs préalablement sciés ou perforés.

2.3.5. Ecarteurs hydrauliques

Dans les écarteurs hydrauliques, le coin est enfoncé par pression hydraulique, donc grâce à un circuit fermé à l'intérieur duquel circule de l'huile sous pression. La force produite est augmentée par rapport à la variante manuelle (environ 2'000 kN [Singewald, C. 1992]), mais une infrastructure composée

de l'écarteur, du réseau de tuyaux (aller et retour) et d'un compresseur est nécessaire. En plus, les écarteurs eux-mêmes sont lourds et leur manipulation moins aisée que celle des coins.

Un outil semblable, mais qui est utilisé pour séparer des blocs déjà découpés, est le "coussin hydraulique". Il sert principalement pour l'abattage de blocs dans les carrières utilisant la technique de découpe au fil diamanté.

Les écarteurs hydrauliques sont peu utilisés en Suisse; une seule carrière visitée en possédait.

Les coussins hydrauliques sont, par contre, assez répandus dans les carrières de grès de la Molasse utilisant le fil diamanté pour l'extraction de gros blocs ou de grandes plaques.

2.3.6. Mortiers expansifs

L'effet d'expansion pour l'extraction de blocs de pierre naturelle est exploité aussi à travers le recours à des mortiers expansifs et pour cette raison nous les présentons à la suite des écarteurs.

Les mortiers expansifs sont, en général, produits par mélange de silicates qui augmentent leur volume une fois hydratés. Pour leur mise en place, ils nécessitent d'être introduits dans des fores, de diamètre de 3 à 5 cm et espacés de 30 à 50 cm [Smith, M. R., éd. 1999]. Si leur expansion est lente, environ 24 heures, cet action ne produit pas de bruits ni de vibrations, ce qui représente un avantage dans des zones sensibles, comme, par exemple, en proximité des zones d'habitation. L'utilisation est, généralement, circonscrite à des roches particulièrement délicates.

En Suisse, un seul cas d'utilisation de mortiers expansifs à été recensé, dans une carrière exploitant une roche calc-silicatée au Canton du Tessin (actuellement l'exploitation est interrompue). Ce choix était dicté, d'une part, par la fragilité de la roche et, d'autre part, par la proximité d'une zone de maisons individuelles.

2.3.7. Perforation en ligne

La perforation en ligne peut être réalisée comme opération préalable à d'autre techniques d'extraction, par exemple pour l'introduction des coins écarteurs, des mortiers expansifs ou des explosifs, ou comme technique de découpe. Dans le premier cas, les fores sont espacés les uns des autres, généralement de 10 à 30 cm; dans le deuxième, ils sont juxtaposés afin de produire une césure dans la roche.

La perforation est réalisée à l'aide de foreuses à colonne soit équipées d'un moteur à combustion soit à air comprimée ou hydrauliques. Les modèles avec moteurs sont en général portatifs, mais permettent d'utiliser des florets de longueur et diamètre réduit. Les foreuses à colonnes à air comprimée sont les plus répandues: aujourd'hui elles sont souvent montées sur des bras hydrauliques et aussi en batteries. Ceci permet de réaliser simultanément plusieurs forages à la distance souhaitée. Le mouvement est rotatif avec percussion et les florets utilisés présentent différentes formes de têtes, toujours durcies au carborundum. L'équipement se compose de la colonne de forage, de différents types de florets, du tuyau d'alimentation et du compresseur pour l'air. Pour réduire la production de poussière, actuellement, on utilise soit de l'eau pour la fixer soit des bouches d'aspiration situées à proximité de la base du forage.

Cette technique est utilisée dans tous les types de roches, surtout dans celles compactes, et permet une découpe soignée à la verticale et à l'horizontale sans production notable de chutes.

La perforation en ligne est la technique la plus répandue en Suisse surtout à cause de son utilisation en parallèle avec celle des explosifs dans les carrières de gneiss du Canton du Tessin et des Grisons. Elle est utilisée aussi comme technique principale ou secondaire dans des carrières de grès de la Molasse du Plateau.

2.3.8. *Découpe par sciage*

La découpe par sciage est une technique qui s'est affirmée et répandue surtout à partir du XXe siècle dans les carrières de roches tendres et compactes. Aujourd'hui elle se réalise à travers des scies ou des fils. À la première catégorie appartiennent les scies circulaires et, plus répandues, les haveuses: c'est-à-dire des scies à chaîne qui se présentent comme des grandes tronçonneuses. Elles ont été développées pour l'exploitation en souterrain, mais elles sont désormais très utilisées aussi en surface. La haveuse à chaîne permet une grande profondeur de coupe, la lame pouvant atteindre trois à quatre mètres de long, et des découpes verticales et horizontales. Les dents de la scie sont durcis, généralement au vanadium, au carbure de tungstène ou diamantés. L'avancement des haveuses se fait le long de rails qui, dans les modèles les plus récents, sont partie intégrante de la machine. L'alimentation se fait, en général, au courant électrique. Dans le marbre, une haveuse peut atteindre une vitesse de découpe de 4 à 5 m²/h [Smith, M. R., éd. 1999] et jusqu'à 10 m², selon les données des producteurs. La machine doit être surveillée afin d'évacuer la poussière de roche produite et qui s'accumule au pied de la lame: ce travail ainsi que la majorité des manipulations et déplacements sont faits par une seule personne.

La découpe est très précise, elle ne nécessite pas d'eau et les chutes sont très réduites. L'utilisation est limitée aux roches tendres, surtout calcaires; aux grès, qui par leur abrasion nécessitent de scies particulières, et aux marbres cristallins.

Les haveuses sont utilisées en Suisse dans les carrières de roches calcaires et dans celles des grès de la Molasse du Plateau.

Les scies à fils se sont développées à partir des débuts du XXe siècle dans les carrières de la Belgique [Smith, M. R., éd. 1999] et dans celles de marbre à Carrara, in Italie, à la fin du XIXe siècle (la première entreprise à utiliser le fil hélicoïdal pour l'exploitation fut celle de Adolfo Corsi et Italo Faggioni en 1895 [Bruni, C. éd. 2008]). La première technique employée fut celle du fil hélicoïdal: un tressage de fils métalliques qui entraînaient un mélange d'eau et de poudre abrasive, surtout de la poussière de quartz ou silice. C'était une technique qui demandait une mise en place complexe, mais permettait une découpe très précise de grands blocs. Elle fut utilisée surtout dans des gisements de roches tendres homogènes, comme les marbres et les calcaires.

L'évolution de cette technique apparut dans les années 1970 dans les carrières de marbre: c'était le fil diamanté. Ce dernier est constitué par un câble d'acier avec des poches en bronze qui contiennent des éclats de diamant. La quantité et la dimension des diamants dépendent du type de roche à découper. L'installation prévoit un moteur principal, alimenté, en général, au courant électrique, monté sur rails, et des poulies pour guider et tendre le fil. Une lubrification à l'eau est nécessaire. La durée de vie, par rapport au fil hélicoïdal, est accrue et l'installation réduite. Il est toutefois nécessaire de forer deux trous, un vertical et un horizontal, pour introduire le fil. La vitesse de découpe est de 4 à

7 m²/h dans les marbres et granites et jusqu'à 15 m²/h dans les calcaires [Smith, M. R., éd. 1999]. Cette technique est de plus en plus répandue grâce à la précision de découpe, à la réduction des chutes, à la réduction des nuisances sonores et de poussières (qui sont fixées par l'eau de lubrification).

En Suisse, le fil diamanté est utilisé soit dans les carrières de grès de la Molasse, souvent couplé à d'autres techniques, comme la découpe à la haveuse, soit dans celles de gneiss pour la découpe horizontale et des premiers blocs d'un nouveau banc.

2.3.9. Explosifs

L'expansion des gaz libérés par l'explosion permet de détacher le bloc de roche du banc du gisement. Normalement l'explosif est inséré dans des trous préalablement forés dans la roche, la distance entre chaque trou étant déterminée selon le type et la qualité de la roche. La forme et la taille des blocs produits dépendent directement de la structure et de la qualité de la roche. Les seules interventions possibles sont au niveau du type et du dosage de l'explosif et de la préparation du bourrage. Les explosifs utilisés dans l'exploitation des pierres naturelles sont des explosifs brisants à haute vitesse de détonation, comme le cordeau détonant (penthrite), ou déflagrants, comme la poudre noire. Les différentes charges sont amorcées à l'aide de détonateurs, connectés entre eux afin de former une seule ligne de tir. Ces détonateurs peuvent être soit pyrotechniques, donc avec mèche à allumage, soit électriques. Cette technique a le désavantage majeur de produire des déchets abondants et de petite taille, si la roche n'est pas assez résistante, ainsi que des nuisances sonores parfois élevées. Normalement, l'explosif est utilisé pour libérer des blocs de grandes dimensions qui sont ensuite recoupés avant d'être transportés pour la taille.

Dans les carrières suisses, l'explosif est utilisé surtout pour l'extraction des roches cristallines, par exemple dans le cas des gneiss. Ce type de roche peut supporter les effets de l'explosion en produisant un minimum de chutes et fractures.

2.3.10. Flame-jet

La découpe par flamme exploite le pouvoir de la chaleur de produire des fractures dans la structure de la roche par dilatation thermique (les températures atteintes sont de l'ordre des 2'000° C [Singewald, C. 1992]). On utilise un mélange d'oxygène et d'acétylène qui permet de réaliser, dans les granites, des fentes d'une largeur de 6 à 10 cm et d'une profondeur de 5 à 20 m. Généralement, la flamme est produite par une lance portative ou montée sur un bras hydraulique, refroidie à l'eau. La vitesse de découpe est réduite: environ 0,5 à 1 m²/h [Smith, M. R., éd. 1999]. Cette technique peut être utilisée seulement dans des roches qui présentent une composition cristalline peu sensible à la chaleur, comme dans le cas des granites. L'exploitation dans les roches calcaires et dans les grès est impossible. Le bruit produit par la lance est très élevé (environ 140 dB) ce qui constitue non seulement une nuisance, mais aussi un danger, avec la flamme, pour les ouvriers qui doivent être équipés de casques et de tenues de sécurité.

Cette technique n'est pas utilisée en Suisse actuellement.

2.3.11. Water-jet

Une méthode semblable au flame-jet est celle qui exploite le pouvoir de découpe d'un jet d'eau à une pression d'environ 2'000 bar, qui produit ainsi des fentes dans la roche d'une profondeur maximale de 3 m. Les désavantages principaux de cette technique sont les grandes quantités d'eau consommées (de 80 à 120 l/min [Singewald, C. 1992]) ainsi que les bruits produits.

Cette technique également n'est pas utilisée actuellement en Suisse.

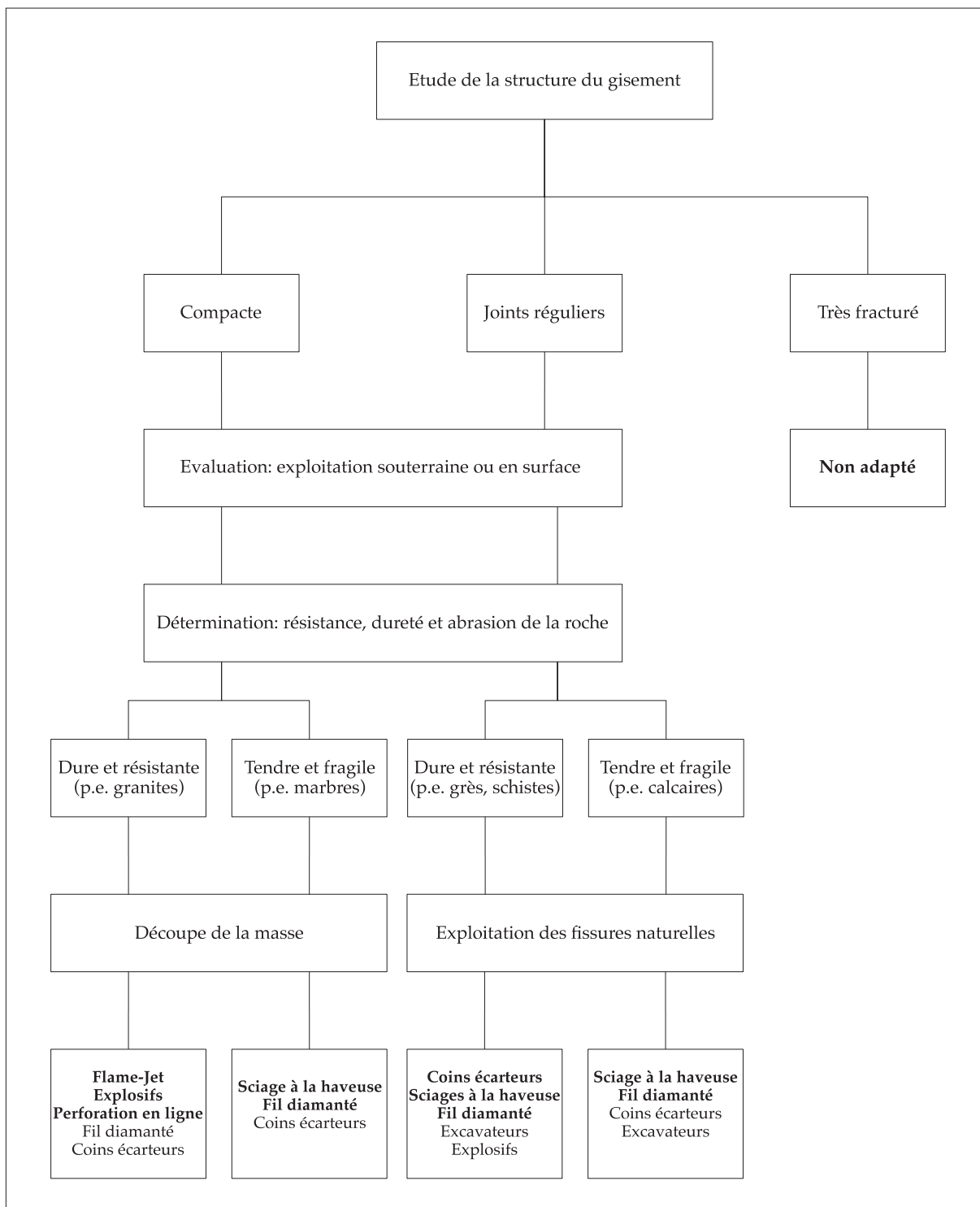
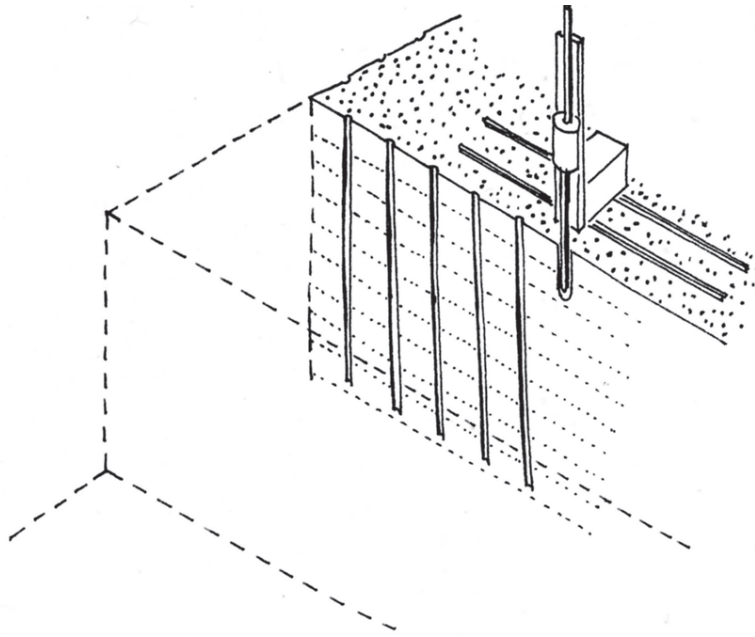
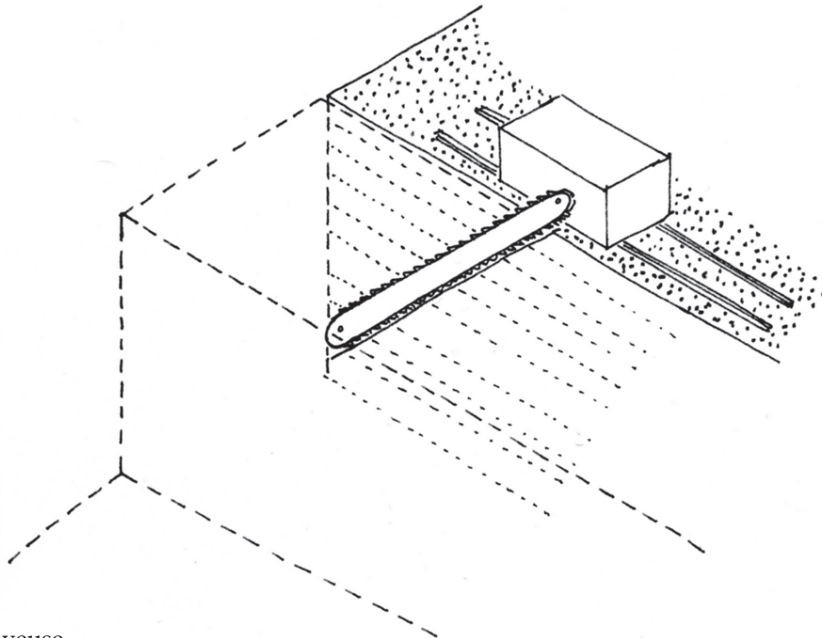


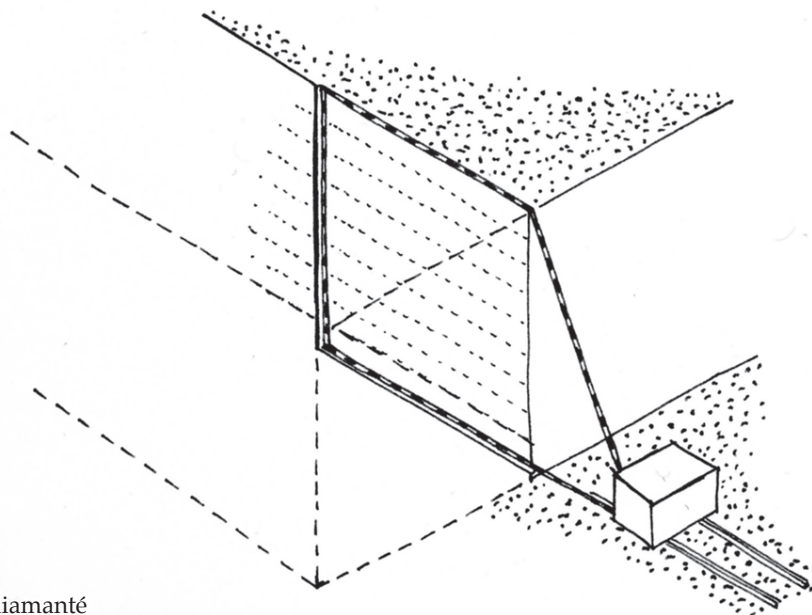
Fig. II.14. Diagramme pour le choix de la technique d'exploitation [Smith, M.R., éd. 1999]



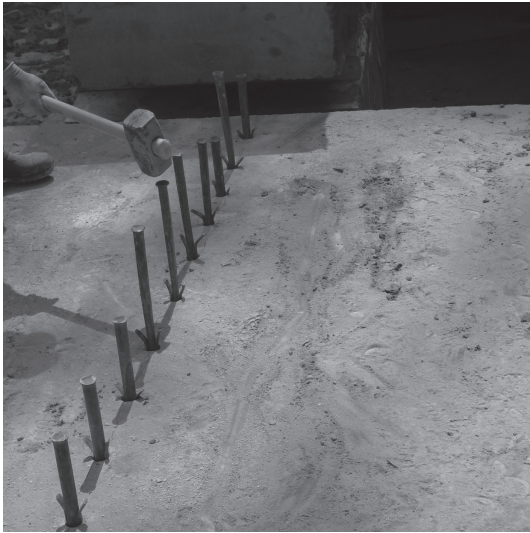
Perforation



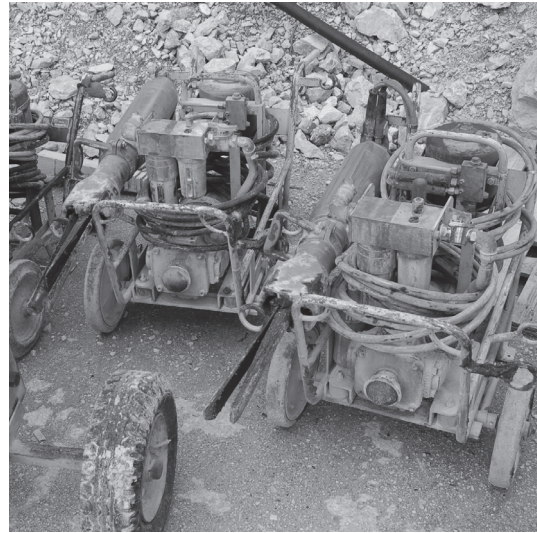
Découpe à la haveuse



Découpe au fil diamanté



Coins écarteurs métalliques



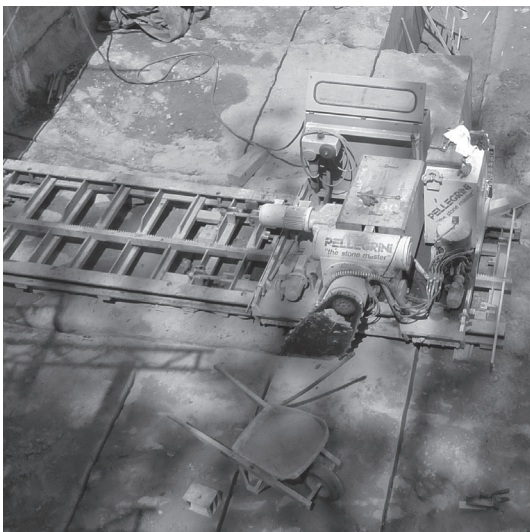
Ecarteurs hydrauliques



Pelle mécanique



Foreuse à colonne



Haveuse à chaîne



Fil diamanté

2.4. Organisation de la carrière

Le travail d'extraction en carrière est aujourd'hui fortement mécanisé. On n'a pas assisté à une vraie révolution dans les modes d'exploitation, mais plutôt à une amélioration du rendement, par le biais de nouveaux engins. Ce fait a comme première conséquence une forte réduction dans la main d'oeuvre nécessaire dans l'exploitation des gisements (voir, à ce propos, l'évolution du marché économique en ce qui concerne la taille des entreprises, au sous-chapitre II.1.2.5). Cette rationalisation est possible seulement au prix de gros investissements de la part des entreprises, ce qui peut amener soit à leur disparition soit à la persistance de modes d'exploitation qui ne sont pas efficaces. Ces investissements se partagent entre le prix d'achat des engins et, souvent sous-estimés, les coûts d'entretien des mêmes.

2.4.1. Infrastructure minimale d'une carrière contemporaine

On cite, à titre d'exemple, la dotation minimale d'une petite carrière (volume extrait de 500 m³ si exploitation de granite ou 1'000 m³ si calcaire ou grès) donnée par la revue allemande "Stein" en 1996 [Stein 1996]. On peut considérer ces données encore valables aujourd'hui pour une entreprise de cette taille.

- Un bouteur avec pelles interchangeable d'une capacité de 15 t;
- Une pelle hydraulique rétro d'une capacité de 35 t;
- Une foreuse mobile;
- Et/ou une foreuse à colonne;
- Un réservoir pour le fioul;
- Un container pour les outils et les accessoires;
- Une pièce chauffée pour les ouvriers;
- Une toilette, équipée de douche et d'eau chaude;
- Un générateur de courant électrique;
- Un compresseur pour air comprimée;
- Un poste téléphonique ou radio pour les alarmes.

Le nombre d'ouvriers formés pour l'exploitation est de deux, pour les volumes susmentionnés. Dans le cas d'exploitation par découpe, il faudra ajouter aussi une haveuse et un châssis pour fil diamanté, dans les autres cas, l'explosif.

On peut aisément comprendre les difficultés de survie des petites et moyennes carrières suisses, qui doivent aussi souvent compter sur des conditions environnementales difficiles.

2.4.2. Extraction par une entreprise tierce

Dans l'article susmentionné de 1996, et dans un autre de 2001 de la même revue "Stein" [Stadler, R. 2001], on illustre une nouvelle tendance qui amenait des petites entreprises de la pierre naturelle, et de même certains propriétaires de gisements, à confier l'extraction à des entreprises tierces spécialisées. L'entreprise allemande citée dans les articles a aussi opéré en Suisse dans deux

exploitations: l'une dans la carrière de grès coquillier de Mägenwil et l'autre dans celle de grès calcaire de la Molasse à Root, près de Lucerne (grès en plaquettes). Dans le deuxième cas, pendant trois mois au printemps 2001, trois ouvriers spécialisés, équipés d'un bouteur, d'une pelle hydraulique rétro et de deux foreuses mobiles, ont extrait environ 1'500 m³ de roche, ce qui correspond à 4'000 t. Cette réserve devrait assurer la demande pendant une à deux années.

Une extraction semblable a été effectuée pendant l'été 2007 dans la carrière de marbre de Peccia par une équipe provenant de Carrare. Ceci a permis d'extraire une réserve de 300 m³ de marbre pour les besoins immédiats et futurs [Broggini, O. 2007].

Les avantages principaux de ce mode d'exploitation sont:

- L'entreprise spécialisée possède des machines de pointe qui sont coûteuses;
- Le taux d'utilisation de ces machines est de l'ordre de 80%, contre un taux de 10 à 20% en moyenne dans une carrière;
- L'utilisation intensive demande un renouvellement constant ce qui assure de disposer toujours d'engins à la pointe de la technologie;
- Le personnel est spécialisé et mieux entraîné;
- La période d'exploitation est utilisée au maximum;
- La grande quantité extraite dans une période de temps limitée permet de constituer une réserve pour l'exploitant.

Les désavantages principaux sont:

- L'entreprise tierce a une méconnaissance de la carrière et des conditions de la roche qui demandent un certain temps d'adaptation;
- Selon l'emplacement de la carrière, les coûts de déplacement des engins peuvent être importants.

À ces arguments, soulevés dans les deux articles, on peut rajouter, dans le cas suisse, les avantages suivants:

- L'exploitation est possible aussi dans le cas de petits gisements dans des lieux géographiquement éloignés. Cela est en accord avec la thèse qui soutient que les petites carrières locales sont plus adaptées à une exploitation durable de la ressource et permettent une meilleure réutilisation des sites [Sassi, P. 2006:146];
- Les techniques de pointe de l'extraction peuvent être appliquées aussi dans les cas de petites entreprises;
- L'investissement est raisonnable pour des petites carrières;
- Il serait possible de constituer des groupes spécialisés "itinérants".

Mais d'autres désavantages doivent être pris en compte pour une évolution future de ce mode d'exploitation:

- Le raisonnement est un peu trop axé sur des critères purement économiques et de rentabilité, donc;

- Il existe un danger potentiel d'une perte de connaissances régionales liées à la pratique de l'extraction;
- Les nouvelles technologies, si elles permettent une plus grande efficacité, ne sont pas toujours les plus soutenables pour l'environnement.

2.5. Façonnage et taille de la pierre naturelle

On se limitera dans le cadre de la présente recherche à décrire les différentes techniques utilisées dans l'industrie de la pierre naturelle pour le façonnage des blocs extraits en carrière. En effet, pour une utilisation de la pierre naturelle comme élément massif dans la construction, il est important d'utiliser seulement les techniques les plus simples et les moins onéreuses.

Les techniques de taille utilisées dans les ateliers sont présentées de façon plus succincte. En effet, les dimensions des blocs massifs réduisent, en général, le recours à ces formes plus fines de découpe et travail des surfaces.

2.5.1. Façonnage en carrière

Les techniques de façonnage utilisées en carrière suivent les principes de celles d'extraction, c'est-à-dire qu'on exploite au maximum les caractéristiques propres de la roche.

Les roches qui présentent des fractures naturelles sont façonnées par cassure à l'aide de marteaux piqueurs ou de masse et coins écarteurs. Des machines hydrauliques pour la cassure existent, mais elles sont utilisées surtout pour la production de petits éléments, par exemples les dalles ou les dés pour pavés. Cela n'exclut pas de recourir à ce type de façonnage pour produire des éléments massifs pour les maçonneries. En effet, l'avantage principale d'exploiter la cassure naturelle de la roche est de produire des surfaces rugueuses qui permettent une meilleure adhérence du mortier de pose.

Les roches à structure homogène, ou si des surfaces régulières sont nécessaires, sont façonnées par découpe soit à la scie, circulaire ou à lame, soit au fil diamanté. Les scies circulaires, appelées aussi "fraises", ont, en Suisse, un diamètre maximal de 3-3,5 mètres. Elles permettent des découpes le long d'un axe sur des profondeurs maximales de 1,5 mètres, sur une longueur de 3,5-4 m, selon le type de châssis. Les châssis monolame sont, par contre, utilisés dans la découpe de roches tendres, comme les calcaires et le grès. La largeur de découpe est, normalement, de 3,6 m, pour une profondeur de 2 m, mais des châssis de plus grandes dimensions existent. Les châssis avec fil diamanté sont de plus en plus répandus dans les carrières pour le façonnage des blocs. En effet, ils permettent des grandes largeurs de découpe, de 3 à 4 m, et une profondeur de 2 à 3 m. Certains châssis permettent une découpe selon deux axes. La vitesse de découpe est, pour le moment, inférieure à celle des fraises.

Pour le façonnage de blocs de petites dimensions, ou pour une redécoupe plus soignées de certains détails, les scies à portique permettent une inclinaison de la lame de 90°, ainsi qu'un mouvement sur deux ou trois axes. Elles sont équipées de scies circulaires diamantées de diamètre pouvant atteindre les 1,8 m.

2.5.2. Taille en atelier

Les outils utilisés dans la taille des différents produits en pierre naturelle ressemblent à ceux susmentionnés pour le façonnage en carrière. Les machines seront, dans le cas de la taille, plus raffinées et permettront une plus grande précision de découpe. Selon le type de produit à réaliser et le type de pierre, il est possible d'employer différents types de machines. Aujourd'hui ces dernières sont de plus en plus automatisées, la mécanisation étant désormais une réalité, et basés sur les principes de la découpe à contrôle numérique (CNC).

Depuis la deuxième moitié du XIXe siècle, la production des plaques de revêtement se fait de façon très mécanisée, grâce aux châssis de sciage multilames. Les nouveaux châssis composés de plusieurs scies circulaires alignées permettent aujourd'hui une production accrue et la possibilité de découper selon différents plans.

Dans le domaine de la production de pièces stéréotomiques pour la maçonnerie, des marches d'escalier et de la sculpture, on dispose aujourd'hui de toute une série de machines automatisées basées sur le principe de la CNC. Des volumes complexes peuvent être ainsi produits à des coûts réduits d'après des dessins réalisés à l'ordinateur. Il s'agit surtout de machines robotisées constituées par un bras qui se déplace selon plusieurs axes, en général de trois à cinq, et d'une tête équipée d'outils de façonnage. Ces derniers sont soit des disques diamantés, soit des fraises diamantées ou au carborundum, ou encore des puissants jet d'eau à environ 2'000 bar de pression, qui permettent de réaliser des surfaces planes ou courbes selon les nécessités.

De cette brève description, on peut conclure qu'aujourd'hui la taille de la pierre naturelle est en majorité mécanisée et automatisée. Cela permet, ou même oblige, à prendre en compte dès la phase de projet les dimensions des blocs à mettre en oeuvre, ceci dans un souci d'économie de moyens, de matière, et pour permettre à la carrière d'utiliser les meilleures techniques de production. Dans d'autres cas, la connaissance préalable des techniques de taille d'une carrière particulière, influence de façon déterminante le choix des formats de la pierre.

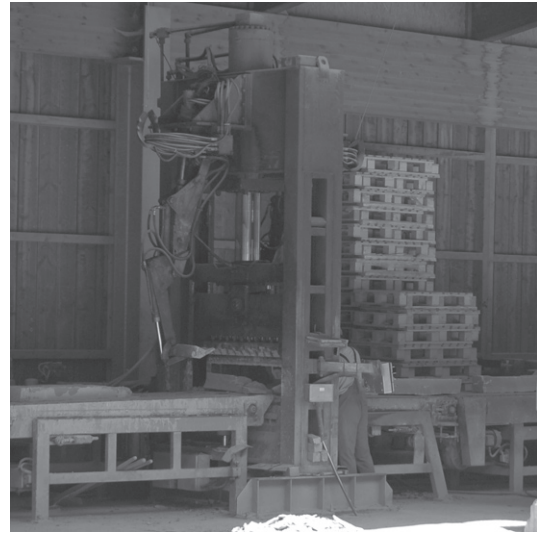
2.5.3. Outils pour la finition de surface

Dans le cas des finitions de surface, on privilégiera les finitions brutes de carrière ou de taille. Cette réduction est dictée, d'une part, par une volonté de limiter les coûts des éléments finis et, d'autre part, par la difficulté de réaliser des finitions de surface particulières sur des éléments de grandes dimensions. Dans certains cas, ou pour des roches spécifiques, il est nécessaire de réaliser des traitements de surface particuliers; on en décrira les principaux.

Les différentes machines utilisées pour la finition des surfaces sont composée, normalement, d'un bras mobile sur lequel est monté l'outil. C'est le cas des polisseuses, qui permettent de réaliser des finitions qui vont de celle égrisée à celle polie, par changement du degré d'abrasion des têtes rotatives; des sableuses et des machines de flammage. Pour la production des plaques de revêtement, avec différents degrés de polissage, des lignes de production complètes existent désormais, comportant aussi des fraises pour le calibrage des pièces.



Découpe manuelle
Cassure selon plans de clivage
Coins écarteurs et masse ou écarteurs hydrauliques
Dimensions selon la taille du bloc



Découpe hydraulique
Cassure selon un plan
Presse hydraulique
Hauteur maximale du bloc 100 cm



Découpe au fil diamanté
Découpe selon un plan
Châssis avec fil diamanté
Hauteur maximale du bloc 250 cm



Sciage
Découpe selon un plan
Châssis monolame
Hauteur maximale du bloc 180 cm



Sciage (fraisage)
Découpe selon un plan
Châssis avec scie circulaire diamantée
Profondeur maximale de découpe 130 cm



Sciage (fraisage)
Découpe selon deux plans
Châssis avec scie circulaire diamantée
Profondeur maximale de découpe 50 cm

Les outils pour les finitions manuelles des surfaces sont aujourd'hui, pour la plupart, pneumatiques; c'est-à-dire que la percussion de l'outil se fait non pas grâce à un perceur, massette ou maillet, mais par le biais d'un piston à air comprimée. Ces traitements, très variés, portent le nom de l'outil qui les produit. L'objectif principal est celui d'obtenir des surfaces qui exaltent les caractéristiques de la texture de la pierre par le biais de la lumière. En effet, chaque surface "accroche" la lumière de manière différente. De plus, certaines finitions augmentent la durabilité de la pierre et, au moins, permettent qu'elle se patine de manière homogène. Les principales finitions, applicables aussi dans le cas d'éléments massifs de grandes dimensions, sont celle bouchardée, selon différentes tailles des dents de la boucharde; brochée; au taillant et à la gradine.

2.6. Dimensions des blocs extraits

Dans l'exploitation des carrières de pierre naturelle, la logique veut que les dimensions de l'élément à tailler se reflètent dans les dimensions du bloc de pierre extrait et ceci depuis les débuts de cette activité. Cela se traduisait, dans le passé, par une extraction de blocs de différentes formes et dimensions pour la production d'éléments massifs pour la construction ou la décoration. Colonnes, pilastres, chapiteaux de différents ordres, moulures, cadres de fenêtres ou corniches étaient autant de produits de formes et de dimensions très différentes. Aujourd'hui, la plus grande partie de la production d'éléments en pierre naturelle se base sur la plaque mince, pour les revêtements: sols, parois, façades et plans de travail pour les cuisines. Les plaques sont produites par la découpe d'un bloc, en général de grandes dimensions. Cela permet de réduire la quantité de chutes et favorise une production maximale de sous-éléments. Les machines utilisées sont soit des châssis multi-lames, des scies multi-disques soit des disques diamantés de grand diamètre. La dimension des blocs extraits dépend donc, en large partie, des dimensions maximales des blocs que les machines peuvent travailler.

Il est important de rappeler qu'avant d'être commercialisé un bloc de pierre subit, en général, plusieurs découpes successives afin d'atteindre les dimensions souhaitées. En règle générale, les blocs extraits de la carrière sont de grandes dimensions, et ils sont ensuite partagés afin de pouvoir être transportés et vendus.

Les dimensions actuelles du "bloc marchand", c'est-à-dire du bloc commercialisé, sont déterminées d'une part par les contraintes naturelles de la roche et du gisement, et d'autre part, par la capacité des machines utilisées dans la découpe. Ceci peut amener à une production de "blocs marchands" de dimensions différentes selon les acheteurs. Il est difficile d'établir de façon univoque les dimensions du bloc marchand idéal. Pour l'italien Piero Primavori, la dimension idéale du bloc pour la production de plaques serait de 8 à 9 m³, ce qui correspond à environ 3 x 1,75 x 1,75 m [Primavori, P. 1997]. Ces dimensions sont atteignables dans des gisements de pierres cristallines ou métamorphiques qui ne présentent pas de fractures ou fissures. Il est difficile de les atteindre dans des roches sédimentaires. Il est clair que l'auteur se réfère ici surtout aux gros gisements exploités massivement dans le monde. D'un autre avis, Christian Singewald, auteur allemand, qui essaie d'établir les dimensions minimales du bloc, correspondant à un volume de 0,5 m³ et à une épaisseur de 0,4 m, ce qui se traduit dans un bloc de 1 x 1 x 0,4 m [Singewald, C. 1992:33]. Cette dernière dimension est directement liée à la hauteur

minimale, selon l'auteur, des bancs d'une carrière exploitable pour en extraire de la pierre naturelle. La différence avec les dimensions reportées par Piero Primavori est épatante, mais dans l'étude de Christian Singewald, les exemples sont composés uniquement par des gisements en Allemagne où les grès sont prépondérants: leur stratification est donc un critère déterminant pour l'exploitation.

L'importance de la possibilité d'extraire des blocs qui correspondent aux dimensions dictées par le marché est bien exprimée par la notion de "potentiel en blocs extraits" ("Rohblockhöffigkeit") énoncée par Christian Singewald [Singewald, C. 1992:46]. En effet, l'auteur, partant des dimensions minimales du bloc, les confronte avec les contraintes naturelles du gisement, hauteur des bancs, fissures, failles. Ces mesures sont déterminées sur place à l'aide de relevés, sondages et prospections. Le discriminant étant les dimensions du bloc minimal, il est ainsi possible de reporter, sous forme de pourcentages, le potentiel du gisement selon les trois axes cartésiens, représentant la longueur, la largeur et l'épaisseur du bloc. Ce type de démarche, en soi intéressante pour évaluer une exploitation, présente la limite d'être liée directement à une situation actuelle du marché de la pierre. En outre, elle ne considère pas, ou très marginalement, le fait que l'exploitation d'une carrière pour être vraiment rentable, et aussi durable, devrait aussi se baser sur la valorisation des matériaux extraits. On devrait donc prendre en compte le potentiel de production de blocs, mais aussi les autres débouchés commerciaux possibles pour les "chutes". Une connaissance systématique de ce paramètre du "potentiel en blocs extraits" constitue de toute façon une excellente base de départ pour toute réflexion autour de l'ouverture ou de la gestion de l'exploitation d'une carrière de pierre naturelle. Une démarche semblable pour l'évaluation du projet de faisabilité dans l'ouverture d'une nouvelle carrière est reportée dans l'ouvrage anglais susmentionné de Smith [Smith, M. R., éd. 1999] (voir le sous-chapitre II.2.3.1).

2.7. Manutention et transport en carrière

La manutention et le transport des blocs extraits diffèrent dans les techniques selon le type de carrière. Dans une carrière en fosse, si l'accès se fait depuis la sommité, des rampes sont normalement aménagées, ou alors on accède directement au plan de carrière par une ouverture de l'enceinte. Les blocs extraits sont généralement déplacés par bouteur jusqu'à la zone de stockage ou, dans le cas d'un transport en dehors de la carrière, ils sont chargés directement sur des camions.

La situation se complique dans le cas des carrières en puits, parce qu'un accès direct pour les véhicules n'est pas aménageable. Dans ce cas de figure, on fait recours à un derrick ou à une grue pour la manutention verticale des blocs et des engins. Chaque bloc extrait est donc soulevé du puits et posé dans le stock ou chargé sur camion pour être transporté.

Dans une carrière en flanc de taille, on peut trouver deux situations: c'est-à-dire des accès avec des rampes qui montent au niveau des bancs en exploitation ou un derrick qui sert à descendre les blocs extraits.

Les accès aux carrières souterraines permettent, en général, aux engins de déplacer directement les blocs extraits depuis la chambre vers l'extérieur. Dans le cas de très grandes carrières, même les camions de transport peuvent rentrer et être directement chargés.

2.8. Situation actuelle du marché

Une organisation des sous-chapitres comme celle adoptée pour la partie historique a été retenue afin de permettre une confrontation aisée des données.

2.8.1. Le marché mondial de la pierre naturelle

Les données disponibles sur le marché mondial de la pierre naturelle sont disparates et, surtout en ce qui concerne la production, basées sur des estimations ou sur des valeurs qui ne peuvent pas être vérifiées. La société italienne *Internazionale Marmi e Macchine Carrara*, fondée en 1978, publie, depuis 2001 "Stone Report" qui est une analyse des données statistiques internationales et italiennes visant à donner un portrait général du marché de la pierre naturelle. On se base sur l'édition de 2007 [Immcarrara 2008] et sur les données de 2008, disponibles en ligne [Immcarrara 2009]. Selon les données publiées, qui se réfèrent à 22 pays, parmi lesquels la Suisse ne figure pas, la production mondiale de pierre naturelle a été en 2007 de 105'446'577 tonnes. Les premiers sept pays producteurs, sont dans l'ordre: la Chine; l'Inde; l'Iran; l'Italie; la Turquie; l'Espagne et le Brésil, qui ont produit le 85% environ des pierres naturelles (la Chine produit environ 20%, de même que l'Inde). À titre d'exemple, la France, considérée en Suisse comme un important pays producteur, a une production qui équivaut environ à 1% de la production mondiale. Il faut considérer que ces chiffres de production concernent probablement la quantité de pierre naturelle utilisable extraite en carrière, il faudrait donc ajouter à celle-ci la quantité de chutes afin d'avoir des valeurs sur la quantité de pierre naturelle exploitée.

Si l'on reprend la valeur de production pour la Suisse, reportée dans l'analyse historique du secteur économique, donc 400'000 tonnes, et qu'on la compare avec la production mondiale de 2007 (on considère que la production n'a pas varié depuis 2001), celle-ci correspondrait à environ 0,4% de la production mondiale. Cette valeur correspond au double de celle reportée par Bradley [Bradley, F. 2002], pour la production suisse en 2001, mais Bradley utilisait dans son analyse une valeur de production de 150'000 tonnes, qui correspond vraisemblablement seulement à la pierre naturelle utilisable (voir l'analyse susmentionnée de cette valeur au sous-chapitre II.1.2.6).

2.8.2. Distribution géographique des carrières

L'évolution du secteur de l'exploitation s'est faite, à partir des années 1990, de façon à renforcer les régions où cette activité avait survécu. Les zones de plus grande présence de carrières en Suisse restent le versant sud des Alpes, surtout les cantons des Grisons et du Tessin, ainsi que la région du Plateau, dans laquelle les gisements exploités se concentrent désormais autour de Berne, Fribourg, le lac de Zurich et celui de Constance. Le déclin de l'activité d'extraction de la pierre naturelle en faveur de celle des granulats s'est confirmé dans le Jura suisse.

L'analyse des données recueillies montre que les entreprises encore actives dans l'exploitation sont soit des entreprises de longue tradition, ouvertes avant 1910, soit des entreprises qui ont été ouvertes pendant la période de croissance économique des années 1950-1980.

2.8.3. Types de roches exploitées

Les types de roches exploités ont été fortement réduits par la concentration progressive de l'activité

d'exploitation dans un nombre réduit de régions de notre pays. Les roches les plus exploitées, actuellement, sont les gneiss des Nappes Penniques des Grisons et du Tessin. Les grès de la Molasse sont exploités surtout dans les gisements orientaux de l'Est du Plateau, dans lesquels nous trouvons des types plus compacts et qui présentent donc une meilleure résistance aux agents atmosphériques, et dans les gisements du Burdigalien entre Berne et Fribourg. Il est important de noter que l'exploitation des grès est fortement tributaire des chantiers de rénovation et restauration des monuments historiques des principales villes du Plateau. Les calcaires du Jura sont désormais exploités seulement dans deux gisements. Il y a eu dans les dernières deux décennies une disparition progressive de l'exploitation des roches ornementales colorées, tels les brèches, les marbres et les serpentinites. Le seul gisement de marbre exploité actuellement est celui de Peccia, dans le canton du Tessin, mais seulement de façon intermittente ⁵.

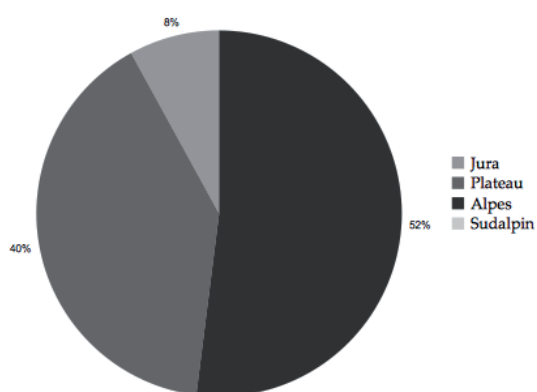


Fig. II.15. Localisation géographique des carrières à l'intérieur de l'échantillon de celles visitées

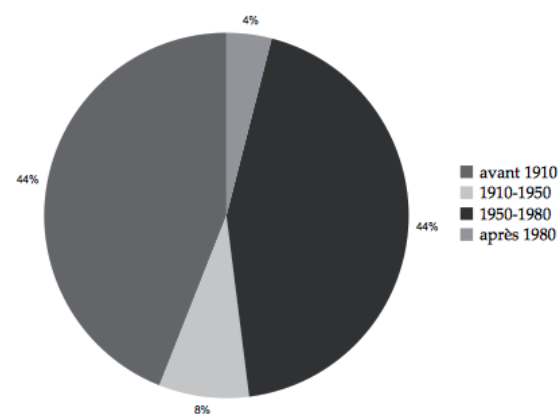


Fig. II.16. Date d'ouverture des carrières à l'intérieur de l'échantillon de celles visitées

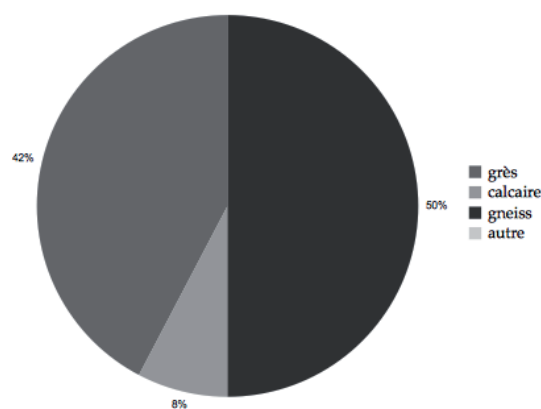


Fig. II.17. Types de roches exploitées à l'intérieur de l'échantillon des carrières visitées

2.8.4. Nombre et taille des entreprises

Selon le Recensement des Entreprises de 2005, le nombre d'entreprises actives dans l'exploitation de pierres naturelles ornementales était de 63. Les places de travail, en emplois équivalents un temps plein, étaient de 848. Les entreprises étaient toutes de taille petite à moyenne, et aucune d'elles n'avait plus de 49 emplois équivalents un temps plein.

5. La dernière exploitation a été effectuée pendant l'été 2007 [Broggini, O. 2007].

Les 23 entreprises visitées comptent, à elles seules, plus que la moitié des places de travail (537 emplois, soit 63%). Ceci confirme le fait que ces entreprises sont les plus grandes de notre pays. La moyenne est de 24 employés par entreprise, avec un maximum de 50.

Le secteur entier de l'extraction et de la taille de la pierre naturelle ornementale comptait 548 entreprises en 2005, pour 5'814 emplois, équivalents un temps plein.

2.8.5. Production

Des données sur la production totale de pierre naturelle au niveau Suisse n'existent pas ni pour la quantité de matière extraite ni pour celle commercialisée. Lors des visites effectuées, le volume de pierre exploitée était demandé. Nous disposons donc d'une valeur totale pour les 23 entreprises recensées et elle correspond à 225'600 m³. Cette valeur semble démontrer que la production a augmentée depuis les travaux de Schwarz qui donnait une valeur de 215'000 m³ pour l'ensemble des entreprises suisses [Schwarz, H. 1983:105] et les données publiées par Bradley en 2002 qui confirmaient cette valeur (voir le sous-chapitre II.1.2.6).

Les données recueillies montrent aussi que la production annuelle par entreprise a augmenté: dans les entreprises recensées elle est, en moyenne, de 11'000 m³, et au maximum de 30'000 m³. Il est clair que la moyenne totale est inférieure vu que celle obtenue est relative aux plus grandes entreprises de notre pays qui ne constituent qu'environ un tiers de l'ensemble. En tout cas, si on se limite à cette donnée, la production moyenne est augmentée d'environ dix fois depuis les années 1910-1915 et aussi depuis les années 1980, parce que Schwarz notait à l'époque que ces quantités n'avaient pas vraiment évoluées depuis les débuts du XXe siècle [Schwarz, H. 1983:103].

Cette augmentation des quantités de pierre naturelle exploitées nous permet de faire deux observations: en premier lieu, cette évolution peut être lue comme une amélioration produite par la modernisation des techniques d'exploitation au niveau des principales carrières suisses; d'autre part, elle pourrait aussi être le fruit d'une pression grandissante sur les peu de gisements encore exploités, ce qui induit naturellement une augmentation de l'extraction.

Cette dernière hypothèse est moins positive que la première parce que, non seulement elle pourrait signifier que ces gisements risquent d'être épuisés plus vite, mais aussi parce qu'une grande exploitation implique un plus grand impact au niveau de l'environnement. Si l'épuisement est, dans la majorité des cas, fort peu probable, les impacts environnementaux sont à considérer, surtout au niveau de la politique générale pour l'attribution de nouveaux permis d'exploitation ou pour la réouverture d'anciens sites de carrières. Ils peuvent aussi entraîner des critiques et des oppositions à l'activité d'exploitation de la part de la population, comme dans le cas des carrières de granulats.

2.8.6. Importations et exportations

L'analyse des données récoltées pendant les visites des carrières suisses permettent d'énoncer, qu'en règle générale, le marché interne est le principal débouché pour la majorité des entreprises. Les exportations se font vers l'Europe et surtout vers les pays limitrophes, comme l'Allemagne qui reste l'un des principaux acheteurs des produits suisses, autant des grès gris du Plateau que des gneiss des Nappes Penniques.

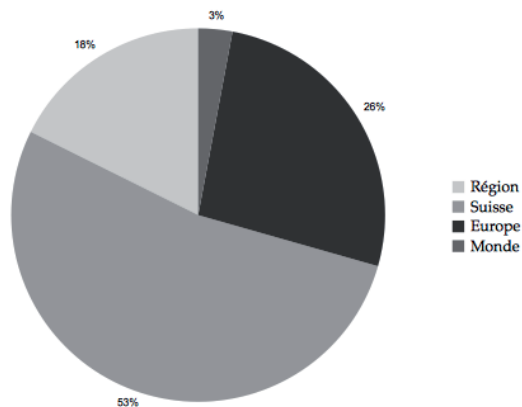


Fig. II.18. Marchés principaux de vente de la pierre naturelle produite, à l'intérieur de l'échantillon des carrières visitées

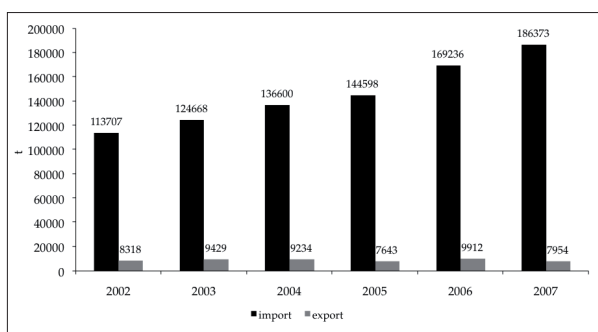


Fig. II.19. Imports et exports en tonnes de pierre naturelle entre 2002 et 2007, données fournies par l'Administration Fédérale des Douanes

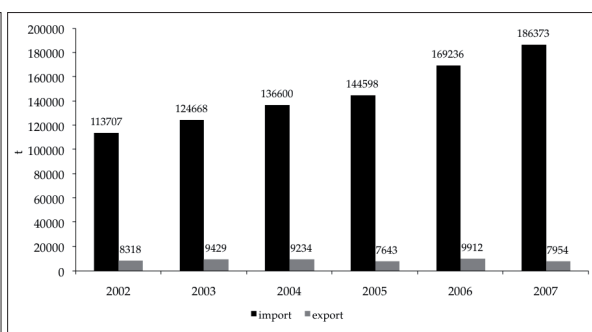


Fig. II.20. Imports et exports en tonnes de pierre naturelle de construction et de taille entre 2002 et 2007, données fournies par l'Administration Fédérale des Douanes

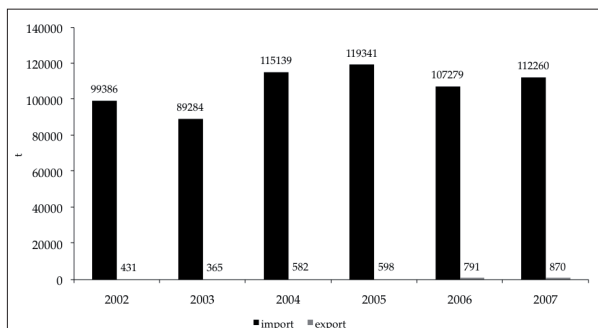


Fig. II.21. Imports et exports en tonnes de marbres et travertins entre 2002 et 2007, données fournies par l'Administration Fédérale des Douanes

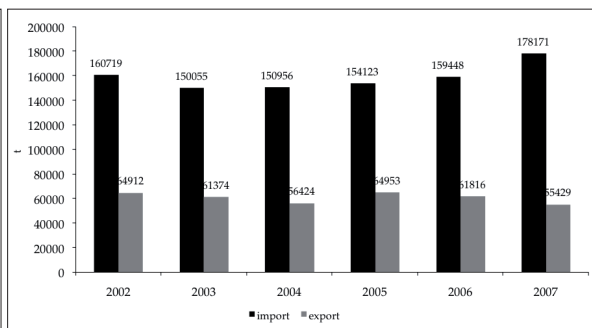


Fig. II.22. Imports et exports en tonnes de granites entre 2002 et 2007, données fournies par l'Administration Fédérale des Douanes

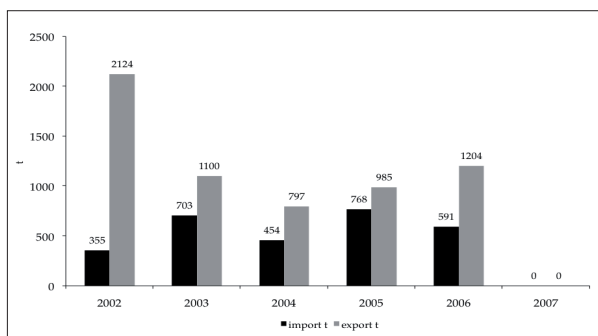


Fig. II.23. Imports et exports en tonnes de grès entre 2002 et 2007, données fournies par l'Administration Fédérale des Douanes

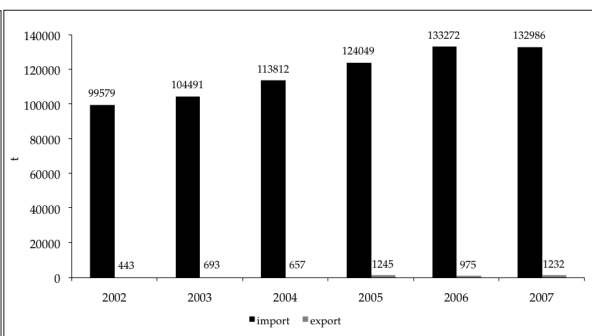


Fig. II.24. Imports et exports en tonnes de pavés, bordures et dalles, entre 2002 et 2007, données fournies par l'Administration Fédérale des Douanes

Les données des importations et exportations sont celles fournies par l'Administration Fédérale des Douanes et se réfèrent à la période 2002-2007. Cette recherche n'étant pas focalisée sur l'analyse économique du secteur des pierres naturelles, ces données servent néanmoins à comprendre quels sont les types de produits les plus demandés par le marché intérieur et où le secteur national arrive même à exporter des matériaux et des produits. Nous avons donc sélectionné et élaboré en graphiques seulement les données générales et celles liées aux pierres naturelles brutes et dégrossies: des types de matériau qui sont traités dans le cadre de la présente recherche.

Premièrement, des données générales des importations et exportations de pierre naturelle, de 2002 à 2007, on conclut que l'importation de pierre naturelle en Suisse est environ neuf fois et demi supérieure à l'exportation. Le marché intérieur demande donc de la pierre naturelle que notre pays n'arrive pas à fournir soit par manque de gisements de roches de ce type, soit par un prix de revient non concurrentiel.

Les valeurs des marbres et travertins montrent que notre pays importe ces types de roches sous forme d'éléments à travailler ou de produits finis. Dans ce cas, le fort écart entre importation et exportation dépend du manque d'exploitation de ce types de pierres en Suisse, une seule carrière de vrais marbres étant en activité.

Les considérations faites pour les marbres sont aussi valables pour les granites, mais dans cette catégorie la Suisse possède des gisements, surtout de gneiss, qui sont en général considérés avec les granites. Les importations dérivent probablement de la différence de prix de revient entre les produits locaux et ceux des grands producteurs étrangers, tels la Chine, l'Inde ou les pays de l'Est de l'Europe.

Les valeurs des grès n'étant pas disponibles pour 2007, les données de 2006 démontrent la tendance vers une exportation de matériaux bruts et une importation de produits finis. Ceci pourrait en partie s'expliquer par le fait que certains types de pierres indigènes sont découpés à l'étranger, ou alors que des grès étrangers ont des prix et des caractéristiques qui les font préférer aux locaux. C'est le cas, dans la restauration, pour les pierres de substitution des types suisses qui ne sont plus exploités.

Les valeurs des importations et exportations de pavés, bordures de trottoirs et dalles en pierre naturelle démontrent que la Suisse a importé ces dernières années de grosses quantités de ces produits, qui étaient historiquement issus des carrières locales, ou pendant le XXe siècle, exportés depuis le canton du Tessin et des carrières alpines vers le reste du pays. La tendance actuelle est de préférer des produits étrangers de prix inférieur.

3. PIERRES SUISSES POUVANT ÊTRE UTILISÉES DANS LA CONSTRUCTION MASSIVE

Les critères de choix des types de roches pouvant être utilisés comme pierre pour la construction massive sont énoncés ici. À partir de là, il est possible d'établir une liste des roches, de leurs caractéristiques et de parvenir à définir les dimensions des éléments.

3.1. Critères de sélection

3.1.1. Propriétés pétrographiques et physiques

La principale caractéristique pétrographique à considérer dans le choix d'une pierre de construction est son altérabilité qui devrait être la moindre possible. Il faut privilégier les roches les plus résistantes aux attaques des agents atmosphériques. À défaut, des solutions de mise en oeuvre doivent être utilisées afin d'assurer la durabilité des éléments. L'analyse et la connaissance de l'emploi historique d'un certain type de pierre naturelle ainsi que de son comportement dans le temps sont des éléments à considérer lors de l'évaluation et de la détermination de son altérabilité.

En ce qui concerne les caractéristiques physiques, qui sont liées à la nature et à la structure de la roche, le coefficient d'absorption d'eau est une valeur à considérer de façon prioritaire. En effet, les roches qui présentent une faible valeur d'absorption d'eau sont moins exposées aux dégradations, du fait que leur vecteur principal est constitué par l'eau.

Pour une utilisation sous forme massive des pierres naturelles de construction, le coefficient de dilatation thermique linéaire ou la conductibilité thermique sont de moindre importance. En effet, la dilatation linéaire d'un élément massif est très réduite par le fait que la masse de l'élément absorbe la majorité de l'énergie sans pour autant que la température augmente de manière significative et sans produire donc de déformations. La conductibilité thermique des roches étant en tout cas élevée, cette valeur renseigne sur leur comportement thermique, mais ne peut pas être utilisée comme critère significatif pour leur choix. Par exemple, si la pierre naturelle doit être employée pour une enveloppe, il est préférable de choisir un type qui présente une valeur faible de conductivité thermique, mais dans la réalisation d'éléments d'accumulation du rayonnement solaire, une roche qui possède une forte conductibilité permet d'améliorer la vitesse d'échange entre l'élément et l'air ambiant.

3.1.2. Propriétés mécaniques

La principale propriété mécanique pour une pierre de construction est sa résistance à la compression, parce qu'elle est de préférence utilisée dans des maçonneries. Une grande résistance à la compression permet de réduire les sections des éléments en pierre naturelle, ce qui correspond à un gain de matière et de surface.

La résistance à la flexion est considérée comme moins déterminante du fait que dans une utilisation conséquente de la pierre naturelle, il faut éviter tout effort de traction dans la structure. Cette valeur est à considérer lors de l'utilisation de la pierre pour des éléments porteurs horizontaux, tels les architraves et les consoles.

3.1.3. Propriétés industrielles

On entend par "propriétés industrielles" toutes les caractéristiques qui découlent de l'exploitation de la roche et du marché la pierre naturelle.

Le principal critère considéré est celui de la disponibilité de la ressource et de son exploitation industrielle. Les carrières exploitées de façon intermittente ne permettent pas d'envisager l'utilisation de grandes quantités de pierre naturelle. L'exploitation industrielle permet, par contre, de disposer de blocs de forme régulière et de dimensions importantes, qui sont la base d'une nouvelle forme de construction en pierre massive. Ceci influence le coût des éléments: la régularité de forme, par exemple, réduit le recours à des longs procédés de découpe qui génèrent en même temps des chutes. Il est clair que pour une construction particulière, située dans un contexte géographique précis, l'utilisation d'une roche locale peut justifier le recours à des éléments de forme et de taille spéciale.

Le coût de la matière première n'a pas été pris en considération parce que, d'une part, pour une recherche académique, il serait réducteur de restreindre les possibilités à cause d'un critère dicté par des logiques de marché et, d'autre part, le prix des pierres est souvent une conséquence du volume utilisé.

3.1.4. Propriétés esthétiques

La texture et la couleur sont des critères de choix qui sont actuellement déterminants dans le choix des pierres naturelles, ceci parce qu'elles sont souvent employées comme matériau de revêtement et de décoration. Dans le cas d'une utilisation de la pierre naturelle comme matériau de construction pour les structures, les critères d'aspect doivent être mis au deuxième plan, ceci permet l'utilisation de roches qui présentent des défauts au niveau de la texture.

3.2. Types sélectionnés

Les types de roches utilisables pour la construction sous forme massive ont été choisis entre le nombre restreint des roches actuellement exploitées en Suisse.

Les roches décoratives et à haute valeur commerciale, tels les marbres de Peccia et les brèches d'Arzo, ont été exclues aussi parce que leur exploitation est réduite, et, en ce qui concerne les brèches, leur altérabilité et résistance mécanique les rendent très délicates dans des applications structurelles⁶.

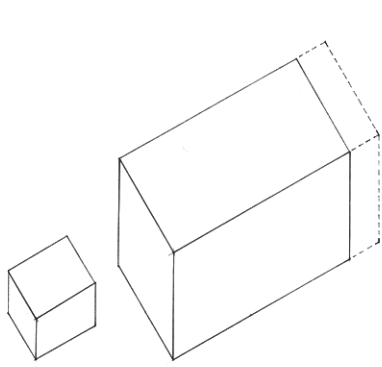
Les serpentinites et les amphibolites, exploités dans la zone alpine, ont été aussi exclus du fait que leur exploitation est réduite et leur caractéristiques mécaniques ne les rendent pas aptes à une utilisation dans la construction. Il en est de même pour les roches calcaires colorées, dont l'exploitation est fortement réduite par rapport au passé et dont l'application se limite à la décoration.

Les schistes ont été aussi exclus surtout par le fait que leur structure en plaques les rendent difficilement exploitables et utilisables dans la construction massive selon des procédés industriels. Ils restent un parfait matériau de revêtement, également pour les enveloppes extérieures.

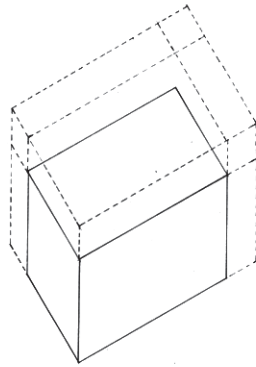
Les granites sont exclus par le fait qu'ils ne sont plus exploités.

6. La carrière de Arzo a cessé d'être exploitée en octobre 2009.

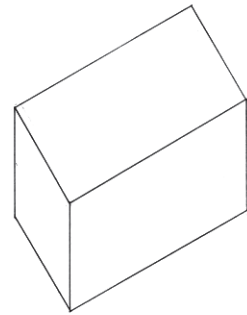
PLANCHE V - DIMENSIONS DES BLOCS EXTRAITS



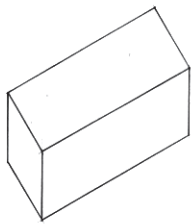
Gneiss type Andeer



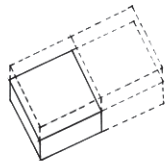
Gneiss type Calanca



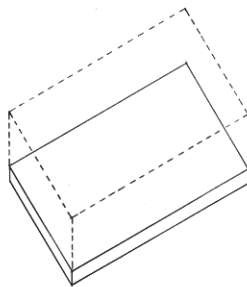
Gneiss autres types



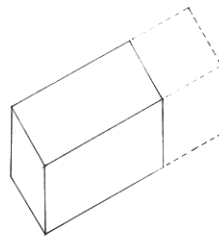
Gneiss type Maggia



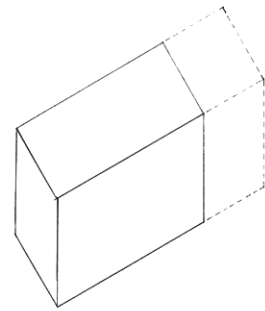
Gneiss type Onsernone



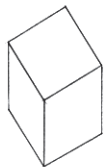
Gneiss type S. Bernardino



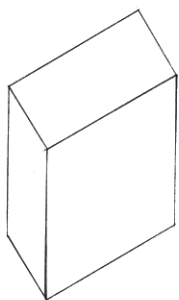
Grès de Berne



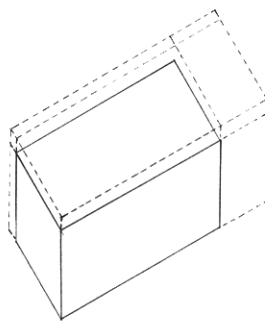
Grès de Bollingen



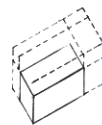
Grès Guber



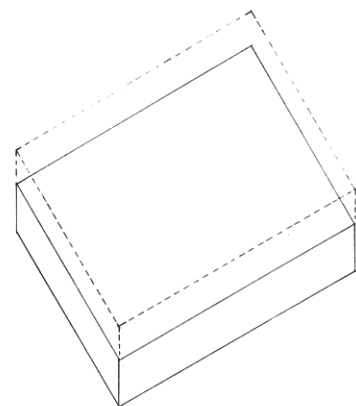
Calcaire de Liesberg



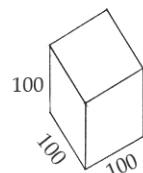
Grès coquilliers de Mägenwil



Roc de Cernia



Grès de Rohrschach



Les types de roches sélectionnés appartiennent donc aux calcaires récifaux et oolithiques; grès de la Molasse, grès du Flysch, grès coquilliers et gneiss.

3.3. Caractéristiques

Les types de roches qui ont été retenus possèdent des caractéristiques mécaniques et pétrophysiques qui en font des bonnes pierres de construction.

Leur résistance à la compression est toujours comprise entre 33-35 kN/mm², valeur du grès de la Molasse de Berne, et les 200-220 kN/mm² des gneiss du canton du Tessin et du grès du Flysch "Guber".

La résistance aux agents atmosphériques est en général bonne. Les grès de la Molasse demandent un soin particulier quant à leur emplacement et aux mesures constructives de protection afin d'en garantir une bonne conservation.

Les carrières qui exploitent les types de roches sélectionnés sont toutes équipées d'outils d'extraction et de façonnage modernes. Ceci garantit la bonne qualité géométrique des éléments de construction et la disponibilité en matériau.

Selon les techniques d'extraction utilisées, les blocs produits varient quant à leur géométrie; dans certains cas, comme, par exemple, pour les gneiss, il est nécessaire de recourir à un façonnage en scierie lorsque la planéité des surfaces d'assise est requise.

3.4. Dimensions

Le Tableau V montre, à la même échelle, les dimensions maximales des blocs des différents types de roches sélectionnés pour la construction en pierre massive. Les différences sont liées d'une part aux caractéristiques géologiques des gisements (surtout hauteur des bancs et fissures) et, de l'autre, aux techniques d'exploitation. L'exploitation du calcaire récifal à La Cernia, Neuchâtel, par explosion produit des blocs de petites dimensions par rapport aux calcaires oolithiques exploités à Laufen, Bâle, à la haveuse, où l'on obtient des blocs de la hauteur des bancs de carrière.

4. LA CARRIÈRE DE PIERRE NATURELLE. NOTIONS DE DROIT SUISSE

L'objectif de ce sous-chapitre est de présenter un aperçu des principales notions de droit qui concernent la carrière de pierre naturelle comme objet dans le territoire dans laquelle une activité d'exploitation est exercée. Cela a été fait en analysant le droit public suisse à propos de l'aménagement du territoire et de la protection de l'environnement. Ces deux champs d'application du droit ont été retenus parce qu'il constituent, à l'heure actuelle, les problématiques principales auxquelles l'activité d'exploitation est confrontée. En effet, les zones d'exploitation se réduisent (voir le sous-chapitre II.2.8) aussi en raison d'une croissante opposition de la part des administrés, mais aussi des autorités, envers la carrière. Cette dernière est désormais considérée comme une atteinte au paysage, une blessure et comme une source de nuisances (bruits et poussières). Ceci est en partie dû à la méconnaissance de la différence entre une carrière de pierre naturelle et une carrière de granulats; cette dernière comportant des volumes extraits majeurs et des techniques d'extraction plus nuisibles, surtout à cause de l'utilisation d'explosifs.

On donne en annexe (Annexe A.4) les principaux textes légaux qui traitent des carrières, selon le sens donné plus haut à ce substantif.

4.1. Le droit et les activités d'exploitation des ressources du sous-sol

Même si à l'heure actuelle, en Suisse, une vraie industrie minière n'existe plus, certains principes de droit minier peuvent être appliqués aussi à d'autres formes d'exploitation des ressources du sous-sol [Kündig, R., éd. 1997]. La législation minière concerne les droits de trois types de personnes: les droits des Etats, en Suisse la Confédération et les Cantons, qui sont les défenseurs de l'intérêt commun et pour cela légifèrent sur l'exploitation du sol; les droits des propriétaires des biens-fonds, surtout en vertu du fait que la propriété est garantie par la *Constitution Suisse* [Cst Art. 26], et les droits des exploitants, parce que c'est à eux qui revient la responsabilité de l'exploitation, mais aussi une partie des bénéfices issus de cette activité.

En ce qui concerne le droit privé en matière de propriété foncière, la principale source légale est le *Code Civil Suisse* (par la suite, CC). Selon l'Art. 655 du CC, la propriété foncière a comme objet les immeubles, entre lesquels figurent aussi les biens-fonds, les droits inscrits au registre foncier et les mines. En vertu de l'Art. 667 du CC, la propriété s'étend aussi au sous-sol, al. 1, mais elle peut être restreinte par des intérêts prépondérants, al. 2. Le *Code Civil* nous renseigne encore sur les principes qui concernent l'usufruit des choses, en particulier, à l'Art. 771 CC, sur: «l'usufruit des choses dont la jouissance consiste dans l'extraction de parties intégrantes du sol», comme les mines et les carrières, qui sont soumises aux règles de l'usufruit des forêts. Ceci est défini à l'Art. 770 CC, qui nous fournit quelques principes importants: «l'usufruitier d'une forêt a le droit d'en jouir dans les limites d'un aménagement rationnel», al. 1, et: «le propriétaire et l'usufruitier peuvent exiger que l'exploitation soit réglée par un aménagement tenant compte de leurs droits», al. 2.

C'est donc de compétence des Etats de mettre en oeuvre une législation qui considère d'une part, les intérêts généraux, et, de l'autre, les droits des particuliers. Cette ambivalence explique, en partie, les difficultés en matière d'établissement et application des législations pour les activités d'exploitation des ressources du sous-sol.

4.2. La "carrière" dans le droit administratif suisse

Comme il est le cas pour toute notion de droit en Suisse, il est nécessaire de considérer trois niveaux pour la législation: fédéral, cantonal et communal. Le terme "carrière" n'est pas défini de manière univoque par le droit, mais il est contenu dans différents textes législatifs qui permettent de préciser la signification de ce mot d'un point de vue légal. Le troisième niveau, celui communal, est responsable de l'application des directives cantonales, et, en général, ne concerne pas la définition des termes.

4.2.1. Niveau fédéral

Dans la législation fédérale, la carrière est considérée avant tout comme lieu d'exploitation. La définition la plus précise est contenue dans l'Art. 3 al. 1 de l'*Ordonnance sur la protection des sites de reproduction de batraciens d'importance nationale* (OBat): «Les objets itinérants comprennent des zones d'exploitation de matières premières, en particulier des gravières et des carrières d'argile et de pierres, incluant des plans d'eau de reproduction dont l'emplacement peut se modifier au cours du temps».

Cette signification est confirmée par l'Art. 13 chiffre "e", de l'*Ordonnance sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation* (OTerm) qui définit quelles sont les surfaces d'exploitation: «les surfaces non agricoles telles que les gravières et les carrières ainsi que les cours d'eau»; par le chiffre 80.3 de l'*Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement* (OEIE): «Gravières, sablières, carrières et autres exploitations d'extraction ...», dans lequel on précise la forme d'exploitation, c'est-à-dire l'extraction, et par l'Art. 769 al. 3 du CC: «Il ne peut ouvrir des carrières, marnières ou tourbières, ni commencer l'exploitation d'autres choses semblables ...».

La carrière peut donc être définie comme une zone d'exploitation dont la forme se modifie au cours du temps à cause de l'extraction.

4.2.2. Niveau cantonal

La législation cantonale concerne, en général, des textes législatifs issus des principes énoncés dans ceux fédéraux, ainsi qu'un grand nombre de règles concernant l'application des lois. Ceci produit de nombreux textes qui concernent la "carrière". En particulier, dans certains cantons suisses, une loi sur les carrières existe, ainsi que ses ordonnances d'application. On analysera par la suite certains de ces textes législatifs sur les carrières pour mieux cerner la signification de cette notion pour le droit cantonal. D'autres textes concernent le rapport entre la carrière et l'environnement, surtout au niveau de l'aménagement du territoire et de la protection de l'environnement (ces deux thèmes seront développés dans les paragraphes suivants).

Au niveau cantonal, le texte législatif sur les carrières concerne soit uniquement les carrières (VD), soit les mines et carrières (NE et VS), soit l'extraction de matériaux (NE). Les textes concernant les mines ne traitent pas des carrières, mais seulement des exploitation de minéraux métallifères ou de sources d'énergie. C'est pour cela, par exemple, que le canton de Neuchâtel a adopté une double législation.

La forme des lois des carrières est assez uniforme: elles comprennent une première partie concernant les définitions et les champs d'application; une deuxième sur le rapport entre aménagement du territoire et activité d'extraction (plan directeur, plan d'extraction et permis d'exploiter); une troisième sur le déroulement de l'activité d'exploitation (rôle de surveillance de l'Etat, obligations du propriétaire et de l'exploitant), et elles se terminent par les voies de recours et les dispositions pénales. Dans les lois sur les carrières, on trouve des précisions sur cet objet, notamment en ce qui concerne sa propriété et la propriété des matériaux extraits, qui reviennent au propriétaire du fonds, en vertu de l'Art. 667 CC et de l'Art. 26 Cst. Le rôle de l'Etat, dans ce cas le Canton, est donc celui de régler l'activité d'exploitation autant au niveau de sa localisation, à travers le plan directeur, que sur le plan de la protection de l'environnement, à travers les exigences requises pour l'octroi d'un permis d'exploiter, afin de répondre aux besoins du canton (par exemple: «La présente loi a pour but de régler l'exploitation des gisements de matériaux nécessaires à l'économie afin de répondre aux besoins du canton dans le respect de l'environnement, de la forêt, de la nature et du paysage»[LEM Art.]). La loi sur les carrières concerne autant les carrières de pierre naturelle que celles d'autre type. On pourrait même affirmer qu'elle est conçu surtout pour les autres types de carrières (granulats, sablières, etc.) parce qu'à l'heure actuelle ce sont ces produits dont l'approvisionnement doit être assuré, par exemple, pour l'entretien des voies de communication, en premier lieu les chemins-de-fer et les routes.

En absence d'un tel texte législatif cantonal, ce sont les réglementations sur l'aménagement du territoire et des constructions ainsi que celles concernant la protection de l'environnement qui doivent être considérées au sujet des carrières et de leur exploitation. C'est le cas, par exemple, du canton du Tessin, où l'on trouve les plus importants gisements exploités en Suisse, qui a définis les contenus des projets d'exploitation dans le *Règlement d'application de la loi sur les constructions* [RLE Art. 15].

La carrière apparaît dans un grand nombre de lois et ordonnances traitant de la protection de la nature et du paysage (AI; GL; GR; LU; NE; NW; SH; SO; SZ; VD; VS) ou de la protection des eaux (BE; FR; JU; VD; VS); dans les ordonnances cantonales sur les études d'impact environnemental (BE; FR; GE; GL; GR; SO; TG; UR; VD; VS; ZH); dans les textes traitant de l'aménagement du territoire et des constructions (AG; BE; BL; FR; LU; OW; SG; SO; SZ; TI; VD; VS) et dans la législation cantonale des routes (BE; FR; JU; NE; NW; OW; VD; VS; ZH). Ce sont en particulier les problèmes de planification de l'utilisation du territoire et de protection de l'environnement, au sens large, qu'on développe par la suite.

4.3. La carrière de pierre naturelle et l'aménagement du territoire

La réglementation de l'aménagement du territoire est consacrée, en droit public suisse, par l'Art. 75 de la Constitution qui oblige la Confédération à fixer les principes et les cantons à les appliquer, dans le but d'une: «utilisation judicieuse et mesurée du sol et une occupation rationnelle du territoire» [Cst Art. 75 al. 1]. L'al. 2 précise que c'est à la Confédération d'encourager et coordonner les cantons et de collaborer avec eux pour atteindre les objectifs fixés.

Il faut citer aussi un autre article de la Constitution qui est étroitement lié à l'aménagement du territoire, c'est le déjà cité Art. 26 Cst qui garantit la propriété (al. 1) et une pleine indemnité: «en cas d'expropriation ou de restriction de la propriété qui équivaut à une expropriation». Il est compréhensible donc que toute action d'aménagement de la part de l'autorité puisse se heurter, parfois, avec le droit de propriété des administrés ou des autorités elles-mêmes.

L'apparat réglementaire au sujet de l'aménagement du territoire s'articule sur trois niveaux différents. Dans la législation fédérale, on trouve une loi, la *Loi fédérale sur l'aménagement du territoire* (LAT), et trois ordonnances, en premier l'*Ordonnance sur l'aménagement du territoire* (OAT). Les cantons doivent édicter les réglementations nécessaires à l'application de la législation fédérale, ceci se fait à travers des lois et ordonnances variées, traitant du seul objet de l'aménagement ou de plusieurs objets liés (constructions, nature, paysage, etc.). Les communes ont l'obligation de mettre en oeuvre toute cette législation au niveau local, ce qui est fait au moyen des règlements d'application des plans d'affectations. À côté de cette législation étoffée, l'aménagement du territoire en Suisse se base, pour réaliser ses objectifs, sur la planification, c'est-à-dire sur l'élaboration de plans concernant la division du territoire et la destination de ces zones. Là encore, on retrouve les trois niveaux: la Confédération qui, au de-là de son rôle de surveillance et de coordination, peut établir des plans sectoriels; les cantons qui doivent, par contre, se charger d'élaborer les plans directeurs cantonaux et d'approuver les plans d'affectations, qui sont en général l'affaire des communes.

La définition précise des zones et de leurs affectations par le biais des plans est nécessaire parce que, selon l'Art. 22 al. 1 LAT: «aucune construction ou installation ne peut être créée ou transformée sans

autorisation de l'autorité compétente». Les conditions pour l'obtention de cette autorisation sont la conformité à l'affectation de la zone et l'équipement du terrain [LAT Art. 22 al. 2].

Dans le cas du canton de Vaud, par exemple, le *Plan directeur cantonal* contient des indications à propos des ressources, dont l'objectif est celui d'en assurer la valorisation et la gestion à long terme⁷. Dans ces ressources on trouve aussi les matériaux pierreux dans la feuille F41 "Carrières, gravières et sites de dépôts d'excavation". Les carrières indiquées dans ce plan sont des carrières de granulats, surtout de roches dures, comme il est précisé par le Canton dans le *Plan Directeur des Carrières* (PDCar).

Le *Plan directeur cantonal* du canton du Tessin, qui est l'un des principaux lieux d'exploitation de la Suisse, ne contemple pas de zones de carrières, mais simplement l'emplacement des carrières actuelles. Le plan directeur étant articulé selon quatre thématiques principales, les carrières ont été placées dans celle qui traite des "conditions d'habitation", à côté des zones de glissements de versants, de crues, d'avalanches, de sites de décharge ou de traitement des déchets. Une fiche thématique traitant des carrières, la V8, est en cours d'élaboration⁸. Le canton souhaite développer l'activité d'extraction à l'intérieur des sites existants afin de garantir la protection du paysage.

La responsabilité d'établir les zones d'extraction et celles de transformation revient aux communes concernées par le biais des *Plans d'affectations*.

4.4. La carrière de pierre naturelle et la protection de l'environnement et du paysage

La protection de l'environnement est un principe, fortement lié au thème précédemment traité de l'aménagement du territoire, qui est consacré dans le droit suisse par la Constitution. En effet, l'Art. 74 al.1 Cst, définit que le but de la Confédération est celui d'édicter des lois qui ont comme objectif celui de protéger l'être humain et son environnement envers des: «atteintes nuisibles ou incommodantes». L'al. 2 spécifie que le principe est celui de la prévention et que les frais liés, ainsi que ceux de réparation, sont à la charge de ceux qui les causent (c'est le principe dit du "pollueur-payeur"). L'exécution des dispositions fédérales incombe aux cantons, comme rappelé par l'al. 3. Ces dispositions sont contenues dans la *Loi fédérale sur la protection de l'environnement* (LPE), du 7 octobre 1983. Cette loi définit à l'Art. 7 al. 1 LPE, quelles sont les "atteintes", c'est-à-dire: «les pollutions atmosphériques, le bruit, les vibrations, les rayons, les pollutions des eaux et les autres interventions dont elles peuvent faire l'objet, les atteintes portées au sol [...]» et leurs causes: «la construction ou à l'exploitation d'installations, à l'utilisation de substances, d'organismes ou de déchets ou à l'exploitation des sols». Cette loi contient aussi les principes sur lesquels sont fondées les différentes Ordonnances fédérales qui définissent précisément les formes d'atteintes, les valeurs limites et les formes de préventions. Ce sont, en ce qui concerne l'exploitation d'une carrière de pierre naturelle, l'*Ordonnance sur la protection de l'air* (OPair, du 16 décembre 1985); l'*Ordonnance sur la protection contre les bruits* (OPB, du 15 décembre 1986); l'*Ordonnance sur la protection des eaux* (OEaux, du 28 octobre 1998); l'*Ordonnance sur les atteintes portées aux sols* (OSol, du 1er juillet 1998) et l'*Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement* (OEIE, du 19 octobre 1988).

La législation évoquée plus haut est celle qui a comme objectif la protection de l'environnement au

7. Le plan directeur cantonal du canton de Vaud est consultable, en-ligne, à l'adresse: <http://www.plandirecteur.vd.ch> (consulté le 15.12.2009).

8. Le plan directeur cantonal du canton du Tessin est consultable, en-ligne, à l'adresse: http://www.ti.ch/dt/dstm/sst/Temi/Piano_direttore/ (consulté le 15.12.2009).

sens strict, mais d'autres lois existent qui affectent toute activité qui se confronte au territoire. C'est le cas, par exemple, de la loi *Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage* (LPN).

Dans les procédures de planification, de construction et de modification d'installations soumises aux procédures d'Etude d'Impact Environnemental (EIE), selon la législation suisse, le droit de recours n'est pas limité aux seuls voisins, mais élargi à un certain nombre d'organisations à but non lucratif qui oeuvrent pour la sauvegarde du territoire. La LPE ainsi que la LPN définissent que ce droit de recours revient aux organisations de protection de l'environnement [LPE Art. 55 al. 1], de la nature, du paysage et pour la conservation des monuments historiques [LPN Art. 12 al. 1] contre: « les décisions des autorités cantonales ou fédérales relatives à la planification, à la construction ou à la modification d'installations soumises aux dispositions sur l'étude d'impact » [LPE Art. 55 al. 1]. Les organisations ayant ce droit sont désignées par le Conseil Fédéral [LPE Art. 55 al. 3; LPN Art. 12 al. 3] et leur droit de recours se limite aux domaines du droit qui sont visés par les statuts des organisations [LPE Art. 55 al. 2; LPN Art. 12 al. 2].

5. LA CARRIÈRE ET SON IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Le problème de l'impact environnemental de l'exploitation des carrières de pierre naturelle est l'un des responsables, aujourd'hui, de la diminution du nombre de ces dernières. Cette méfiance de la part de l'opinion publique vis-à-vis de ce type d'exploitation des ressources naturelles est, en partie, due à deux types de malentendus. Le premier découle d'une mauvaise information sur la différence entre les carrières pour la production de granulats et de pierre de taille. Les carrières du premier type emploient des techniques d'exploitation plus bruyantes et ont des grands volumes exploités. Le deuxième malentendu, qui est aussi issu d'une mauvaise connaissance du secteur, concerne les techniques d'exploitation. En effet, l'évolution technologique dans ce domaine a visé, dans les dernières années, une forte réduction des nuisances sonores et des émissions de poussières.

L'impact environnemental reste, toutefois, un point important qui doit être contrôlé tout au long de la vie de la carrière. Il est traité selon trois points: la planification; la gestion et la remise en état après exploitation.

5.1. Planification

La base fondamentale pour toute utilisation de la pierre naturelle dans la construction est sa disponibilité locale à long terme. Il est clair que cela se réalise à travers une bonne planification des zones de carrière dans les territoires actuellement déjà affectés par cette activité ainsi que pour les zones dont un potentiel de gisements est reconnu (anciennes zone d'exploitation ou nouveaux terrains). La carrière reste en tout cas une forme de modification de la morphologie du terrain et pour cela il est nécessaire de l'intégrer dans son contexte et de planifier sa remise en état. *L'Office fédéral de l'environnement* souligne la difficulté de l'intégration dans le paysage des carrières qui l'affectent fortement, souvent même après leur remise en état de nature⁹.

9. Voir l'article "Extraction de matières premières et décharges" à l'adresse: <http://www.bafu.admin.ch/landschaft/00522/01666/index.html?lang=fr> (consulté le 15.12.2009).

Comme il a été évoqué au sous-chapitre sur la carrière dans le droit administratif suisse (sous-chapitre II.4.2), l'activité extractive dépend de l'obtention d'un permis d'exploitation. Une autorisation est aussi nécessaire si la zone se situe au-dessus des nappes souterraines exploitables [LEaux Art. 44]. L'exploitation est, par contre, interdite dans les zones de protection des eaux souterraines et au-dessous des nappes souterraines exploitées [*ibid*]. Le site d'exploitation doit se trouver dans une zone affectée à cette fonction par le plan directeur cantonal et le plan d'affectation communal, ou à l'intérieur de la zone à bâtir (ce dernier emplacement est désormais difficilement envisageable vu la forte pression foncière). Si cette condition n'est pas remplie, la législation fédérale permet une dérogation selon l'Art. 24 LAT, selon lequel des autorisations peuvent être délivrées pour des installations hors de la zone à bâtir si leur destination l'impose et si aucun intérêt prépondérant ne s'y oppose.

L'ouverture d'une nouvelle exploitation ou l'agrandissement d'une zone existante nécessitent souvent de défricher. Ceci est en général interdit par la Loi sur les forêts [LFo Art. 5 al. 1], selon laquelle leur surface ne peut pas être diminuée [LFo Art. 3]. Dans ce cas aussi des dérogations sont admises, s'il est possible de démontrer que les exigences du requérant priment sur la conservation de l'aire forestière [LFo Art. 5 al. 2] que l'ouvrage ne peut être situé ailleurs, qu'il remplit les conditions posées en matière d'aménagement du territoire et que le défrichement ne présente pas de dangers pour l'environnement. Si une autorisation est accordée, reste l'obligation de la compensation par des nouvelles plantation [LFo Art. 7] et par le paiement d'une taxe [LFo Art. 8]. Les dérogations sont de compétence soit cantonale soit fédérale, mais en tout cas fédérale si la surface excède 5'000 m² ou si elles se trouvent sur le territoire de plusieurs cantons [LFo Art. 6 al. 2].

5.2. Exigences pour l'aménagement du territoire

5.2.1. Principes fédéraux

La principale source des principes fédéraux en matière d'aménagement du territoire est la LAT. En ce qui concerne l'activité de l'extraction de la pierre naturelle, une zone d'exploitation a des effets semblables à ceux d'une zone à bâtir [Kündig, R., éd. 1997]. Il se peut que la zone d'exploitation se heurte à un des principes fondamentaux de la LAT en matière de zones à bâtir: celui de l'équipement de la zone [LAT Art. 22 al. 2]. Dans ce cas aussi une dérogation doit être demandée.

5.2.2. Bases cantonales

Les plans directeurs cantonaux (voir le sous-chapitre II.4.3) devraient contenir des informations sur les zones d'affectation pouvant être occupées par des zones d'exploitation. Il se peut que des plans directeurs spécifiques (plans directeurs des carrières) existent. Les fiches qui accompagnent le plan directeur cantonal contiennent des informations importantes au sujet des procédures de planification. L'examen préalable de toute demande de permis d'exploitation, aussi en ce qui concerne le plan d'aménagement, est soumis à l'autorité cantonale.

5.2.3. Communes

À ce jour, la compétence en matière de planification des zones d'exploitation revient aux communes par le biais des plans d'affectations. C'est à l'autorité communale aussi qui revient le devoir de publication

des demandes de permis d'exploitation; la décision finale, après l'examen de la part de l'autorité cantonale, et l'inscription au registre foncier des différentes installations.

5.3. Octroi du permis de construire

À la lumière du fait que la zone d'exploitation est considérée comme une zone à bâtir, l'octroi d'un permis de construire est une condition nécessaire [LAT Art. 22 al. 1]. Ceci aussi parce que l'équipement d'une future zone d'exploitation comporte un certain nombre d'installations qui peuvent assumer le caractère de bâtiments (voir à ce propos le sous-chapitre II.2.4.1) et l'aménagement de routes, lignes électriques et lignes téléphoniques.

Les exigences à remplir en matière de permis de construire sont contenues dans les respectives lois cantonales sur les constructions et les règlements communaux.

5.4. Etude d'Impact Environnemental (EIE)

5.4.1. Principes fédéraux

Au niveau de la législation fédérale, l'EIE est contenu dans la LPE et son application est définie par une Ordonnance, la OEIE. Cette dernière concerne directement l'exploitation de la pierre naturelle parce qu'elle fixe de manière exhaustive les objets qui sont assujettis à l'Etude d'Impact sur l'Environnement (EIE): les carrières concernées sont seulement celles qui présentent un volume global d'exploitation supérieur à 300'000 m³ et la procédure décisive est à déterminer par le droit cantonal (n. 80.3 de l'annexe à l'OEIE). Dans le cas d'extensions d'exploitations existantes, le nouveau volume à exploiter et cumulé à celui existant afin de déterminer si une EIE est nécessaire [OEIE Art. 2 al. 2].

5.4.2. Bases cantonales

Selon les législations cantonales, l'Etude d'impact environnemental est liée soit au plan d'aménagement du territoire soit au permis de construire. Les cantons n'ont pas le droit de modifier les objets qui sont soumis à cette Etude, l'Ordonnance fédérale étant exhaustive, mais ils peuvent ajouter des exigences autres. Une enquête préliminaire et un cahier des charges doivent être établis par le requérant afin de mettre en évidence les impacts [OEIE Art. 8 al. 1]; ces documents sont ensuite soumis pour un examen préalable à l'autorité compétente cantonale [OEIE Art. 8 al. 2]. Comme il a été mentionné plus haut, c'est à l'autorité cantonale qui revient le devoir d'établir la procédure pour une EIE dans le cas des carrières, si cette législation n'existe pas il est nécessaire de se référer aux directives d'aide à l'exécution, édictées par l'*Office fédéral de l'environnement* [OEIE Art. 10 chiffre "c"].

5.5. Approche interdisciplinaire et coordination

Un projet d'exploitation nécessite aujourd'hui de nombreuses autorisations qui sont octroyées par différents instances de l'autorité communale, cantonale, voir fédérale. Ceci demande une bonne coordination non seulement entre les différentes autorités compétentes, mais aussi entre les différents spécialistes auxquels le requérant doit s'adresser pour établir la documentation requise. Le principe de coordination est fixé par la loi-même, en ce qui concerne la Confédération par l'Art. 38 et 41 LPE, et par l'Art. 21 OEIE, qui établit le principe de l'information entre les différentes autorités compétentes.

5.5.1. L'importance de l'avant-projet

La complexité du projet d'exploitation, qui oblige le recours à différents spécialistes, demande une approche interdisciplinaire à l'objet "carrière". L'avant-projet devient donc un instrument essentiel pour pouvoir réaliser un projet d'exploitation. En effet c'est sur cette base que la discussion avec les spécialistes et les autorités peut être amorcée et qu'une optimisation du projet, autant du point de vue de l'aménagement du territoire que de la protection de l'environnement, peut avoir lieu. L'avant projet devrait contenir, au moins, un plan général à l'échelle du 1:1000; les pré-examens géologique et hydrogéologiques, établis par un géologue; la description des étapes d'exploitation, des remises en état et de la situation finale, sous forme de plans, mais aussi d'images ou de modèles en trois dimensions permettant une meilleure appréciation de l'intégration de la carrière dans le territoire [Kündig, R., éd. 1997].

5.6. La propriété du sol

Dans le cas suisse, la propriété du sol sur lequel se trouve la zone d'exploitation revient rarement à l'exploitant, en général ces sont soit des privés soit des bourgeoisies ou des communes. Ceci entraîne donc la nécessité d'obtenir un droit d'exploitation sous forme de concession dont la durée était, dans le passé, longue, normalement 99 ans, mais qui a été réduite dans les dernières années à environ 10 ans [Schwarz, H. 1983]. Cette réduction de la durée des concessions d'exploitation entraîne deux problèmes: le premier, pour l'exploitant, est celui de rentabiliser les investissements sur une période restreinte, si la concession n'est pas renouvelée, et le deuxième, pour le propriétaire du bien-fond et pour la collectivité, est une certaine difficulté à pouvoir obtenir et surtout réaliser des mesures de remise en état ou de protection de l'environnement. On peut signaler que pour pallier en partie à ces problèmes, une moratoire a été décidée au Canton du Tessin afin de permettre un renouvellement des concessions sans mise au concours officielle, ceci pour favoriser un plus long engagement des parties dans la gestion des carrières¹⁰.

5.7. Garanties et assurances

Afin d'assurer les mesures de remise en état après exploitation contenues dans le permis d'exploitation, les lois sur les carrières exigent, en général, que l'exploitant, ou le propriétaire de la zone, fournissent des garanties, normalement bancaires, d'un montant jugé suffisant pour leur réalisation [RLCart Art. 40 al. 1; RELEM Art. 10 al. 1]. La valeur est calculée sur la base de la surface, de la quantité de matériaux de colmatage et de la qualité exigée pour le sol final [RLCar Art. 40 al. 1].

La législation du canton de Vaud demande, outre la garantie, une assurance de responsabilité civile couvrant l'exploitant et le propriétaire, pour un montant minimal de trois millions [RLCar Art. 40 al. 2]. C'est le cas aussi pour le canton de Neuchâtel [RELEM Art. 8 chiffre "d"].

Ces mesures sont souvent onéreuses pour les exploitants de carrières de pierre naturelle de taille et montent, encore une fois, que la législation se réfère surtout aux grosses carrières de granulats.

10. Des informations à ce sujet sont contenues dans une interrogations au Conseil d'Etat de la part du Parti Libéral Radical au sujet des difficultés des carrières de pierre naturelle du canton du Tessin (document électronique disponible à l'adresse: <http://plrt.ch/I/pag1204>, consulté le 28.01.2010).

5.8. Gestion. Vers une utilisation intégrale des produits de l'exploitation

5.8.1. La définition de "déchet"

La définition de déchet donnée par la législation suisse, dans la *Loi fédérale sur la protection de l'environnement* (LPE) est la suivante: «Par déchets, on entend les choses meubles dont le détenteur se défait ou dont l'élimination est commandée par l'intérêt public» [LPE Art.7 al. 6].

La même loi donne cette définition de leur élimination: «L'élimination des déchets comprend leur valorisation ou leur stockage définitif ainsi que les étapes préalables que sont la collecte, le transport, le stockage provisoire et le traitement. Par traitement, on entend toute modification physique, biologique ou chimique des déchets» [LPE Art.7 al. 6bis].

Au titre 2, sur la limitation des nuisances, section 1, limitation et élimination des déchets, on trouve à l'article 30 les principes: «Al.1 La production de déchets doit être limitée dans la mesure du possible. Al.2 Les déchets doivent être valorisés dans la mesure du possible. Al.3 Les déchets doivent être éliminés d'une manière respectueuse de l'environnement et, pour autant que ce soit possible et approprié, sur le territoire national» [LPE Art.30 al. 1-3].

On trouve aussi les principes de valorisation des déchets: «Le Conseil fédéral peut: a) prescrire que certains déchets doivent être valorisés si cela est économiquement supportable et plus respectueux de l'environnement que ne le serait un autre mode d'élimination et la production de produits nouveaux; b) restreindre les utilisations de certains matériaux et produits, si cela permet d'accroître les débouchés pour des produits d'un usage équivalent qui sont produits à partir de déchets valorisés, sans pour autant entraîner des coûts supplémentaires et des pertes de qualité importants» [LPE Art. 30 chiffre "d"]. Il faut noter qu'au niveau suisse l'application de la loi sur la protection de l'environnement se fait au niveau cantonal.

Dans le cas de l'exploitation des pierres naturelles, les chutes produites par l'extraction et, dans certains cas, par la transformation ne peuvent pas être considérées comme des "déchets", parce que leur détenteur, l'entreprise exploitante, ne veut pas forcément s'en défaire. Il est nécessaire de les considérer comme des "sous-produits" ou des "co-produits" de l'activité extractive. En effet, ces "co-produits" ne sont pas la cible primaire de la carrière, mais leur valeur et leurs utilisations sont tels qu'ils pourraient être systématiquement valorisés, comme écrit dans la loi. La mise en décharge définitive des déchets équivaut à des coûts économiques et environnementaux élevés et peut constituer un frein important au développement du secteur économique de la pierre naturelle.

On sera obligé, pour des raisons de rendement économique, mais aussi à cause de la législation croissante en matière de protection de l'environnement et de valorisation du territoire, à passer d'un système unidirectionnel "produit-déchet" à un système presque cyclique "produit-utilisation-déchet-récupération des matières premières secondaires (MPS) et/ou réutilisation" [Dino, G.A., Fornaro, M. 2005:322]. L'efficacité de cette deuxième voie dans le cas des carrières de pierre naturelles a été soulignée, entre autre, dans le cas des carrières de syénite à Balma dans le Piémont (Italie) [Cardu M. et al. 2004].

Les chutes produites par le secteur de l'exploitation de la pierre naturelle sont généralement liées aux deux phases du processus de production. On distingue donc entre les chutes d'extraction et celles

de façonnage. Les premières sont constituées par les matériaux de la couche de découverte, souvent roches et terrain végétal; par les chutes produites par la ou les techniques d'exploitation utilisées et par la qualité de la roche présente dans le banc exploité. Les chutes de transformation sont liées au type de façonnage que la roche subit et elles sont constituées de débris de roche et des boues produites par le mélange entre fines poussières de roche et l'eau nécessaire au refroidissement et à la lubrification des outils.

On peut ajouter à ces deux catégories "classiques" un troisième groupe, de plus en plus important, qui est constitué par les volumes de pierre naturelle ne pouvant pas être utilisés par le marché même de la taille de la pierre. Le développement de l'application de la pierre en plaques minces de revêtement a eu comme effet que toute roche extraite présentant des défauts et une hétérogénéité dans sa macrostructure ne peut pas être taillée en plaques minces, elle est donc considérée comme chute. Ce sont les bien connues "classes de qualité" que les carriers utilisent pour la vente des produits. Souvent ces mêmes roches ne présentent pas de défauts importants du point de vue mécanique et pourraient donc être utilisées dans la construction selon des autres modes de mise en oeuvre. Par exemple, par une utilisation d'éléments massifs, comme proposé par cette recherche.

5.8.2. La décharge comme emplacement temporaire et nouveau gisement

La décharge doit se configurer comme lieu transitoire pour une certaine quantité de chutes produites par les entreprises exploitant la pierre naturelle. Dans ce cas, comme dans celui d'une permanence de plus longue période, les deux principaux problèmes sont la stabilité géotechnique et la sauvegarde de l'environnement. Si le stockage des chutes se fait directement dans la carrière, il faut que l'emplacement choisi ne compromette ni la rationalité dans l'exploitation du gisement ni la sécurité des ouvriers.

Les anciennes décharges qui ne sont plus utilisées pourraient devenir, dans des scénarios futurs d'utilisation intégrale des produits d'exploitation de la pierre naturelle, à leur tour des nouveaux gisements [Dino, G. A., Fornaro, M. 2005:321]. Il serait ainsi possible d'imaginer une nouvelle exploitation des anciennes décharges.

5.8.3. Récupération des chutes d'exploitation et de production

Pour passer du système unidirectionnel à celui cyclique, donc d'un système basé sur l'exclusive consommation vers un autre qui repose sur le principe du recyclage ou de la récupération, il faut considérer quelques aspects préalables de la question.

Premièrement la quantité de chutes, et leur qualité, doit pouvoir justifier le "coût global" de leur récupération. Mais comment quantifier cette exigence?

Si la quantité à disposition est à même de justifier une récupération, il faut évaluer les coûts et les bénéfices globaux d'une telle opération. Les coûts sont, généralement, liés au chargement et transport des chutes, à leur traitement et au marketing nécessaire au lancement sur le marché des nouveaux produits.

Les bénéfices sont, pour l'entreprise, liés à la vente des produits, et au niveau de l'environnement, l'épargne en ressources et l'économie de sol (pour ce qui est des carrières et des décharges).

La valorisation des chutes est en rapport direct avec leur nature. Les co-produits peuvent être regroupés dans les familles suivantes:

- Blocs informes pour travaux de génie civil;
- Éléments en pierre naturelle de formes et taille variées;
- granulats mixtes pour remplissages, ballast ferroviaire ou autre. Granulométrie selon normes (env. 30-65 mm);
- agrégats pour production de béton, enrobés ou autre. Granulométrie selon norme (env. 5-30 mm);
- concentrés de minéraux pour les applications industrielles;
- terrain végétal pour remise en état de sols contaminés ou couches d'étanchéité pour le fond des décharges à partir des boues de sciage.

En reprenant ici de suite les catégories énumérées, on essayera d'en faire ressortir les contraintes et les avantages principaux.

5.8.4. Blocs de qualité inférieure et blocs informes

Comme il a été noté plus haut, les exigences actuelles pour la production de plaques minces pour le revêtement a produit, pendant les dernières décennies, une augmentation des blocs de qualité inférieure gisants dans les carrières. On rappelle ici que ces derniers possèdent, en général, des qualités mécaniques et technologiques qui ne s'éloignent pas de manière significative de celles de blocs de première qualité. Ces "chutes" sont assez nombreuses dans les carrières de pierres tendres, dont l'utilisation en revêtement est réduite, mais aussi présentes dans les carrières de roches cristallines alpines. Les défauts de ces blocs sont essentiellement de deux types: macrostructure et dimensions. Dans ce dernier cas, cela signifie que les blocs sont trop petits par rapport aux dimensions requises pour les blocs marchands.

Actuellement, ces pierres sont utilisées pour la production d'éléments peu travaillés pour les aménagements paysagers (jardins, parcs, routes, etc.) ou les murs de soutènement. Il serait envisageable de les utiliser aussi dans la construction pour des éléments de revêtements massifs ou éventuellement, avec un travail supplémentaire de découpe, pour des maçonneries porteuses.

Les blocs informes, qui constituent en général des chutes d'exploitation, constituent traditionnellement la matière première pour des gros murs de soutènement de faible hauteur ou pour l'aménagement des berges des fleuves. Leur application dans la construction reste plus difficile, au-delà des formes citées, mais il ne faut pas sous-estimer la possibilité de mettre en oeuvre des éléments de ce type dans des maçonneries. Voir, à titre d'exemple, le portique de la SGAE (Société Générale des Auteurs et Editeurs) à Santiago de Compostela de l'architecte espagnol Antón García-Abril, construit en 2007 [Architecture & Urbanism 2008]¹¹.

11. Voir aussi l'article écrit par Davide Turrini "Anton Garcia Abril SGAE Central Office, Santiago de Compostela", paru dans le blog www.architetturadi Pietra.it, à l'adresse: <http://www.architetturadi Pietra.it/wp/?p=715>, consulté le 25.08.2010.

5.8.5. "Objets trouvés" en pierre naturelle

Les chutes de façonnage produites par les outils de découpe consistent en morceaux de pierre naturelle de forme, taille et finition de surface très variées. Ces matériaux hétérogènes peuvent être réutilisés, souvent tels quels, pour les transformer en objets, sculptures ou encore éléments de revêtement. Cette forme de réemploi est très peu coûteuse en énergie, mais demande un investissement intellectuel et créatif. Des éléments aux formes et traitements de surface très particuliers sont ceux issus de la découpe water-jet à contrôle numérique ou par la production d'éléments décoratifs standardisés.

Un exemple de cette manière de réutiliser ces chutes comme des "objets trouvés" est l'oeuvre du designer italien Paolo Ulian qui, travaillant à Carrara, a produit des prototypes d'objets d'usage quotidien en partant des chutes de façonnage du marbre blanc¹². Il a récemment été invité pour une exposition au *Triennale Design Museum* de Milan pour laquelle Enzo Mari a choisit le titre "Tra gioco e discarica" ("Entre jeu et décharge") qui évoque la provenance des matériaux réemployés par Paolo Ulian.

De cette manière chaque atelier de façonnage de pierres naturelles assume la valeur de lieux dans lequel des potentiels nouveaux objets attendent d'être découverts.



Fig. II.25. Reste de la découpe d'une fontaine dans du gneiss type Andeer: un "objet trouvé"?

5.8.6. Granulats mixtes pour remplissages

Ce type de produit trouve un large domaine d'application, surtout du point de vue des quantités, dans les grands ouvrages de génie civil pour les infrastructures publiques, tels les routes et lignes ferroviaires. L'utilisation principale est celle de matériaux de remplissage pour les modifications de terrain nécessaires pour ce type de projet.

Les exigences ne sont pas très élevées et sont surtout liées à une granulométrie étendue, couplée à un contenu réduit en argiles et limons [Dino, G. A., Fornaro, M. 2005:322-323].

12. Voir à ce propos la transcription de l'interview de Nicoletta Gemignani à Paolo Ulian "Intervista a Paolo Ulian", parue dans le blog www.architetturadipietra.it, à l'adresse: <http://www.architetturadipietra.it/wp/?p=4455>, consulté le 04.10.2010.

Les performances qui doivent être contrôlées sont celles de la cohésion, de la portance et de la régularité des plans finis [Dino, G. A., Fornaro, M. 2005:322-323].

Les installations pour la production de ce type de granulats demeurent simples: une installation de concassage, dans la carrière même, et une de vibrotamissage.

La matière première est constituée par les chutes de production, surtout celles d'exploitation, mais aussi par les anciennes chutes qui se trouvent en décharge. Une transformation en granulats permet donc la réutilisation des chutes actuelles, mais aussi la réduction progressive des anciennes en vue d'une récupération des sites de décharge.

5.8.7. Agrégats pour ballast ferroviaire, béton et enrobé

Ce type de produit, par rapport aux granulats précédemment traités, possède des exigences soit du point de vue des caractéristiques de la roche soit des performances du produit plus élevées et exprimées de façon univoque par les normes correspondantes.

Il faut surtout être en mesure de garantir l'homogénéité et la constance dans les caractéristiques du produit.

Les installations nécessaires pour la production de ce type d'agrégats sont complexes, la solution la plus rationnelle semble être celle de la formation de consortiums de carrières qui fournissent la matière première à une seule installation de production centralisée.

Le co-produit fini peut être utilisé dans la production de ballast ferroviaire, d'enrobé ou de béton. Dans cette dernière famille, les agrégats issus de la récupération de chutes de pierre naturelles peuvent constituer la base pour la production de béton spéciaux, au niveau de la teinte et de la granulométrie, ce qui est une vraie valorisation du co-produit.

5.8.8. Concentrés minéraux

La production de concentrés minéraux pour les applications industrielles à partir de chutes de pierre naturelle est un procédé industriel d'enrichissement dont l'application ne constitue pas un problème technique. Le vrai obstacle, actuellement, est la disponibilité sur le marché global de minéraux avec des coûts de production, et en conséquence de vente, inférieurs [Dino, G. A., Fornaro, M. 2005:324-326].

Le type de co-produit dérivant de ce procédé est étroitement lié à la composition de la roche de base. De même pour le choix du procédé industriel d'enrichissement.

Par exemple, des granites il est possible d'obtenir des concentrés de quartz et feldspath, sodiques ou potassiques, pour l'industrie des céramiques et du verre. Dans ce cas précis, il est nécessaire de réduire le contenu en fer des concentrés obtenus [*ibid*:324-326]. La production de ce type de concentrés est, par exemple, faite à Verbania, Italie, depuis 1996 en utilisant comme matière première les chutes de l'exploitation du granite blanc de Montorfano. Les chutes proviennent soit de la production soit des décharges existantes.

5.8.9. Terrain végétal, couches d'étanchéité et produits pour la construction

La réutilisation des boues de sciages pose, encore aujourd'hui, des problèmes techniques au même titre que l'emplacement des mêmes boues en décharge.

La récupération des boues de sciage est un problème économique pour les entreprises vu le coût qu'elles doivent assumer pour leur écoulement et vues les quantités produites.

Les problèmes principaux posés par la réutilisation des boues de sciage sont ceux liés à leur granulométrie, à leur contenu en métaux lourds et en hydrocarbures lourds.

La granulométrie des boues est très fine ($<25 \mu\text{m}$), ce qui peut engendrer des problèmes de stabilité géotechniques des mêmes lors, par exemple, de leur mise en décharge.

Les métaux lourds contenus dans les boues de sciages sont normalement le fruit de l'usure des outils de taille. Dans le cas du sciage par chassis traditionnel, on retrouve la présence de fer, de chrome, de nickel et de manganèse. L'utilisation de disques diamantés a introduit des nouveaux métaux, notamment le cuivre et le cobalt, ce dernier étant nuisible et nécessitant des traitements spéciaux.

Les hydrocarbures lourds, qui ne sont pas toujours présents et dont la concentration est très variable, sont le fruit des pertes d'huiles lubrifiants par les outils et les machines utilisées dans la taille [Dino, G. A., Fornaro, M. 2005:326-327].

La solution au problème du contenu d'hydrocarbures lourds peut être résolu, ou fortement réduit, par une mise à jour des machines et des outils ainsi que par une maintenance constante des ceux-ci. La réduction du contenu en hydrocarbures lourds est très importante parce que leur assainissement est obligatoire soit dans le cas d'une récupération soit dans celui de la mise en décharge.

La récupération des boues de sciage se fait par le biais de procédés technologiques visant à la séparation des métaux lourds et des particules fines. Après ce premier assainissement, si le contenu en hydrocarbures lourds est trop élevé, il faut les assainir, aujourd'hui aussi à travers des procédés de "bioremediation".

Les applications possibles de co-produits dérivés de la récupération des boues de sciage peuvent se faire au niveau de la construction sous forme, par exemple, de couche d'étanchéité pour le sol des décharges, et de l'assainissement de sols contaminés sous forme de nouveau terrain végétal. Cette dernière application avait été étudiée à l'intérieur d'un projet inter-régional qui avait intéressé aussi le canton du Tessin [Dino, G. A., Fornaro, M. 2005:326-327].

5.8.10. Formes de valorisation présentes dans les carrières analysées

Les données recueillies lors des visites de carrières en Suisse nous permettent de tracer une distribution des formes de valorisation des chutes de production. Le stockage en carrière est aujourd'hui peu pratiqué, mais constitue encore le 20% des modes de valorisation. Dans certains cas, le stockage se fait dans l'attente de pouvoir disposer de moyens propres de transformation, surtout de broyage, ou alors les matériaux sont utilisés pour aménager les accès aux bancs en exploitation.

La valorisation comme moellons et blocs informes pour l'aménagement des berges des rivières et des lacs ainsi que des murs de soutènement dans les ouvrages du génie constitue, aujourd'hui encore, la forme principale de valorisation. Ceci est sûrement lié à la prépondérance des carrières de roches

cristallines, comme les gneiss: ce dernières roches étant depuis toujours utilisées de cette manière. La transformation en granulats pour enrobés ou pour ballast est l'autre forme de valorisation rencontrée de nos jours dans les carrières suisses. Environ deux tiers des carrières ont recours à des entreprise tierces pour la transformation en granulats des chutes, ceci est dû surtout aux faibles quantités produites par chaque carrière, qui ne justifient pas des installations individuelles.

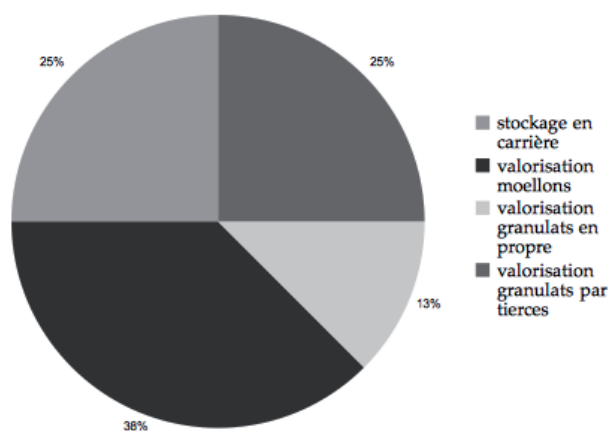


Fig. II.26. Formes de valorisation des chutes à l'intérieur de l'échantillon des carrières visitées

5.9. Réduction de la demande d'énergie

Les procédés d'exploitation et de transport de la pierre naturelle dans la carrière requièrent de l'énergie qui est, partiellement ou complètement, produite sur place. Ceci à cause de l'emplacement des carrières loin des centres habités et des axes de transit. Si des réseaux d'alimentation en énergie électrique pour l'industrie sont présents à proximité de la carrière, il faut les utiliser, dans les autres cas différentes solutions sont possibles pour la production. On se réfère ici surtout à une étude de cas réalisée en Grèce sur une carrière de marbre de taille moyenne située en montagne, ce qui rend ce cas, en partie comparable aux cas suisses [Kostantopoulou, P. et al. 2004]. Un autre problème est celui de l'utilisation de cette énergie. Les solutions applicables dans ce cas de figure sont celles qui impliquent le moindre investissement en argent, mais qui concernent les habitudes et le comportement des usagers. Ces mesures concernent autant une utilisation consciencieuse des machines, par exemple leur extinction quand elles ne sont pas utilisées, qu'une maintenance régulière des réseaux de distribution, électriques et d'air comprimée, et des machines. Ces mesures ont comme objectif une utilisation optimale des équipements disponibles.

Dans le cas d'une production d'énergie de la part de la carrière, dans la recherche citée, trois types de moyen de production ont été étudiés du point de vue de leur durabilité et de l'investissement économique. Les propositions sont une centrale de cogénération utilisant de la biomasse; un champ photovoltaïque et trois turbines éoliennes. La centrale de cogénération à biomasse est la plus favorable d'un point de vue technique vu la variabilité météorologique qui peut nuire au fonctionnement des autres alternatives. La variante éolienne pourrait aussi revêtir un intérêt dans le cas où la carrière devient aussi productrice d'énergie pour le réseau. Les sites des carrières pourraient en effet permettre l'installation de grands champs d'éoliennes ou photovoltaïques.

5.10. Remise en état après exploitation

La carrière de pierre naturelle de taille est une forme d'exploitation du territoire et du sol qui a une durée temporelle déterminée. Ceci signifie que déjà au moment du dépôt d'une demande pour un permis d'exploitation la destination finale du terrain de la carrière doit être prévue.

Il est important de rappeler les différences entre une carrière de pierre naturelle de taille et d'agrégats, ceci surtout au niveau des techniques d'exploitation, des dimensions et des nuisances produites envers l'environnement. Les dimensions réduites des carrières locales sont un avantage pour leur remise en état: en effet, sur une petite étendue, plusieurs formes de réutilisation du terrain sont envisageables [Sassi, P. 2008]. Ces formes sont traitées par la suite.

Les techniques utilisées dans les carrières de pierre naturelle de taille (voir le sous-chapitre II.2.3) sont sûrement moins nuisibles pour l'environnement, soit au niveau des bruits et des poussières produites soit au niveau des modifications produites dans la morphologie du territoire. Dans certains cas, ces dernières peuvent devenir même une chance pour certains sites afin de définir des nouvelles géographies. Les sous-chapitres qui suivent essaient de définir des nouvelles approches pour l'évaluation du devenir d'une carrière après son exploitation selon lesquelles la remise en état de nature assume la valeur d'une possibilité entre autres.

5.10.1. Estimation de la "valeur" d'une carrière

Il est impératif de pouvoir déterminer la valeur de la carrière, du point de vue environnemental, paysager, mais aussi culturel, afin de proposer la bonne forme de réutilisation ou renaturalisation. En effet, il est nécessaire de définir des paramètres qui permettent une évaluation de la valeur d'une carrière, au-delà de celle vénale qui, à la fin de son cycle d'exploitation, peut être considérée comme fortement diminuée. Quatre catégories de valeurs sont proposées: matérielle; géologique; culturelle et paysagère/ territoriale.

La valeur matérielle est constituée par le matériau exploité restant, c'est-à-dire la valeur du gisement qui reste après le cycle d'exploitation et qui pourrait être valorisé lors d'une future phase d'extraction, des matériaux restés aux pieds de la carrière, ainsi que des chutes d'exploitation, pouvant être elles aussi valorisées.

Un gisement de roche possède une valeur géologique parce qu'il peut être considéré en lui-même comme un important témoin visible de la géologie d'un lieu et pour cela être digne de conservation et valorisation. Dans certains cas l'extraction de la roche peut faire affleurer d'autres ressources géologiques importantes. L'évaluation de la valeur géologique d'un site d'exploitation doit donc être liée à la démarche de protection des géotypes d'importance locale ou nationale, des fossiles et des repères paléontologiques. La valeur géologique nécessite pour sa valorisation que la remise en état de nature du site d'exploitation ne soit pas complète.

La valeur de "trace" de l'activité humaine liée à l'exploitation, que la carrière constitue, est sa valeur culturelle. Les carrières ont été définies, par Luigi Marino, comme des "archives du sol": des lieux dans lesquels les "documents" originaux sur les procédés d'extraction sont conservés [Marino, L., éd. 2007]. Cette valeur "historique" est présente dans toutes les carrières de pierre naturelle de taille. Elle peut

constituer la base sur laquelle fonder des démarches de valorisation des sites d'extraction sous forme de centres didactiques et touristiques. Ceci est un argument important, surtout parce que les carrières en exploitation constituent souvent une ressource socio-économique, pour les zones qui les accueillent. Le fait de concevoir une réutilisation de ces sites, également dans un objectif socio-économique, constitue donc une réponse pertinente pour des régions périphériques. Dans des cas précis, certaines carrières peuvent constituer des importants témoignages d'histoire technologique pour l'industrie de la pierre, par exemple là où des techniques d'exploitation et de transformations particulières ont été utilisées, ou des "archives" des roches qui ont été utilisées pour des ouvrages spéciaux ou de grande valeur historique. Dans tous ces cas de figure, il est indispensable de pouvoir garantir la conservation des carrières et de leurs sites dans les meilleures conditions possibles [Marino, L., éd. 2007].

La carrière de pierre de taille occupe, souvent, des lieux qui ont une forte valeur paysagère. Il est clair que la cessation de l'activité d'exploitation peut constituer une possible ré-appropriation de ce morceau de territoire de la part de la flore, de la faune ou des Hommes. Cela, par contre, ne peut pas se résoudre simplement dans une remise en état de nature du site. Les modifications morphologiques que l'exploitation a produit peuvent être la base pour une valorisation à des fins paysagères du site de la carrière. Les utilisations sont variées: zone de loisirs et de sport, zone constructible, biotope, musée du territoire à ciel ouvert, etc. Dans le cas de carrières anciennement exploitées et dont l'exploitation aurait pu, dans certains cas, porter atteinte aux sites, une reconstruction paysagère peut être envisageable.

5.11. Formes de remise en état

La remise en état des carrières doit être prévue déjà lors de la demande du permis d'exploitation. Sa mise en oeuvre devrait idéalement se faire en parallèle avec l'exploitation, c'est-à-dire que lorsqu'un secteur d'extraction est délaissé, sa remise en état est réalisée. Il est clair que ceci n'est pas possible dans toutes les situations et dépend de la forme de remise en état projetée.

Indépendamment de la forme de remise en état choisie, un point important, soit dans le cas de carrières nouvelles soit de carrières anciennes, est la mise en sécurité des sites, surtout en ce qui concerne la stabilité gravifique des flancs de carrière. L'industrie de l'extraction considère surtout les dangers à court terme, mais pour un projet de remise en état, il est nécessaire de considérer un long terme [Giani, G. P. 1992]. Les solutions couramment utilisées dans les ouvrages de génie civil, comme les filets métalliques ou les ancrages, seront accompagnées, et si possible remplacées, par des solutions liées au façonnement des versants rocheux, comme des terrasses.

Selon Greco et al. [Greco, V. et al. 2006] quatre formes de récupération de la carrière peuvent être définies: récupération naturelle (remise à l'état de nature-renaturalisation); récupération productive (agriculture ou sylviculture); récupération technique et récupération urbanistique et fonctionnelle. Pour choisir la forme de récupération, les auteurs proposent de définir préalablement les critères d'analyses pour réaliser une Analyse Multicritères qui établira la forme la plus probable d'usage de la carrière. Cette méthode a été appliquée au cas des carrières de Mottola dans les Pouilles en Italie, sur un échantillon de gisements exploités ou abandonnés.

Afin de pouvoir analyser de la manière la plus objective possible le site d'exploitation, autant dans ses composantes physiques que socio-économiques, il faut réaliser: une analyse écologique; une analyse géologique; une analyse morphologique et hydrogéologique; un recensement des utilisations du sol; une analyse historique et une analyse urbanistique. Une observation précise des carrières selon une liste de critères établis est aussi nécessaire. Ces critères sont: le mode d'exploitation; la surface de la carrière; l'analyse de l'environnement physique; la proximité de sites d'intérêt historique ou naturel, et aussi le nombre et la taille des infrastructures qui desservent la carrière.

En ce qui concerne les formes possibles de réutilisation, on les développe aussi à l'aide des exemples fournis par Galin en France dans les années 1980 [Galin, R. 1984].

5.11.1. Récupération naturelle (Remise en état de nature)

Selon les formes d'exploitation ou l'état de dégradation du milieu naturel, dans le cas de carrières déjà exploitées, la reconstruction ou la constitution d'un nouvel environnement naturel sont nécessaires. Ceci permet d'améliorer la stabilité des versants, par exemple en les reboisant, et aussi les conditions hydrologiques. Le recours à des espèces locales, soit végétales soit animales, est impératif. Il est possible aussi de simplement "laisser faire à la nature".

5.11.2. Récupération productive

Selon le contexte, les carrières se trouvent souvent dans des zones agricoles. Leur remise en culture est donc envisageable soit du point de vue territorial soit du point de vue socio-économique. Dans d'autres régions, la sylviculture constitue le pendant à l'agriculture. Il est nécessaire de veiller à l'évacuation de l'eau et à une épaisseur suffisante de recouvrement pour le terrain de culture [Galin, R. 1984]. Les formes de culture seront choisies en accord avec la forme de la carrière et son environnement.

5.11.3. Récupération technique

Cette catégorie regroupe toutes les formes de récupération qui transforment les modifications produites par l'exploitation afin d'atteindre un but d'utilisation fixé. Dans le cas des carrières en puits ou en fosse, une récupération comme bassin d'épuration des eaux, de stockage ou de réalimentation est envisageable. Dans d'autres formes de carrières ou d'emplacements, la décharge contrôlée est aussi une forme possible de récupération.

5.11.4. Récupération urbanistique et fonctionnelle

Les formes regroupées dans cette catégorie comprennent les utilisations liées aux loisirs et à la construction. Les zones de loisirs dans un site de carrières peuvent être très variées: de l'escalade à la pêche sportive. Les zones constructibles, même si elles ne sont pas très répandues, peuvent être affectées soit à l'habitation soit à l'industrie.

Elles pourraient aussi servir pour l'installation de champs d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques. Cette utilisation pourrait être envisageable pour les carrières en flanc de taille alpines ou du Jura: les terrasses produites par l'exploitation peuvent, selon leur orientation, recevoir soit des panneaux photovoltaïques soit des éoliennes qui, grâce à la différence en altimétrie, ne se masqueraient pas les unes par rapport aux autres.

Nous résumons tout ce qui a été dit plus haut à l'aide d'un tableau permettant de mettre en relation la forme de remise en état avec le type de carrière. Cet outil simple peut aider dans la phase de planification d'exploitation pour énoncer des hypothèses quant à la destination de la carrière après sa fermeture comme site productif.

	Carrière en flanc de taille	Carrière en fosse	Carrière en puits	Carrière souterraine
Remise en état de nature	+	+	+ remblaiement	o
Récupération productive	+ sylviculture; viticulture; frutticulture	+	-	o/+ élevage de champignons; conservation de fromages, charcuteries et vins
Récupération technique	o décharge contrôlée	+ bassin d'épuration ou de stockage des eaux	+ bassin d'épuration ou de stockage des eaux	o décharge contrôlée
Récupération urbanistique et fonctionnelle	+ zone de loisirs; champs photovoltaïques ou éoliens	+ zone constructible	o zone de loisirs	+ zone de loisirs; entrepôts

5.12. Exemples de réutilisation de carrières de pierre naturelle

Quatre exemples de réutilisation fonctionnelle de carrières de pierre naturelle sont présentés ici de suite. Le choix de restreindre les cas exemplaires à la seule réutilisation fonctionnelle a été dicté par deux facteurs: le premier est que ce type d'approche vis-à-vis de la carrière de pierre naturelle est peu répandu, pour le moment, en Suisse, même si l'un des quatre exemples est celui de la Carrière de St-Triphon au Canton de Vaud. Dans notre pays, la remise en état de nature reste la forme la plus répandue et envisagée. Le deuxième facteur est que cette approche est inhérente à la profession de l'architecte parce qu'elle fait appel à sa capacité d'observation et compréhension du territoire. En effet, la réutilisation requiert la capacité de projeter avec la morphologie issue de l'exploitation afin de la mettre en valeur par des solutions simples, plutôt que par une approche technique.

5.12.1. Parc des sons aux carrières du Sinis à Riola Sardo, Oristano, Sardaigne (Italie)

Le Sinis est une zone péninsulaire de la Sardaigne Centre-Occidentale qui se trouve au nord du golfe d'Oristano. Elle est constituée de trois formations géologiques principales: les basaltes du Pliocène, le grès éolien et les calcaires du Miocène. Il existe aussi une zone de grès marins du Quaternaire. C'est exactement ce dernier gisement qui était exploité dans les carrières de Su Cuccuru Mannu, près de Riola Sardo, jusqu'à dans les années 1970. Après cette période, la fosse était devenue une décharge à ciel ouvert.

Le projet réalisé entre 2004 et 2007 pour le Parc des Sons à Riola Sardo est le fruit d'un concours public de 2003. Il avait comme objectif celui de donner une nouvelle fonction aux carrières de grès dont l'exploitation avait cessé, tout en garantissant l'assainissement du site. Le projet des architectes Pierpaolo Perra et Alberto Antiocho Loche propose avant tout de libérer des détritiques la carrière

en fosse en rendant visibles les traces de l'extraction et la géométrie que cette activité a produit. La profondeur de la carrière en fosse devient le nouvel horizon qui n'est dépassé par aucune des nouvelles constructions. Ces dernières se composent d'un espace pour les représentations, un théâtre à ciel ouvert; d'un parc de sculptures sonores et d'un bâtiment contenant les services, dont des salles polyvalentes et d'exposition. La structure du bâtiment est revêtue par des éléments en pierre naturelle locale, selon un appareillage par couches qui se fond avec les fronts de carrière qui constituent son arrière-fond. Les différentes activités culturelles organisées à l'intérieur des vieilles carrières permettent aux habitants de la zone et aux touristes de s'approprier à nouveau un lieu fortement lié à l'histoire et à la structure même du territoire.

5.12.2. La Cathédrale d'images aux carrières des Grands Fonts aux Baux de Provence (France)

Les Baux de Provence se trouvent sur la chaîne des Alpilles qui s'étend, en direction est-ouest, sur 30 km entre les vallées du Rhône et de la Durance. Ces reliefs sont constitués par du calcaire dur du

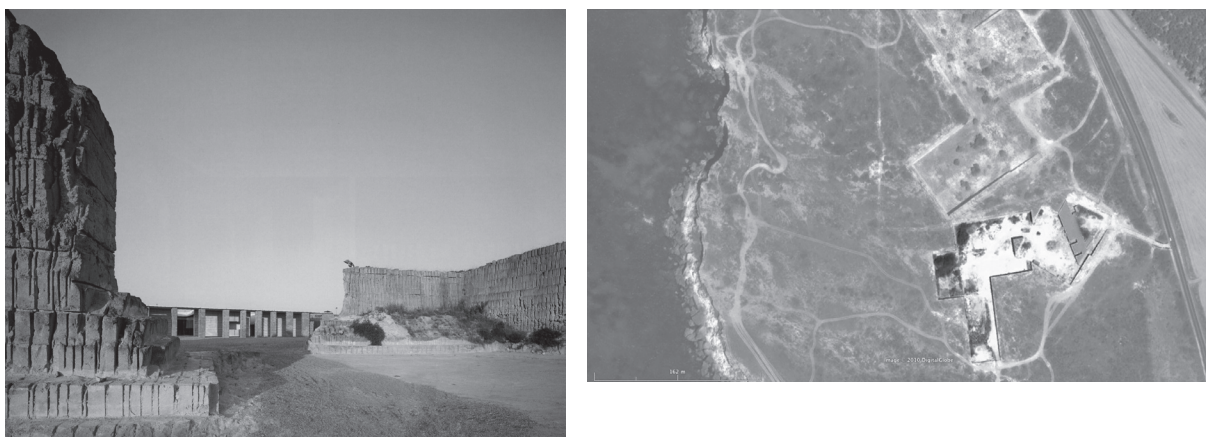


Fig. II.27. Parc des sons aux carrières du Sinis, vue [Mulazzani, M. 2009] et situation, base Google Earth

Néocomien, auquel est superposée une couche plus récente de calcaire coquillier, localement appelé "molasse coquillière". Ce sont ces gisements qui sont encore exploités à Fontvieille, près d'Arles. Le site des Baux est une masse calcaire de 15 hectares qui se trouve à une hauteur moyenne de 240 m/ sm. C'est un relief très fracturé et qui est traversé dans le milieu par le Val d'Enfer. Le village des Baux, dont la constitution remonte à l'époque des Celto-Ligures (premier millénaire av. J.C.) fut un important chef-lieu de la Provence jusqu'à la moitié du XVe siècle¹³ [Pouillon, F. 1973]. Les maisons, les églises et les fortifications furent essentiellement construites avec la pierre locale qui était extraite à plusieurs endroits du Val d'Enfer et sur les versants des Baux. Aujourd'hui ce patrimoine est exploité surtout à des fins touristiques. L'exploitation de la pierre des Baux de Provence a cessé, seules les carrières de Fontvieille sont encore en activité.

Les anciennes carrières souterraines des "Grands Fonts" dans le Val d'Enfer, près des Baux de Provence, n'ont plus été exploitées depuis 1935 pour en extraire le calcaire blanc. Albert Plecy, après une visite du site en 1975, décida d'y réaliser un lieu pour l'art audio-visuel. La programmation

13. La partie historique de l'ouvrage de Pouillon a été écrite sur la base des recherches historiques et généalogiques de France Arudy et Pierre Brière [Pouillon, F. 1973].

commença en 1977¹⁴.

Les différentes chambres produites par l'exploitation en souterrain de la carrière sont réutilisées comme autant de salles pour la projection d'images.

5.12.3. Les "latomies" de Syracuse, Sicile (Italie)

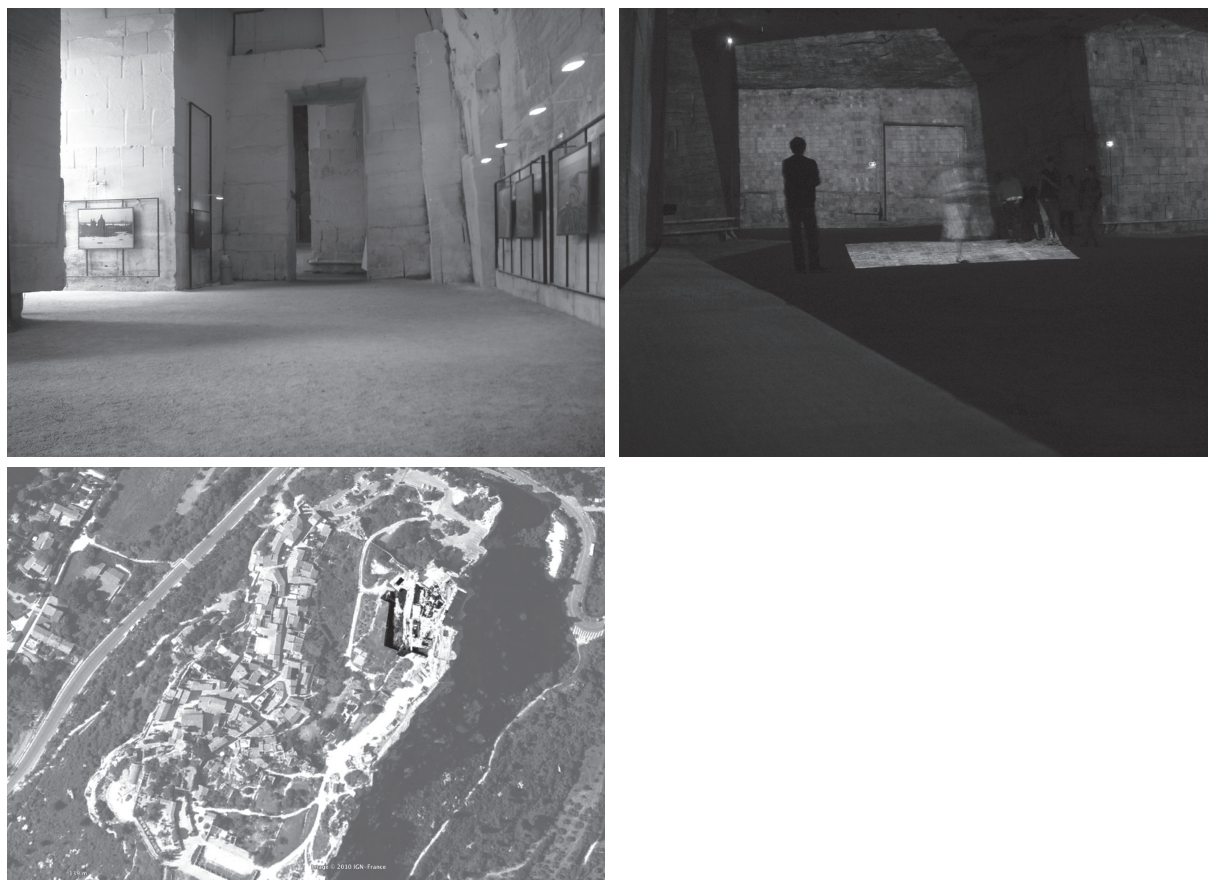


Fig. II.28. La Cathédrale d'images aux Baux de Provence, vue d'une galerie et d'une salle (© Marco Svimersky, 2007) et situation, base Google Earth

Le mot "latomia" est d'origine grecque et il est composé par *lâs*, pierre, et *tomíai*, de témnein, couper. Les latomies étaient en effet des carrières de pierre naturelle¹⁵. Ce mot fut utilisé aussi pour les prisons excavées dans la roche, parce que souvent c'étaient les esclaves et les détenus qui exploitaient ces carrières à ciel ouvert et y étaient aussi enfermés.

Dans la ville de Syracuse, ces carrières furent exploitées pour la pierre naturelle de taille et utilisées comme prisons, mais aussi comme habitations, lieu de sépulture et, comme pour celle dite "dei Capuccini", plantées pour devenir des jardins luxuriants. Cette dernière avait été choisie par les Capucins au XVI^e siècle pour y fonder un couvent. C'est à leur labeur que nous devons la transformation de cette latomie en jardin botanique. C'est à partir du XIX^e siècle que ces lieux deviennent une étape presque obligée pour le Grand Tour. Malheureusement coupées de leur rapport avec la mer à cause des bâtiments construits à partir de la moitié du XIX^e siècle, les latomies appartiennent désormais aux espaces publics de la ville de Syracuse.

14. Informations issues du site internet de la Cathédrale d'images: <http://www.cathedrale-images.com>, consulté le 27.07.2009.

15. <http://www.etimo.it>; <http://it.wikipedia.org/wiki/Latomia>; <http://www.ibmsnet.it/siracusa/latomie.html>; <http://www.galleriaroma.it/Siracusa/Monumenti/Monumenti/20Greci/Latomie.htm>; <http://www.dipbot.unict.it/cnr/files/cappuccini/cappuccini.htm>, consultés le 30.07.2009.

Ces lieux, et en particulier la "latomia dei Cappuccini", ont été un des sites de projet proposés pour le concours d'idées "Città di pietra" organisé lors de la Dixième Exposition Internationale d'Architecture de Venise en 2006 [D'Amato Guerrieri, C., éd. 2006].



Fig. II.29. Latomia dei Cappuccini, vue (© Giovanni Dall'Orto, 2008) et situation, base Google Earth

5.12.4. Les carrières de St-Triphon, commune d'Ollon, canton de Vaud (Suisse)

Les carrières, situées dans le lieu dit des "Andonces" dans la localité de St-Triphon, ont eu une très grande importance pour l'exploitation du "marbre noir de St-Triphon" dans la région lémanique et dans la Suisse entière, avec celle limitrophe du "Lessus". Leur exploitation a atteint le maximum entre 1880 et la Première Guerre Mondiale [Kündig, R., éd. 1997:190] grâce à la construction du réseau de chemin-de-fer du Simplon qui passe à côté des carrières. L'exploitation de ce calcaire du Lias supérieur spathique, comme pierre de taille, a cessée peu après la Deuxième Guerre Mondiale pour laisser place à la production de granulats. Cette activité était encore pratiquée dans les années 1970 [Badoux, H., Onde, H., éd. 1996:130], mais elle a cessé dans la décennie suivante [Kündig, R., éd. 1997:273].

La carrière du Lessus a été ensuite l'objet d'un projet de remise en état de nature qui a, en partie, effacé les traces de son exploitation et, en même temps, les caractéristique géologiques du lieu et des formations rendues visibles par l'activité extractive. On se trouve ici confrontés au problème de la conservation de géotopes "géohistoriques" et de leur mise en valeur par des projets paysagers [Hintermann & Weber 2001].

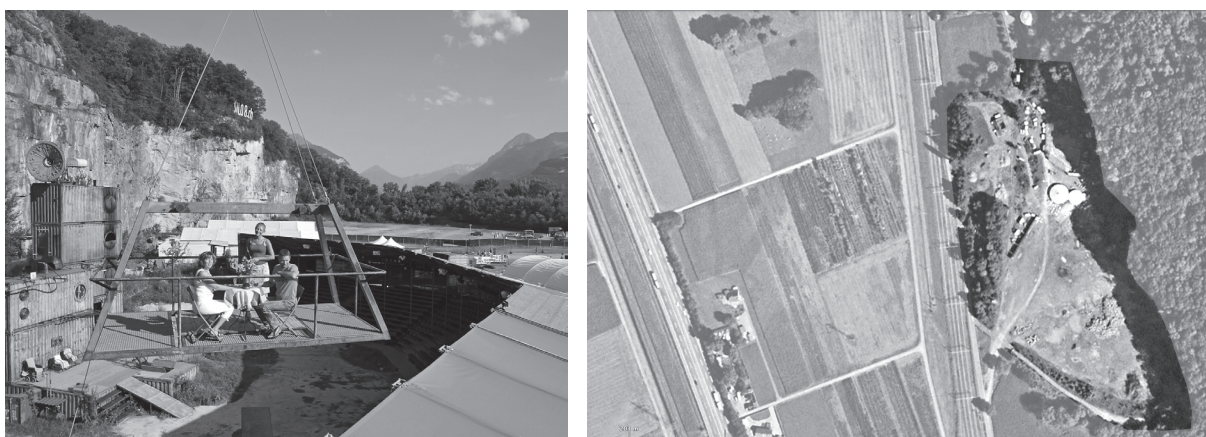


Fig. II.30. Carrières de Saint-Triphon, vue lors du spectacle "Silo8" de Karl's Kühne Gassenschau (© Ernesto Graf, 2010) et situation, base Google Earth

5.12.4.1. Les spectacles théâtraux de la compagnie Karl's Kühne Gassenschau

La troupe théâtrale Karl's Kühne Gassenschau commence à se produire dans des spectacles de rue en 1984 à Zurich. Depuis, 19 spectacles différents ont été réalisés et représentés dans plusieurs villes suisses et à l'étranger. En 1995, le spectacle "Rupture", adaptation en langue française du spectacle "Steinbruch" de 1994, est la première occasion pour la troupe de se produire dans le cadre de la carrière désaffectée des Andonces à Saint-Triphon. Ernesto Graf, fondateur et codirecteur de la troupe, dit à propos de la carrière: «Il y a quelque chose de magique, c'est notre dessert de jouer ici»¹⁶. Le spectacle en langue allemande avait été représenté à l'intérieur de la carrière de Steinmaur, dans le canton de Zurich. Après ce premier succès (55'000 spectateurs), en 2001, la troupe présente un nouveau spectacle en langue française, "Trafic", toujours dans la carrière de Saint-Triphon et qui a été vu par 70'000 personnes. En 2004 et 2005, le spectacle "Akua" est à nouveau un succès de public, 150'000 spectateurs au total pour deux années de représentations. Karl's Kühne Gassenschau prépare actuellement une adaptation française du spectacle "Silo 8" qui sera représentée dans la carrière de Saint-Triphon à partir de mai 2010¹⁷.

Pour cette troupe de théâtre qui fonde son succès sur des représentations aux décors de grandes dimensions, souvent issus de matériaux et éléments de l'industrie, et aux effets pyrotechniques, la carrière désaffectée est un lieu idéal pour la mise en place des spectacles. Ceci est souligné aussi par le fait que même en Suisse alémanique la troupe se produit souvent dans des endroits semblables (carrières de Steinmaur ou de Würenlos).

5.12.4.2. Le projet pour un nouveau musée cantonal des Beaux Arts¹⁸

Suite au refus en votation populaire du 30 novembre 2008 de la part des citoyens du canton de Vaud pour la construction d'un nouveau Musée cantonal des Beaux-Arts au bord du lac Léman à Lausanne, un appel à proposition fut lancé par le Canton aux différentes communes. Une des propositions fut celle de la commune d'Ollon qui proposa, au mois de juin 2009, de réaliser le nouveau Musée sur le site des carrières des Andonces à Saint-Triphon. Ce projet n'a pas été retenu par le groupe d'évaluation du Conseil d'Etat. Il est néanmoins utile d'analyser les arguments de la commune d'Ollon au soutien de ce projet de réutilisation de la carrière comme lieu culturel [St-Triphon 2009]. Premièrement, la carrière est considérée comme un lieu au fort attrait géologique, historique (le "marbre noir" est un matériau qui caractérise la région lémanique), paysager («un écrin de marbre, face aux Dents de Midi» [St-Triphon 2009:3]) et d'intérêt public, du fait qu'elle a déjà été utilisée pour des spectacles. Deuxièmement, la carrière est un lieu sans contraintes majeures, parce qu'elle est actuellement vide sur une surface de six hectares. De plus, elle constitue une seule entité foncière et le plan d'affectation la place en zone constructible artisanale (cette décision de 1994 étant déjà une forme de valorisation et réutilisation de la carrière) facilement convertible, selon les autorités, en zone constructible d'utilité publique [St-Triphon 2009:4]. Troisièmement, les raccordements aux réseaux routier et ferroviaire de la carrière constituent aujourd'hui des avantages pour l'accès au musée hypothésé.

16. Di Matteo, Karim, "Les foux furieux d'AKUA sont de retour", article paru dans *24Heures*, 23.10.2009, p.23.

17. Les informations sur Karl's Kühne Gassenschau sont issues des sites internet suivants: <http://www.karlskuehnegassenschau.ch/> et <http://www.silo8.ch>, consultés le 21.10.2009.

18. Les informations concernant ce projet sont disponibles à la page internet suivante: http://www.st-triphon.ch/Beaux_Arts/resume.html, consulté le 28.01.2010.

Les conclusions, plutôt que littéralement conclure la problématique analysée dans les sous-chapitres précédents, sont des propositions pour le développement, à court et moyen terme, de l'exploitation de la pierre naturelle de taille. La première traite de la valorisation de matériaux extraits lors des travaux de terrassements dans le rocher sous forme de pierre naturelle de taille. Cette démarche, encore peu répandue dans notre pays, est appuyée par deux études de cas de chantiers réalisés en Suisse romande, à Lausanne et Genève. La deuxième proposition est celle d'une liste de critères pour la planification de l'ouverture ou de la réouverture des sites de carrière. La troisième est une réflexion autour de la situation du marché économique qui est au soutien des deux propositions précédentes.

6.1. Exemple de la "carrière urbaine". Valorisation de la ressource "pierre naturelle" lors de travaux d'excavations¹⁹

6.1.1. Introduction

6.1.1.1. La "carrière urbaine" comme forme de valorisation des matériaux extraits

La valorisation du géomatériau pierre naturelle lors de travaux d'excavation est une alternative à la mise à la décharge qui se pratique actuellement pour les "déchets" d'excavation. La valorisation de tous les types de "déchets" est une des mesures prévues par la *Loi Fédérale sur la protection de l'environnement* dans les principes visant à la diminution des nuisances produites [LPE art. 7 et 30], par la Recommandation de la Société Suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA) 430 sur la gestion des déchets de chantier [SIA 430 1993] ou par les consignes de l'Association Eco-Bau pour la durabilité et les constructions publiques [Eco-Bau 2005]. Dans cette dernière publication, on trouve aussi des indications sur l'utilisation des matériaux d'excavation lors de fouilles: utilisation sur place; utilisation sur un autre chantier; remise en culture; stockage intermédiaire autorisé et mise à la décharge. La solution idéale serait d'utiliser tout de suite le matériau ou de le valoriser dans une autre application constructive.

La "carrière urbaine", terme qu'on utilisera ici pour indiquer l'exploitation d'un terrassement afin d'en extraire de la pierre naturelle de construction, offre l'avantage, par rapport à la carrière de pierre traditionnelle, de ne pas poser le problème de sa réutilisation. Ceci est aujourd'hui une des raisons de la difficulté de l'ouverture ou de l'agrandissement des sites d'exploitation. Cette valeur d'exploitation temporaire constitue aussi un désavantage: les volumes extraits sont faibles à cause de la courte durée de l'exploitation.

Dans le contexte suisse, la valorisation des roches excavées est souhaitable pour deux raisons: premièrement, par la morphologie même du territoire qui est constitué en large partie par des roches, ce qui rend cette ressource abondante et, deuxièmement, à cause de la disponibilité réduite de roches locales, qui est la conséquence de la disparition de nombreuses carrières dans les dernières décennies.

19. Cette réflexion autour de la valorisation de la pierre naturelle lors des travaux d'excavation a été réalisée comme pièce annexe pour le rapport final du "Projet Deep City. Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains", réalisé à la Faculté Enac de l'EPFL pour le Programme National de Recherche 54 "Développement durable de l'environnement construit". Voir à ce propos le site internet du PNR 54: <http://www.nfp54.ch> et la page du Laboratoire Geolep de l'EPFL: <http://geolep.epfl.ch/page26654.html>, consultés le 22.02.2010.

Une exploitation des matériaux extraits dans le cadre de travaux souterrains peut s'effectuer lors de travaux de terrassement pour la construction de bâtiments ou lors de l'excavation de tunnels ou tout autre ouvrage souterrain. Les études de cas proposées appartiennent à la première catégorie, mais dans l'élaboration d'une possible méthode pour l'exploitation des "carrières urbaines", on essaie de considérer aussi les problèmes posés par le deuxième type d'excavations.

6.1.1.2. Le problème de l'approvisionnement en pierre naturelle dans les chantiers de restauration

La disparition des carrières de pierre naturelle en Suisse constitue un problème pour les chantiers de restauration des monuments historiques. L'approvisionnement en matériaux de la même provenance ou de la même pétrographie que ceux d'origine est souvent très difficile. La richesse et les différences géologiques du territoire Suisse ont eu comme conséquence que les bâtisses reflétaient traditionnellement la géologie du lieu qu'elles occupaient. En effet, les bâtisseurs exploitaient des gisements à proximité du site de construction, mais ces carrières sont aujourd'hui souvent inaccessibles à cause du développement des centres urbains, des mesures de protection de l'environnement ou simplement parce que ces types de roches ne constituent pas un intérêt économique suffisant, et leur exploitation a donc cessé.

Aujourd'hui les restaurateurs essaient d'éviter le recours à des pierres naturelles de substitution et la pierre naturelle locale est, en conséquence, la plus recherchée. Ceci est déterminé d'une part, par une philosophie de la restauration qui vise à la conservation de la composition des matériaux des bâtisses et, d'autre part, pour des raisons statiques: le mélange de pierres de duretés et de résistances à la compression différentes pouvant entraîner des ruines locales [ARMP, éd. 2000].

Le manque de pierre naturelle lors des différents types de travaux de maintenance et de restauration des monuments historiques engendre de gros problèmes, surtout dans le cas des roches qui possèdent une durée de vie réduite à cause de leur faible résistance aux agents atmosphériques et aux polluants des villes contemporaines. Les "molasses" du Plateau constituent un cas exemplaire à cet égard. Les principaux centres de la Suisse se trouvent sur le Plateau, il en est de même pour les monuments. On cite, à titre d'exemple, la Cathédrale de Saint-Pierre à Genève, celle de Notre-Dame à Lausanne, celle de Saint-Nicolas à Fribourg ou encore la Collégiale de Saint-Vincent de Berne. Les grès de la Molasse sont sensibles aux intempéries s'ils ne sont pas protégés, surtout aux attaques acides et à l'érosion, et ils nécessitent donc une maintenance régulière. Ceci induit une forte demande de ces grès pour la restauration et la rénovation. La durée de vie est estimée, par exemple, pour les pierres de la Cathédrale de Lausanne, entre 50 ans, pour la dégradation de la "forme", et 100 ans pour les ruines structurelles [Amsler, C. 1996].

Cette demande élevée ne peut malheureusement pas être absorbée par la production locale, parce que le nombre de carrières actuellement actives dans l'exploitation des grès de la Molasse est très réduit, environ une quinzaine de carrières des grès pendant les années 1990, dont seulement deux en Suisse Romande [Félix, C. 1996]. Ceci est actuellement encore vrai.

Pour ces besoins très localisés géographiquement, et parfois aussi temporairement, l'exploitation d'un terrassement pour l'extraction de pierre naturelle peut devenir la seule source de pierre naturelle locale. Les cas d'études qui suivent en sont une preuve par l'acte.

6.1.2. La nouvelle salle de gymnastique du gymnase de la Cité-Mercerie à Lausanne (1990-1992).

6.1.2.1. Introduction

Le projet de la nouvelle salle de gymnastique, proposé par le bureau d'architectes Musy et Vallotton, prévoyait son intégration dans le tissu de la Cité de Lausanne par son enfouissement total et la réalisation sur la toiture d'une placette publique.

L'excavation d'un volume si important en ville est toujours problématique: dans le cas présent, cette difficulté technique se couple avec le fait que la colline de la Cité est un lieu de grande importance pour l'histoire lausannoise. Premièrement, l'actuel gymnase de la Cité-Mercerie occupe l'édifice du Nouvel Hôpital de Lausanne construit entre 1766 et 1771, sur le dessin de l'architecte Rodolphe de Crousaz, à l'emplacement de l'Ancien Hôpital de Notre-Dame. C'était une partie du quartier de la Cité-Dessous, né autour de la porte de la Grande Roche et de l'Église Saint-Étienne. Il était pratiquement certain que l'excavation superficielle permettrait de mettre à jour des repères archéologiques. Une première phase de fouilles a donc dû être intégrée depuis le début de la planification du chantier²⁰.

Deuxièmement, le site se trouve sur une falaise, les Grandes Roches, dont on avait extrait la "molasse" pour la construction du Nouvel Hôpital [Grandjean, M. 1965]. La fouille a donc eu lieu dans cette même roche.



Fig. II.31. Le Gymnase de Cité-Mercerie à Lausanne, base orthophoto de la Ville de Lausanne.

6.1.2.2. Les différentes étapes de terrassement

L'excavation devint l'occasion d'une importante fouille archéologique, qui constitua la première partie des travaux de terrassement de ce chantier. Elle se termina à 507.60 m s/m vers le nord et 505.50 m s/m au sud.

Pendant cette première phase d'excavation, on établit, à l'aide de sondages préalables, que sous la couche de marne et de remblais, se trouvait un important gisement de grès de la Molasse d'environ 1'860 m³. C'était du grès de la Molasse d'eau douce inférieure de l'Aquitainien, connu sous le nom

20. Pour un résumé des découvertes archéologiques voir les textes de Denis Weidmann, archéologue cantonal, publié dans: [Service des bâtiments, éd. 1994] et [Giovanna, S. 1991].

de "molasse grise de Lausanne": la roche qui servit pour la majorité des bâtiments lausannois et provenant de différentes carrières dans le territoire de la ville. Ce grès est feldspathique, avec une matrice argileuse variable à l'intérieur d'un même banc. Celui rencontré était sûrement de bonne qualité et appartenait à l'important gisement de la "Grande Roche" qui s'étend sur cet éperon rocheux de la Cité de Lausanne. Sa résistance aux agents atmosphériques est prouvée par le bon état de conservation du bâtiment de la Mercerie. Pendant les travaux de rénovation de 1979-1986, seules les parties en pierre naturelle les plus endommagées des façades, tels les bases des pilastres ou les montants et tablettes des fenêtres, avaient été substituées [Service des bâtiments, éd. 1990].

La bonne qualité du gisement, son caractère "local", la demande en grès pour la restauration de la Cathédrale et le fait que le maître d'ouvrage était l'autorité publique, déterminèrent la décision d'exploiter ce terrassement sous forme de carrière de pierre de taille. On fut confronté à l'ouverture d'une carrière urbaine à Lausanne après des siècles de disparition de cette activité du centre-ville!

La deuxième phase du terrassement était constituée par la reprise en sous-oeuvre, sur environ six mètres de hauteur, du bâtiment du gymnase de la Mercerie et le début de la réalisation d'une paroi épinglée sur deux niveaux jusqu'à une hauteur de 503 m s/m.

La troisième phase de terrassement fut l'exploitation de la "molasse" sur quatre mètres de profondeur. Elle fut exécutée par une équipe composée par l'entreprise de construction et des carriers professionnels. C'est cette partie qu'on développe dans les prochains paragraphes.

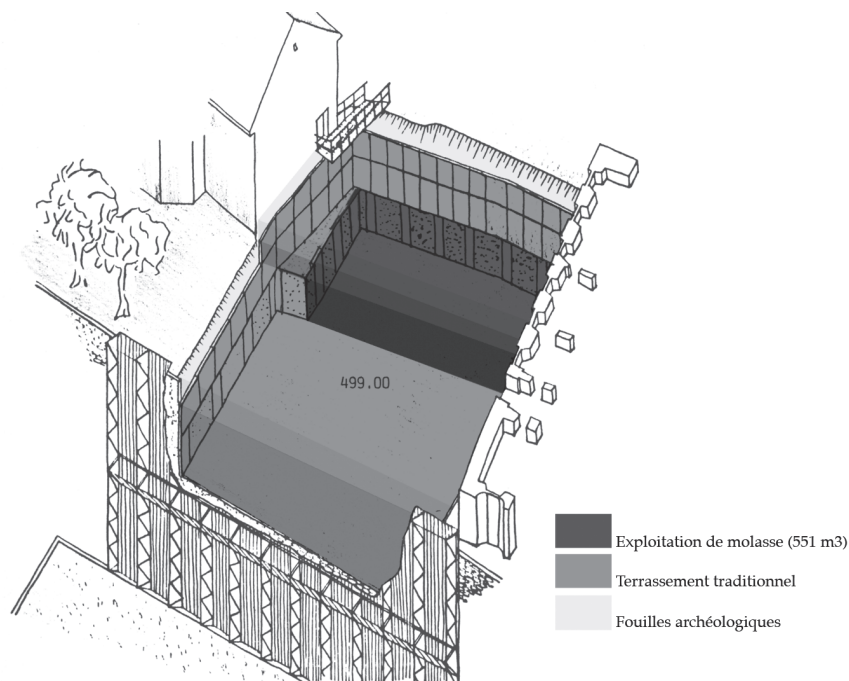


Fig. II.31. Schéma des différents types de terrassements, dessin de base de Jean-Pierre Marmier, ingénieur

6.1.2.3. La carrière urbaine

L'exploitation de la carrière urbaine commença en novembre 1990. Elle se termina, après cinq mois et demi, à la mi-mars 1991. Au début des travaux, il fut décidé de réduire le volume exploité à 806 m³ de pierre naturelle, par rapport au 1'860 m³ estimés, cela afin de respecter les délais du chantier. En effet, la salle de gymnastique devait être utilisable dès la rentrée scolaire 1992.

La partie "carrière" du terrassement occupa le nord du site, et en même temps, un terrassement traditionnel fut exécuté dans la partie sud. Ce partage entre excavation traditionnelle et exploitation de pierre naturelle permit d'équilibrer le retard pris par cette opération délicate.

Le calendrier du chantier posait le problème de la mauvaise saison. En effet, la carrière resta ouverte pendant la période hivernale, situation contraire aux règles de l'art, surtout pour le cas des grès de la Molasse. L'eau présente dans la roche en quantité supérieure à celle de la belle saison, rend la "molasse" fragile et demande de grandes précautions. Dans le cas spécifique, les blocs extraits, d'un volume d'environ 2 m³, furent enveloppés dans des bâches étanches et acheminés dans des lieux de stockage appropriés en dehors de la ville. Le hangar chauffé à Vernand-Dessous fut réservé aux blocs extraits en plein hiver, les autres furent conservés dans un dépôt extérieur à Ecublens. En ces lieux, les blocs, recouverts par une couche de sable, s'asséchèrent pendant une période de 3 à 6 semaines. La perte de l'eau de carrière est une nécessité pour les pierres tendres, mais la durée et les précautions à prendre en période hivernale sont bien supérieures.

Les techniques d'exploitation de cette "carrière urbaine" furent celles utilisées dans les carrières suisses de grès tendres, c'est-à-dire une haveuses à chaîne, pour les coupes verticales, une perforation par marteau piqueur et coins écarteurs pour les coupes horizontales et un abattage des blocs par des coussins hydrauliques. Cette méthode d'extraction permit la découpe de blocs de forme régulière avec une forte réduction des chutes produites.

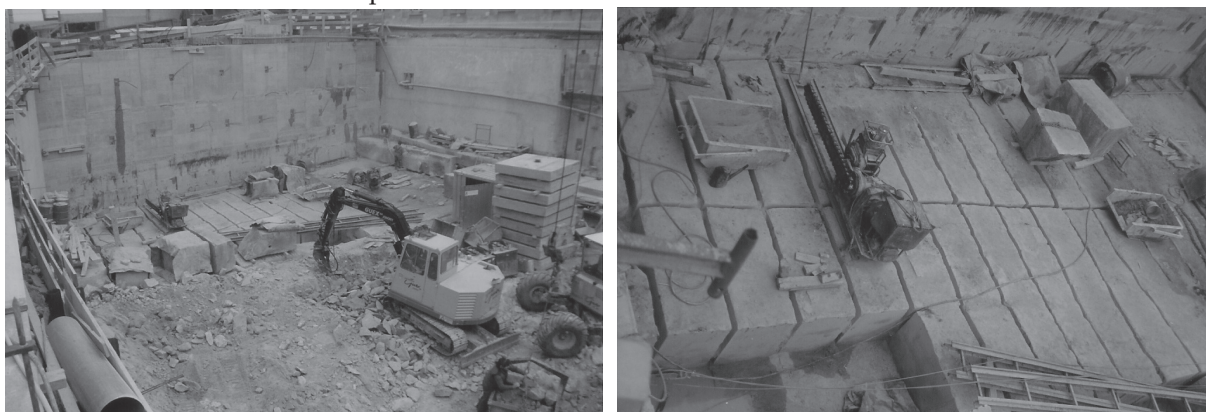


Fig. II.32-33. Exploitation de la carrière urbaine (© Jean-Pierre Marmier, 1990-1991)

6.1.2.4. Volume de pierre exploité

Du volume prévu de 806 m³ de "molasse", seul un volume de 551 m³ fut extrait, ce qui correspond à environ 110 m³ de roche par mois. Cette réduction fut une conséquence des difficultés et des imprévus rencontrés lors de l'exploitation. Après assèchement, seuls 278 m³ de pierre naturelle extraite avaient une qualité acceptable pour les utiliser dans les travaux de restauration (ce qui équivaut à presque 50% de chutes). La principale cause de la mauvaise qualité fut la présence de couches marneuses et argileuses dans la partie supérieure du gisement.

6.1.2.5. Bilan économique

Nous essayons d'établir l'incidence du coût de l'exploitation de la "molasse" sur le montant total lié aux terrassements. Il faut rappeler que, dans ce cas précis, les frais des terrassements comprenaient aussi la première phase exécutée comme fouille archéologique.

Le coût final des terrassements, y compris l'exploitation de la molasse, fut de 1'233'284.85 CHF²¹.

L'extraction coûta 400'841.85 CHF, ce qui correspond à environ 30% du coût total.

Le volume de "molasse" extraite fut de 551 m³, il est donc possible de déterminer le coût théorique des terrassements si la valorisation de la pierre naturelle n'avait pas eu lieu. Le coût d'excavation lors de la soumission du chantier s'élevait à 76.- CHF/m³, il faut ajouter à ceci le coût de la mise à la décharge du matériel extrait, qui peut être estimé à environ 10.- CHF/m³. Le coût de l'excavation traditionnelle de la "molasse" aurait donc coûté 47'386.- CHF. Ce chiffre est sûrement inférieur au coût réel de l'excavation, parce que, au cours du chantier, il fallut ajouter une plus-value pour les travaux d'excavation. Le coût final du terrassement sans exploitation de la "molasse" aurait donc été de 879'829.93 CHF.

Le prix de revient de cette "molasse" fut de 1'442.- CHF/m³, ce qui se situait dans la limite inférieure des prix pour des grès suisses à la même époque (les prix des carrières variaient entre 1'440.- et 1'620.- CHF). Ce prix de revient fut calculé en divisant le coût d'exploitation par le volume de pierre utilisable (278 m³).

Dans notre cas la molasse fut vendue pour le prix de revient susmentionné, ce qui correspond aux frais engendrés par l'exploitation. On peut donc admettre que le coût final du terrassement fut de 832'443.30 CHF, ce qui correspond au prix final des terrassements auxquels on a soustrait les coûts de l'exploitation.

L'exploitation et la valorisation de la "molasse" permit d'épargner environ 170.- CHF/m³ de pierre naturelle utilisable (47'386.- CHF/278 m³ de "molasse" utilisable) ou, si l'on préfère, 5% du coût des terrassements sans extraction de pierre naturelle.

Les chiffres reportés sont ceux de 1991, ils permettent l'estimation d'ordres de grandeurs. L'unicité du cas étudié ainsi que l'âge des données ne permettent pas une généralisation des résultats.

6.1.2.6. Conclusions

Cette étude de cas ne permet pas d'énoncer de règles absolues, mais il est possible de souligner quatre points importants qui doivent être considérés lors de l'évaluation d'un projet de valorisation:

Premièrement, une entente entre tous les intervenants est nécessaire et peut être atteinte seulement si cette phase d'exploitation est planifiée depuis le début du projet.

Le cas étudié est un cas particulier, parce qu'il y avait correspondance entre le maître d'ouvrage du chantier de construction et le bénéficiaire de la pierre naturelle extraite. Il faut noter que des démarches semblables ont été envisagées depuis ce chantier, dans le but de fournir du grès pour le chantier de la Cathédrale de Lausanne, mais elles n'ont pas pu être réalisées. La cause de ces insuccès est liée, dans un nombre limité de cas, à la qualité insuffisante des roches et, dans la majorité des cas, à l'impossibilité d'associer les exigences des maîtres d'ouvrage, c'est-à-dire les dépassements de délais et les bilans économiques liés à ces derniers, et celles du chantier de la Cathédrale, surtout en ce qui concerne le prix de revient de la "molasse".

21. Toutes les informations et les données citées dans le cas d'étude ont été aimablement transmises par M. Jean-Pierre Marmier, ingénieur civil, Lausanne.

Deuxièmement, la valorisation du matériel extrait doit devenir un des objectifs principaux du projet d'exploitation.

Pour le chantier de la Cité-Mercerie seuls 51% du volume de pierre extrait a pu être utilisé dans la restauration, ce qui signifie que le restant a été traité comme déchet. Il faudrait encore vérifier si ces mêmes roches n'auraient pas satisfait d'autres types d'utilisations, par exemple pour des constructions nouvelles ou la production de produits dérivés, tels les granulats. Si on vise un rendement environnemental maximal, ce qui correspond dans ce cas à maximiser également le rendement économique, il est nécessaire de prévoir des mesures qui permettent une utilisation totale des matériaux extraits.

Troisième point, il faut définir de manière précise la méthode de calcul du prix de la pierre naturelle. La façon de calculer, dans le cas présent, ne considère pas les coûts d'exploitation liés à l'ensemble du volume de pierre extraite, ce qui ferait diminuer sensiblement le coût, mais auquel il faudrait ajouter le coût d'élimination des chutes ou les revenus d'une possible valorisation des mêmes.

Quatrième point, le bilan final des coûts de terrassement peut être amélioré par la valorisation du géomatériau pierre naturelle.

Une valorisation de la pierre naturelle lors de travaux d'excavation, permet, en fixant un prix de vente de cette pierre dans la limite inférieure de ceux du marché, de faire des économies, même si les volumes extraits furent faibles et le pourcentage des chutes élevés.

6.1.3. La fouille pour le nouvel herbier des Conservatoire et Jardin Botanique de la Ville de Genève (juin-août 2010)²²

La Ville de Genève lança en 2007 un concours d'architecture pour la réalisation d'un nouvel herbier et des nouveaux espaces d'accueil pour le Conservatoire et Jardin Botanique. Le projet retenu, du bureau d'architectes Bassi Carella de Genève, prévoit un herbier sur trois niveaux souterrains ainsi que trois pavillons d'accueil pour le public. L'herbier souterrain répond parfaitement aux exigences de conservation des échantillons surtout du point de vue de l'hygrométrie et de la température. La réalisation de ce projet a commencé²³ par une première phase d'excavation qui nous traitons ici parce qu'elle est partiellement réalisée dans une couche de grès de la Molasse.

Les sondages géologiques réalisés avant les travaux de construction, ont permis de découvrir la présence de grès de la Molasse riche en éléments calcaires (la fameuse molasse "lacustre" d'âge Chattien, donc d'environ 30 millions d'années [Septfontaine, M. 1999:40; de Quervain, F. 1969:213]) à partir de six mètres de profondeur, ce qui correspond au troisième niveau en sous-sol du futur herbier. La présence de ce gisement a tout de suite éveillé l'intérêt de la Ville de Genève parce que ce grès de la Molasse est le matériau de construction présent dans plusieurs monuments genevois et il n'était plus

22. Les informations sur ce chantier sont issues d'un article publié par la Tribune de Genève du 7 juillet 2010 (<http://www.tdg.ch/geneve/actu/gisement-molasse-decouvert-jardin-botanique-2010-07-07>, consulté le 15.07.2010); par Le Temps du jeudi 8 juillet 2010, du communiqué de presse de la Ville de Genève de mercredi 7 juillet 2010 (<http://www.ville-geneve.ch/themes/amenagement-construction-logement/construction-renovation-batiments/nouvelles-constructions-batiments/projets/institut-conservatoire-jardin-botaniques/>, consulté le 15.07.2010) et d'un entretien eu avec M. Antonio Leonelli, architecte du Service d'Architecture de la Ville de Genève et responsable pour les travaux du nouvel herbier.

23. Mois de juillet 2010.

exploité depuis environ deux siècles. La Ville a donc décidé de valoriser ce matériau d'excavation afin de pouvoir disposer d'un matériau de rénovation local pour les chantiers de restauration.

Cette découverte assez précoce du gisement de grès de la Molasse a permis d'intégrer, dès les phases de planification du chantier, l'exploitation de la pierre naturelle. Une première estimation de la puissance du gisement, suite aux premiers sondages, fut d'environ 1'500 m³. Une analyse successive, faite en 2008 afin de déterminer précisément les caractéristiques du grès, permit non seulement de valider la bonne qualité du matériau, mais aussi de définir que la puissance du gisement était d'environ 700 m³. Sur ces quantités à exploiter, la Ville étudia des scénarios possibles d'organisation de l'extraction. La première hypothèse était celle que la Ville même se chargeait de l'exploitation, du stockage du matériau, nécessaire pour la conservation de ce grès, et de la commercialisation des quantités de grès de la Molasse qui n'auraient pas été directement utilisées dans les chantiers de la Ville. Cette hypothèse fut écartée parce que, d'une part, la Ville ne disposait pas des équipements nécessaires ni pour l'exploitation et le stockage ni pour la vente du grès et, d'autre part, parce que l'investissement financier et les temps d'arrêt du chantier semblaient trop élevés. La Ville de Genève demanda donc à des carriers et à des tailleurs de pierre dans quelle mesure cette exploitation pouvait les intéresser et s'ils étaient disposés à la réaliser. C'est cette deuxième forme qui s'est concrétisée grâce à la formation d'un consortium de trois entreprises de taille de pierre. L'accord stipulé pour l'exploitation de la "carrière urbaine" entre la Ville de Genève et les carriers comporte le paiement par ces derniers d'un droit d'exploitation calculé sur la base de la quantité de pierre naturelle réellement extraite, ainsi que la mise en réserve, pendant dix ans, d'une quantité de grès de la Molasse d'environ 25 m³, pour l'usage exclusif de la Ville de Genève. Cette quantité, qui dépendra aussi du volume final de pierre naturelle, a été estimée par les services de la ville comme étant le besoin en grès de la Molasse pour les remplacements. Un volume de 300 m³ nets a été prévu initialement dans l'accord, mais au mois de juillet 2010 déjà plus de 400 m³ ont été extraits et la fouille n'a pas encore atteint son niveau le plus bas. Il est donc probable qu'à la fin des travaux la quantité extraite soit ramenée au maximum estimé de 700 m³.

La fouille à une surface de 600 m², mais environ la moitié de l'excavation a été réalisée de manière traditionnelle au marteau piqueur.

L'exploitation est réalisée par un carrier professionnel, appelé par le consortium, à l'aide d'une haveuse et a commencé le 9 juin 2010. Des découpes verticales d'une profondeur de deux mètres sont réalisées, ensuite les blocs sont libérés par une découpe horizontale au fil diamanté ou par perforation et cassure aux coins écarteurs. Ces blocs sont ensuite partagés en deux moitiés, afin d'atteindre une taille d'environ 120 x 200 x 120 cm et un poids inférieur à 8 tonnes. Les blocs sont déplacés au fond de la fouille par un élévateur à fourche et sortis à l'aide d'un camion grue. Enfin, les blocs de grès de la Molasse sont acheminés par camion vers les lieux de stockage.

Le retard sur les délais de chantier, initialement estimés à environ deux à quatre mois, devrait se réduire à un mois et demi. Dans le cas présent, ce retard, qui a été en tout cas intégré dès le début dans le planning du chantier et dont les retombées financières ont pu donc être calculées, constitue en quelque sorte un avantage parce qu'il permet une reprise des travaux de maçonnerie après les "vacances du bâtiment". Ceci assure un déroulement sans interruption de cette deuxième phase des travaux.

Ce deuxième exemple de "carrière urbaine" montre encore une fois que ce type d'opération est soutenable si elle est prévue depuis les premières phases de planification du chantier. En plus, elle permet de réaliser les fouilles de façon durable, en réduisant les nuisances produites par les perforations et celles des camions qui auraient été nécessaires pour le transport des déchets de démolition dans des décharges, ainsi que de réaliser une réserve pour la Ville et les carriers de ce rare grès de la Molasse.

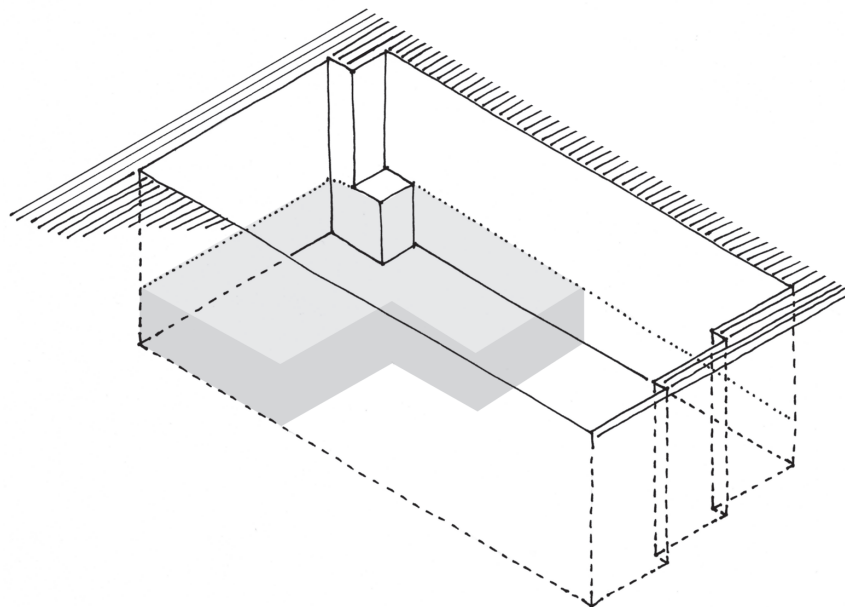


Fig. II.34. Volume de grès de la Molasse extrait en exploitation type carrière

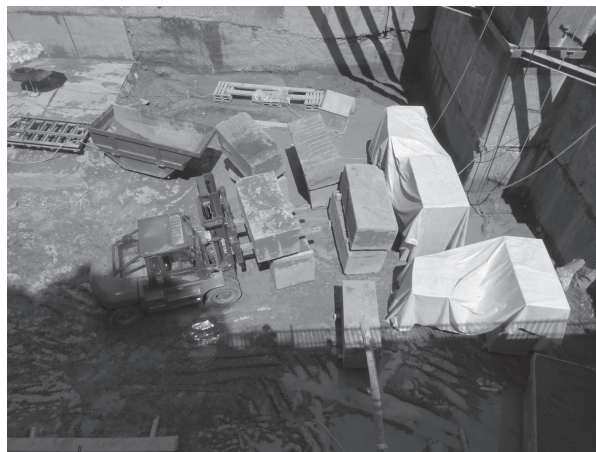


Fig. II.34-35. Exploitation de la carrière urbaine à la haveuse et déplacement des blocs extraits

6.1.4. De la fouille à la carrière. Une méthode possible pour l'exploitation d'une "carrière urbaine"

On essaie, dans les paragraphes qui suivent, d'énoncer quelques principes simples qui pourraient servir de repères pour la planification d'extractions de pierre naturelle lors de chantiers urbains. Trois types de roches, sédimentaires arénacées, sédimentaires carbonatées et cristallines, sont considérées pour la description des techniques à utiliser. On estime que ces trois familles de roches sont les plus représentatives des trois régions suisses du Jura, du Plateau et des Alpes, en ce qui concerne les sols rocheux qui pourraient devenir le lieu de terrassements urbains.

6.1.4.1. Terrassement et "carrière urbaine"

On se concentrera sur le cas de terrassements en ville qui peuvent prendre la forme de "carrières urbaines". Le cas de travaux de génie civil en ville nous oblige à considérer les exigences accrues de réduction des nuisances et des émissions. Les fouilles en ville présentent aussi la contrainte de ne pas disposer de grandes surfaces de terrain aux alentours, ce qui détermine des talus presque verticaux qui doivent souvent être stabilisés.

La différence entre une excavation de fouille dans le rocher compact²⁴ et une exploitation en carrière réside plus dans l'objectif que dans les techniques: celui d'une exploitation de pierre naturelle étant d'extraire de la terre un matériau à valoriser. L'excavation d'un terrassement en rocher vise, par contre, à la production de fragments qui puissent être évacués sans difficultés par des engins mécaniques [Bedaux, R. 1973]. Les techniques utilisées dans les terrassements dans le rocher se basent sur les mêmes principes que celles des carrières [Vittone, R. 1996], mais le soin avec lequel les travaux sont exécutés est complètement différent. Il faut seulement réadapter la façon de faire aux nouvelles exigences. Comme démontré par le cas de Genève, les techniques de type "carrière" sont moins nuisibles.

La forme que la carrière peut assumer dépend de la situation du site. En général, une fouille en pleine masse assumera la forme d'une carrière en fosse ou en puits. Dans le cas de versants très escarpés, le type de carrière pourra être celui en flanc de taille. Dans le cas d'excavation de tunnels, la carrière sera souterraine.

Il faut rappeler que la valorisation de la pierre naturelle en tant que produit des travaux de percement de tunnels est la plus complexe. Il est nécessaire de considérer avant tout la grande différence entre les techniques utilisées: machines TBM ("tunnel boring machine") pour l'excavation de tunnels et technique de découpe pour l'exploitation de la pierre naturelle. La première est une machine complexe permettant le percement pratiquement automatique du tunnel, par contre l'exploitation en souterrain demande encore un travail humain conséquent. Dans le cas de percements à l'explosif, une adéquation pour l'exploitation pourrait être plus facile. Il serait probablement plus réaliste de penser à une exploitation ponctuelle de la pierre naturelle couplée à un percement avec des techniques traditionnelles ou d'exploiter la pierre naturelle seulement lors de l'excavation de parties secondaires, tels les arrêts d'une ligne de métro ou des tunnels de secours.

24. On entend par ceci, tout terrassement en rocher qui ne peut pas ou qui est difficilement réalisable à l'aide d'engins pneumatiques standards.

6.1.4.2. Déroulement du chantier

La première phase consiste en des travaux préparatoires qui ont comme objectif de rendre possibles les opérations d'excavation. Ces travaux sont les mêmes que dans le cas d'un terrassement traditionnel. Si des démolitions de constructions existantes sont à réaliser, une valorisation de ces matériaux est impérative [Eco-Bau 2005; SIA 430 1993].

La deuxième phase est celle du terrassement traditionnel qui, dans le cas d'une "carrière urbaine", sert essentiellement à l'excavation de la couche de découverte qui est constituée par le terrain végétal et les dépôts qui recouvrent le gisement de roche. Dans le cas de couches de roches incohérentes, l'excavation peut s'étendre aussi à ces volumes non exploitables en technique "carrière". Il est important de rappeler que la profondeur de cette excavation dans le cas d'une carrière est supérieure à celle normalement considérée pour le décapage des terres.

Selon la composition des couches de terrain et de leur épaisseur, une phase de stabilisation de l'enceinte de fouille selon les indications de l'ingénieur est liée à cette phase d'excavation. On essayera de prévoir des moyens de stabilisation qui produisent le minimum d'encombrement spatial afin de rendre les opérations d'extraction successives les plus aisées possibles, comme la stabilisation des talus et des parois de fouille par le biais de parois moulées, de parois berlinoises ou d'ancrages. Dans le cas d'étais horizontaux de la fouille, le plan des étais devra être étudié selon les contraintes statiques et celles d'exploitation de la carrière.

La troisième phase du chantier est celle de l'exploitation de la carrière. Cette phase est la plus délicate et celle qui nécessite l'intervention d'une équipe de spécialistes dans l'extraction du type de roche rencontrée. La nature de la roche détermine aussi le choix des techniques de découpe et l'organisation générale de la carrière. Il est nécessaire de prévoir l'emplacement pour une grue pour le levage des blocs, selon la dimension et la profondeur d'exploitation dans les cas de carrière en fosse ou en puits, parce que généralement l'aménagement de routes d'accès dans un périmètre restreint semble impossible. Dans le cas d'une carrière en flanc de taille, l'évacuation des blocs extraits peut se faire au pied du front de carrière. Le volume des blocs étant en général assez important, de 1 à 3 m³ au minimum, le type de grue à utiliser devra être approprié. Il serait probablement profitable de trouver un modèle de grue pouvant servir aussi dans les différentes phases successives de construction. Dans le cas d'une exploitation souterraine, les mesures et les techniques à considérer ne diffèrent pas de celles utilisées dans le percement d'un tunnel.

6.1.4.3. Situation géologique

La connaissance des conditions géologiques du sous-sol est une condition indispensable pour planifier tout projet de construction en zone urbaine ou en dehors d'elle. Ces informations sont aussi indispensables lors de la valorisation des géomatériaux extraits. Un cadastre souterrain contenant aussi les informations au sujet des gisements de roche, de leur pétrographie et de leur puissance supposée ou réelle, sera une aide très importante pour pouvoir planifier l'exploitation, et aussi pour en estimer les coûts. Les sondages géotechniques sont indispensables en tout cas pour affiner les estimations quant à la pétrographie et aux dimensions du gisement. L'analyse des sources historiques sur la provenance des matériaux pierreux peut donner des indications sur des potentiels sites

d'exploitation et permettre une appréciation des qualités de la pierre, si elle a déjà été utilisée dans la construction.

Les sondages et les prospections permettent enfin de déterminer les caractéristiques du gisement, surtout au sujet des fissurations et ruptures naturelles. Ceci permettra d'évaluer la pertinence d'une exploitation en vue des exigences dictées par l'utilisation prévue de la pierre naturelle. Une fois déterminé le potentiel du gisement, on pourra choisir quelle forme de valorisation de la roche est la plus souhaitable et rentable.

L'exacte détermination des caractéristiques géologiques du site permettront aussi de concevoir les dispositifs de stabilisation des versants. Dans le cas d'une carrière urbaine, la première partie de découverte sera stabilisée, selon sa nature, par des mesures de renforcement comme dans le cas d'un terrassement traditionnel. Les parois en rocher ne devront être stabilisées que dans des cas particuliers, lors, par exemple, de la présence d'une roche moins compacte à côté du gisement principal ou d'une hauteur de fouille importante. Pour la stabilisation des carrières souterraines, la qualité de la roche excavée est normalement suffisante pour garantir la stabilité des parois et surtout du ciel. Dans des cas particuliers, il faut faire recours à un étayage ou laisser des éléments rocheux faisant office de colonnes de soutènement.

6.1.4.4. Techniques d'exploitation

La carrière de pierre naturelle est désormais confrontée, même en dehors du cas étudié, au problème des nuisances envers l'environnement, de l'ordre de la pollution atmosphérique due aux poussières, ou des émissions sonores. L'amélioration des techniques traditionnelles permet aujourd'hui de limiter les nuisances et parallèlement la production de chutes.

Toute activité d'extraction de pierre naturelle se base essentiellement sur deux principes permettant l'abattage de la roche: le découpe mécanique et celle au moyen d'explosif. L'abattage se fait par découpes sur le plan vertical et horizontal. Les carriers essaient toujours de profiter des faiblesses naturelles de la roche pour réduire la quantité et la difficulté des découpes²⁵.

Dans une carrière urbaine il serait préférable, dans le cas d'une exploitation à ciel ouvert, de ne pas faire recours aux explosifs, à cause des importantes nuisances sonores produites couplées à la production de poussières et de vibrations. Les mortiers expansifs ou les écarteurs, manuels ou hydrauliques, constituent une alternative adéquate.

La dimension des blocs extraits est liée, pour toutes les techniques, à la dimension de l'outil utilisé, même dans le cas de la découpe à l'explosif dont la profondeur est donnée par la longueur du foret utilisé. L'exploitation en souterrain n'est pas pratiquée fréquemment en Suisse, une des seules carrières en activité étant celle de la Krauchtal à Berne, il faut donc faire référence aux techniques utilisées dans des pays avoisinants, comme par exemple l'Italie. L'extraction dans ces types de carrières se fait en général par découpe mécanique, à la haveuse ou au fil diamanté.

Il est difficile d'assigner une seule technique de façon absolue à un certain type de roche. Il faut toujours essayer de trouver la meilleure technique de découpe en fonction de la situation de la carrière

25. Pour des informations plus précises sur les différentes techniques d'exploitation contemporaine voir le sous-chapitre II.2.3 de la présente recherche.

et du type de roche. En général, on peut affirmer que le recours à des moyens de découpe mécaniques permet de réduire les nuisances, surtout sonores, en augmentant la régularité des blocs extraits et en réduisant les chutes. Le recours à l'explosif doit être réduit au minimum et les nuisances produites, surtout sonores et celles liées aux vibrations, bien estimées lors de la planification de l'exploitation. La production de poussières est aussi à considérer lors d'une exploitation en milieu urbain. La meilleure solution est d'utiliser l'eau de refroidissement pour fixer les poussières. Par la suite, le filtrage et la récupération de cette eau sont obligatoires. Les techniques de découpe mécanique sont, aussi dans ce cas, plus performantes que la découpe par explosif ou par perforation; dans ce dernier cas, on peut faire recours à des colonnes avec aspirateur de poussière.

6.1.4.5. Les matériaux extraits. Vers une utilisation totale²⁶

On sera obligé, pour des raisons de rendement économique, mais aussi à cause de la législation croissante en matière de protection de l'environnement et de valorisation du territoire, à passer dans notre mode d'utilisation des ressources d'un système unidirectionnel "produit-déchet" à un système presque cyclique "produit-utilisation-déchet-récupération des matières premières secondaires (MPS) et/ou réutilisation" [Dino, G.A., Fornaro, M. 2005].

Le concassage de la roche et son utilisation sous forme massive sont, dans le cas des "carrières urbaines", les formes les plus plausibles de valorisation. La production de granulats ne comporte pas des technologies particulières et plusieurs entreprises sont actives en Suisse dans ce domaine. Dans le cas de roches particulières, surtout en ce qui concerne les couleurs, les granulats peuvent constituer la base pour la production de bétons spéciaux ou de pierres artificielles. La valorisation des blocs informes ou taillés pour des ouvrages de génie civil ou dans la construction de bâtiments ne comporte pas, elle aussi, d'importants investissements dans la transformation.

6.1.4.6. Le bilan économique

Il est difficile d'établir un bilan économique qui puisse démontrer la faisabilité ou pas d'une opération d'exploitation par rapport à un terrassement traditionnel. Surtout que les cas d'étude sont très limités et ne permettent pas de généraliser les résultats. On essaie au moins de mettre en évidence les différents coûts et bénéfices qui rentrent dans le bilan final d'une telle opération.

Avant d'entrer dans les détails, il est nécessaire de souligner qu'il n'est pas possible de se limiter, dans l'évaluation des coûts, aux contraintes économiques actuelles qui sont probablement contraires à ce type de valorisation, mais qu'il faudrait aussi tenir compte des modifications, même économiques, qui se produiront à moyen terme. Cela s'explique par une sensibilité nouvelle et de contraintes accrues envers la "durabilité" environnementale.

On ne considérera pas les coûts liés aux renforcements de l'enceinte de fouille parce qu'ils sont les mêmes dans le cas d'un terrassement traditionnel ou d'une exploitation type "carrière".

Les dépenses économiques liées à un terrassement traditionnel sont l'excavation de la fouille, les transports des matériaux excavés et les coûts de la mise à la décharge de ces derniers. Dans une

26. Voir à ce propos le sous-chapitre II.5.8 de la présente recherche.

démarche durable, il faut ajouter aussi les coûts et les bénéfices liés à la valorisation des matériaux extraits.

À l'opposé du terrassement traditionnel, se trouve le cas théorique où la totalité du volume excavé est exploité dans la carrière urbaine. Les dépenses se calculent alors comme la somme des coûts d'extraction, de transport et de décharge pour la partie non-utilisable de la roche, de stockage pour la pierre naturelle qui n'est pas immédiatement utilisée, de bénéfice lié à la vente de la pierre naturelle et des bénéfices des co-produits. Il faut noter que les coûts de transport et stockage de la pierre naturelle utilisable sont souvent ajoutés à son prix. Les bénéfices provenant des co-produits sont pluriels à cause des différentes valorisations que ces derniers peuvent admettre.

Si on compare les deux calculs économiques, on peut tout de suite faire ressortir que les coûts de terrassement seront sûrement inférieurs à ceux d'une exploitation type "carrière". Les coûts de mise à la décharge augmenteront sûrement dans les prochaines années, ce qui obligera dans tous les cas à prendre en compte une valorisation des produits d'excavation. Le prix de la pierre naturelle est largement supérieur à celui de tous les co-produits, sauf exceptions particulières, ce qui peut rendre cette valorisation économiquement intéressante dans le cadre des produits d'excavation.

6.1.4.7. Problèmes de droit

En Suisse, aucune loi propre aux ressources souterraines n'existe, et il en est de même pour une base constitutionnelle [Maire, P. 2008]. Il est donc nécessaire d'analyser chaque situation particulière et de rechercher les principes juridiques autant dans la législation fédérale que dans celles cantonales. Dans le cas de l'exploitation d'une fouille urbaine comme carrière, on est confronté à deux questions fondamentales. La première consiste dans le fait de comprendre si l'exploitation d'une fouille urbaine est légalement comparable à un travail de construction ou à une activité de carrière. La deuxième, consiste de savoir à qui revient la propriété des matériaux extraits et, en conséquence, les revenus de leur valorisation.

La réponse à la première question peut être traitée selon deux points de vue différents, à cause de l'absence d'une définition univoque du terme "carrière" et des produits de l'exploitation du sous-sol. Le premier point de vue est celui qui considère l'excavation de fouilles et la nature de ses produits. Selon la *Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et de déblai* ("Directive sur les matériaux d'excavation" du juin 1999), les roches du sous-sol sont des matériaux excavés lors de travaux de génie civil ou de construction tels que fouilles, tunnels, cavernes et galeries. Ils doivent donc être éliminés ou valorisés selon l' *Ordonnance sur le traitement des déchets* (OTD), du 10 décembre 1990. Selon le droit fédéral, on peut donc considérer que l'exploitation de la pierre naturelle lors de travaux d'excavation est une forme de valorisation des "déchets".

Il faut aussi considérer les différents droits cantonaux. En effet, la législation en matière de droit minier revient aux Cantons, sous forme de régale des mines et des lois sur les carrières. Malheureusement, un nombre limité de cantons dispose de lois sur les carrières²⁷. On peut prendre, à titre d'exemple, la *Loi sur les carrières* (Lcar), du 24 mai 1988, du Canton de Vaud. Selon l'Art. 1 de cette loi, tous les gisements de pierre, exondés ou immergés, sont réputés des "carrières" et, selon l'Art. 2, ils appartiennent au

27. Voir à ce propos le sous-chapitre II.4.2 de la présente recherche.

propriétaire du bien-fonds. Pour la définition précise de la nature de cette activité d'exploitation, l'Art. 3 de la loi a un rôle central: les exploitations de très faibles quantités de matériaux sont régies par les dispositions relatives aux constructions (*Loi sur l'aménagement du territoire et les constructions*, LATC, du 4 décembre 1985), par contre la loi sur les carrières est applicable aux carrières exploitées à des fins commerciales ou industrielles. L'Art. 1 du *Règlement d'application de la loi du 24 mai 1988 sur les carrières* (RLCar), fixe à 500 m³ la production maximale d'une exploitation n'étant pas assujettie à la loi sur les carrières et donc à l'obtention d'un permis d'exploiter. Il en est de même pour la réutilisation sur place des matériaux extraits, mais si le volume ne dépasse pas les 5'000 m³ et si ces travaux ont été soumis à une enquête publique.

On peut conclure, en faisant référence au cas du Canton de Vaud, que la différence entre une exploitation type carrière et la valorisation d'un matériau d'excavation comme la pierre naturelle réside dans la finalité de l'extraction. Dans le cas de la carrière cette extraction a comme but d'exploiter une ressource naturelle à des fins commerciales; une excavation urbaine sert premièrement à la réalisation d'un ouvrage. Les matériaux produits sont donc des "déchets" dont la valorisation est recommandée. Par conséquent, ces travaux d'excavation nécessitent seulement l'obtention d'un permis de construire. Un permis d'exploitation serait nécessaire, selon les prescriptions du RLCar, si l'on décidait d'augmenter les volumes exploités lors des excavations liées à la construction afin de pouvoir profiter d'une roche particulière. Cela reviendrait au cas d'une exploitation à des fins commerciales et serait donc soumise à la Loi sur les carrières²⁸.

Nous pouvons affirmer que, dans le cas de Cantons qui ne possèdent pas de loi sur les carrières, est applicable le principe selon lequel la valorisation des matériaux d'excavation est lié à la construction et donc soumise aux mêmes permis et règlement. Cela est en accord avec les règlements fédéraux.

On se référera, pour répondre à la question de la propriété des matériaux extraits, à l'analyse du cadre juridique faite par Pierrick Maire "Propriété et usage des ressources du sous-sol" [Maire, P. 2008], dans le cadre du projet "Deep-City". Au chiffre 5, qui traite des géomatériaux, on peut lire que ces derniers n'entrent pas sous l'influence de la régle des mines et leur propriété revient au propriétaire du bien-fonds intéressé par les excavations, conformément à l'Art. 667 du *Code Civil Suisse*. Les bénéfices et les coûts liés à la valorisation de ces géomatériaux, y compris l'éventuelle pierre naturelle, sont donc à la charge du propriétaire.

6.1.5. Conclusions

La valorisation du géomatériau "pierre naturelle" lors de travaux d'excavation constitue un changement du point de vue de la démarche plus que des techniques. Comme dans le cas d'autres géomatériaux, il est nécessaire de concevoir leur exploitation depuis le début du projet des travaux de terrassement ou d'excavation.

La valorisation des matériaux extraits est plus simple lors d'un terrassement que d'une excavation de tunnels, soit pour les techniques d'exploitation soit pour la planification.

Il faudrait concevoir, selon les cas, la possibilité d'allier des travaux d'excavation traditionnels avec ceux d'exploitation, comme montré par les cas étudiés. Ceci est rendu encore plus nécessaire dans

28. Ces précisions ont été aimablement fournies par M. Jean-Daniel Dubois, géologue, SESA DSE, Lausanne.

le cas d'excavations de tunnels: chantiers dans lesquels on pourrait envisager d'exploiter la pierre naturelle seulement dans l'excavation des parties annexes.

Une utilisation totale des matériaux d'excavation est l'objectif de toute démarche "durable" dans le cadre des travaux de terrassement ou d'excavation de tunnel. L'exploitation de la pierre naturelle est une des différentes formes que cette valorisation des co-produits peut assumer.

Pour l'estimation des coûts et des bénéfices liés à une action de valorisation, il est nécessaire de considérer, d'un côté, une valorisation totale des matériaux excavés et, de l'autre, que l'objectif à poursuivre est non seulement celui de la rentabilité économique, mais aussi celui de la "durabilité". La situation actuelle commence à démontrer que la valorisation des géomatériaux constitue aussi une chance économique.

La propriété des géomatériaux revient, selon le droit suisse, au propriétaire du bien-fonds sur lequel s'exécutent les travaux. Ceci ne signifie pas seulement que les éventuels bénéfices d'une valorisation reviennent au propriétaire, mais que cette même démarche dépend aussi de sa volonté. Il est donc nécessaire de mieux informer les maîtres d'ouvrages, publics et privés, et les spécialistes de la construction, sur les différentes possibilités de réutiliser les produits excavés.

Dans le cas de l'exploitation de la pierre naturelle, la dispense de l'obtention d'un permis d'exploitation est une preuve supplémentaire de la possibilité de mise en oeuvre de cette démarche de valorisation.

6.1.5.1. Nouveaux scénarios

Si la pratique de l'exploitation de la pierre naturelle devait se généraliser dans le cas de travaux d'excavation sur le territoire suisse, elle pourrait dépasser les besoins liés à la restauration des monuments historiques. De nouveaux scénarios pourraient voir le jour. Il serait possible de concevoir des bâtiments avec des structures porteuses en pierre massive avec des coûts réduits du point de vue économique et de l'énergie investie, grâce à la parfaite correspondance entre lieu d'extraction et de mise en oeuvre.

Ce mode de construction, oublié depuis près d'un siècle, devrait retrouver sa place dans le marché de la construction dans des pays qui, comme la Suisse, possèdent des gisements de roche de qualité et facilement accessibles.

6.2. Nouvelle ouverture et réouverture

Comme déjà noté par Hanspeter Schwarz dans les années 1980 [Schwarz, H. 1983], à la suite des difficultés administratives et économiques pour l'ouverture d'une nouvelle carrière, la réouverture de sites déjà exploités peut, à nos jours encore, constituer une bonne alternative. Ceci permet, d'une part, de pouvoir continuer l'exploitation de gisements dont la qualité est, en partie, connue, et, de l'autre, de pouvoir mettre en place des projets d'exploitation comportant aussi la définition de l'état final des zones, qui dans le passé étaient souvent simplement délaissées.

C'est pour cela que la Confédération Suisse, par le biais de l'*Office fédéral du développement territorial*, a promu en 2006 une réflexion générale sur la planification des sites d'exploitation des gisements de roches dures [ARE 2006]. En effet, le soucis du législateur fédéral était celui de garantir l'autonomie du

pays dans l'approvisionnement en roches dures, utilisées surtout pour la production de revêtements routiers et de ballast ferroviaire, dans le respect des lois de protection de l'environnement, de la nature et du paysage et des objectifs fixés par la *Loi sur l'aménagement du territoire* (LAT). Le guide qui a été publié contient un catalogue de critères pour la planification que nous allons reprendre et adapter au cas des carrières de pierre naturelle. Comme spécifié dans l'introduction à ce catalogue [ARE 2006:10], les critères servent à évaluer, en phase de planification des futurs projets de carrière, ou d'agrandissement de sites déjà exploités, les points les plus sensibles afin de pouvoir élaborer au plus tôt des variantes et des solutions. Ces critères ne substituent pas l'Etude d'Impact sur l'Environnement, qui est réalisée dans une phase plus avancé du projet, et qui ne concerne pas, en principe, toutes les carrières de pierre naturelle (voir le sous-chapitre II.4.4). Ces critères sont utiles autant aux autorités concernées par l'approbation des projets d'exploitation (en général, les Cantons et les Communes) qu'aux entreprises privées auxquelles revient la planification concrète des projets. Des critères concernant la remise en état ont été ajoutés afin de pouvoir les confronter directement avec ceux concernant l'exploitation.

6.2.1. Liste des critères

Domaine	Critères importants pour la phase d'exploitation	Critères importants pour la remise en état	Exigences à remplir
Réserves exploitables	Quantité exploitable	Quantité du gisement encore exploitable	Les réserves exploitables sont connues et doivent assurer une production rentable.
Risques naturels	Conditions d'exploitation Connaissances des sites géologiques instables et des intercalations peu favorables Impact de l'exploitation sur les cours d'eau et les forêts protectrices	Stabilité géologique du site après exploitation sans interventions Nouvelles trajectoires des cours d'eau Possibilités de reboisement	Le projet d'exploitation ne doit pas être situé dans une zone comportant des vastes couches géologiquement instables. Après exploitation, la forme produite devrait garantir par elle-même la stabilité des versants. Les impacts sur les forêts protectrices, les cours d'eau et les réservoirs d'eau potable ne doivent pas provoquer une augmentation du risque. Un reboisement progressif doit être possible ainsi qu'un déplacement temporaire des cours d'eau sans atteintes considérables. Dans le cas de carrières en fosse, puits ou souterraines, il faut veiller à la protection des nappes phréatiques et des aquifères contre les risques de pollution et de déviation.
Desserte	Surface requise et longueur de la desserte Moyens de transport, quantités transportées et destinations (abattage, traitement, débouchés) Incidences sur les espaces concernés (en particulier zones à bâtir, milieux naturels, voies de communication historiques, itinéraires pédestres ou de randonnée)	Réutilisation des dessertes selon la forme de remise en état	Le site est problématique si les accès traversent des zones d'habitat ou s'ils provoquent une fragmentation nouvelle ou supplémentaire des paysages ou des milieux naturels.
Nuisances	Nuisances dans les domaines de l'air, des particules fines, du bruit, des vibrations, des déchets et des eaux usées Effets sur les espaces concernés (en particulier sur les zones à bâtir)	Nuisances des nouvelles affectations des terrains dans les domaines de l'air, des particules fines, du bruit, des vibrations, des déchets et des eaux usées Effets sur les espaces concernés (zones à bâtir)	Les dispositions de la législation sur la protection de l'environnement doivent être respectées. Il faut s'attendre à des conflits particulièrement importants si des activités sensibles (quartiers d'habitations, installations touristiques) se trouvent à proximité (rayon d'environ 200 m) et si des mesures de construction n'arrivent pas à réduire les nuisances. Les spécificités locales (exposition, altitude, climat) ont un effet déterminant sur la propagation des nuisances.

Domaine	Critères importants pour la phase d'exploitation	Critères important pour la remise en état	Exigences à remplir
Objets protégés d'importance nationale	Impacts sur les objets figurant aux inventaires fédéraux: perte de valeur, morcellement, aspect du paysage	<p>Eventuelle inscription des anciennes zones d'exploitation dans les inventaires fédéraux</p> <p>Impacts sur les objets figurant aux inventaires fédéraux: perte de valeur, morcellement, aspect du paysage</p>	<p>Sites marécageux: les objectifs de protection sont incompatibles avec un projet d'exploitation (critère d'exclusion définitif).</p> <p>Objets de l'Inventaire fédéral des paysages, sites et monuments naturels d'importance nationale (IFP): la compatibilité d'un projet d'exploitation avec la protection des objets IFP (respectivement une partie de ces derniers) a une force obligatoire pour la Confédération, respectivement de l'expertise de la Commission fédérale pour la protection de la nature et du paysage (consultation avant le choix du site). En principe les nouveaux sites d'exploitation ne devraient pas être planifiés à l'intérieur des objets IFP. L'extraction à l'intérieur d'un objet IFP n'est envisageable que lorsqu'elle ne porte pas préjudice de manière importante aux objectifs de protection de l'objet (ou d'une partie de celui-ci).</p> <p>Inventaire des milieux naturels (art. 18 LPN): un projet d'exploitation est incompatible avec les objectifs de protection. Compte tenu de la taille restreinte de ces objets, les conflits peuvent en général être résolus par une optimisation du projet, des mesures de compensation écologique et des mesures appropriées lors de la remise en culture.</p> <p>Inventaire des sites construits à protéger en Suisse (ISOS): un projet d'exploitation provoque des conflits si l'aspect d'un site ISOS n'est pas préservé (protection des espaces environnants); pour la procédure voir celle des sites IFP.</p>

Domaine	Critères importants pour la phase d'exploitation	Critères important pour la remise en état	Exigences à remplir
Objets protégés d'importance cantonale	Impact sur les objets figurants aux inventaires cantonaux: perte de valeur, morcellement, aspect du paysage	Eventuelle inscription des anciennes zones d'exploitation dans les inventaires cantonaux Impacts sur les objets figurant aux inventaires cantonaux: perte de valeur, morcellement, aspect du paysage	Bien que les objets protégés varient d'un canton à l'autre, on peut définir quatre catégories d'objets à protéger: la protection du paysage; la valorisation paysagère; la protection des milieux naturels /biotopes et celle d'objets isolés (arbres, haies, cours d'eau, étangs, sources, géotopes, espèces protégées). L'analyse du site se base sur les dispositions cantonales, les plans directeurs et les plans d'affectation, ainsi que sur des ordonnances de protection. Les conflits peuvent souvent être résolus par une optimisation du projet. Dans le cas d'une diminution de la valeur des milieux naturels particulièrement dignes de protection selon l'art. 18 al. 1bis LPN, des mesures de remise en état ou de compensation sont obligatoires. Dans le cas d'objets protégés de taille importante, il s'agit de tenir compte des impacts sur les objectifs de protection et de définir les mesures avant le choix d'un site.
Forêts	Défrichement	Reboisement (attention à l'entretien nécessaire: coûts, travail, etc.)	L'implantation imposée par la destination doit être démontrée. Si elle l'est, les conflits peuvent être résolus par une optimisation du projet: reboisement compensatoire selon la Loi sur les forêts ou mesures de compensation écologique.
Corridors pour la grande faune et espèces qui figurent sur la liste rouge	Morcellement des corridors pour la grande faune Espèces concernées de la liste rouge	Remise en état ou construction de corridors pour la grande faune Nouveaux habitats ou lieux de reproduction pour les espèces (aussi celles de la liste rouge)	Les mesures pour la protection des espèces menacées doivent être clarifiées à un stade précoce avec les services cantonaux de la protection de la nature et de la faune. En règle générale, les conflits peuvent être résolus par une optimisation du projet (avant le choix du site) et des mesures d'accompagnement écologiques (planification de détail et remise en culture).

Les procédures de planification des projets d'exploitation peuvent aujourd'hui être aidée par le recours aux cartes GIS qui intègrent désormais les données principales de différents inventaires fédéraux (par exemple, le service ecoGIS²⁹ de l'*Office fédéral de l'environnement*).

29. Ce système GIS est disponible en-ligne à l'adresse: <http://www.ecogis.ch/>, consulté le 05.01.2010.

6.3. Marché économique

La Suisse reste un pays dans lequel la pierre naturelle est demandée comme matériau de construction sous différentes formes. Comme démontré par nos analyses (voir le sous-chapitre II.2.8.6) et par d'autres études plus anciennes [Kündig, R., éd. 1997; Schwarz, H. 1983], ce marché économique tend vers une augmentation des importations, une certaine stabilité des exportations et une diminution du nombre de carrières en activité, ce qui ne correspond pas à une diminution de la production. Dans le domaine des importations, le cas des roches cristallines et des produits dérivés est représentatif de la situation actuelle: des matériaux étrangers sont préférés à ceux indigènes grâce à leur prix de vente inférieur. Ce mécanisme est aujourd'hui favorisé par des prix de l'énergie nettement inférieurs à ceux de la main d'oeuvre, ce qui se traduit par un avantage économique dans le transport plutôt que dans l'exploitation en Suisse. Une plus grande sensibilité envers la provenance des produits que nous achetons, en partie aussi pour ce de la construction, s'est développée ces dernières années, mais elle concerne plutôt les particuliers que les grands investisseurs privés ou les autorités publiques. Pour ces dernières, des arguments comme celui du cercle vertueux engendré par la survivance des entreprises locales³⁰ peuvent permettre d'inverser, en partie, les tendances actuelles qui sont celles de l'adjudication à l'offre la moins élevée. La mise en oeuvre d'une politique plus sévère d'impositions sur les énergies non renouvelables constituerait sûrement un facteur de changement dans les prix de vente des pierres naturelles. En effet, par ce biais, le transport sur des longues distances de marchandises lourdes, comme dans le cas de la pierre naturelle, deviendrait très onéreux et les produits locaux pourraient ensuite retrouver leur place dans le marché. Vu la demande de matière première, la production interne devrait augmenter, ce qui nécessite une évolution de la politique de gestion des gisements et de leur exploitation.

Il est difficile de s'exprimer au sujet de l'avenir de l'exploitation de la pierre naturelle de taille en Suisse, mais, il est possible d'affirmer que des potentiels réels de développement existent et sont praticables, comme dans le cas de la "carrière urbaine" ou de la réouverture d'anciens sites d'exploitation. À la lumière d'une demande de la part des maîtres d'ouvrages pour ce matériau qui subsiste dans notre pays, il est nécessaire avant tout de mieux informer les acheteurs, d'une part, et les architectes et ingénieurs, de l'autre, qui conseillent souvent les premiers. Le fait d'utiliser un produit naturel local devrait devenir de plus en plus la norme et cette plus grande conscience vis-à-vis de la provenance du matériau et de son cycle de production permettra aussi de changer l'attitude générale envers la carrière de pierre naturelle. Elle pourra ainsi être à nouveau considérée une ressource, exploitée selon des règles précises, et non pas comme une atteinte au paysage. Pour atteindre ce résultat, il est nécessaire que toutes les personnes concernées soient impliquées: autorités publiques et privés. En Suisse, un plus grand intérêt pour cette branche économique et industrielle de la part des institutions chargées de la formation des architectes et ingénieurs est nécessaire parce que la perte des connaissances de ces spécialistes de la construction au sujet de ce matériau est réelle, surtout en dehors du cercle de ceux qui se consacrent à la restauration et à l'entretien du patrimoine bâti.

30. Voir à ce sujet, par exemple, l'étude réalisée à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich concernant l'économie régionale de la Valle Maggia dans lequel a été considérée aussi l'industrie de l'exploitation des carrières de pierre naturelle [Buser, B., Giuliani, G., Rieder, P. 2004].

7. BIBLIOGRAPHIE

- Adam, J.-P. 2005: *La construction romaine. Matériaux et techniques. Quatrième édition*, ("Grands manuels Picard"), Paris, Editions A. et J. Picard, 368 p.
- AIN 2004: *Schéma départemental des carrières de l'Ain*, Tome II, chiffre G, pp. 89-97 (document électronique téléchargeable à l'adresse: http://www.ain.pref.gouv.fr/sections/actions_de_letat/environnement_deve/plans_et_schemas/schema_departemental2804/, consulté le 23.08.2010).
- Amsler, C. 1996: "Une cathédrale de molasse. Lausanne, expériences et perspectives", in: Pancella, R., éd.: *Conservation et restauration des biens culturels. Actes du Congrès LCP 1995, Montreux 24-29 septembre 1995*, Lausanne, Laboratoire de Conservation de la Pierre-Epfl, pp. 29-44.
- Anderegg, J.-P. 2002: *Une histoire du paysage fribourgeois. Espace, territoire et habitat*, Fribourg, Services des Biens Culturels, 364 p.
- Andenmatten, B., De Ramey, D., éd. 1990: *La maison de Savoie en pays de Vaud*, Lausanne, Éditions Payot, 284 p.
- Architecture & Urbanism 2008: "Antón García Abril: SGAE Central Office, Santiago de Compostela, Galicia, Spain 2008", *Architecture & Urbanism*, n. 9, 456, september 2008, pp. 116-125.
- ARMP, éd. 2000: *Charte d'éthique et de bienfaisance pour la réfection de monuments et de bâtiments*, (3ème édition), Lausanne, Association Romande des Métiers de la Pierre.
- Badoux, H., Onde, H., éd. 1996: *Pays de Vaud. Une Terre, une Histoire*, ("Encyclopédie illustrée du Pays de Vaud. 2"), Yens, Cabédita, 235 p.
- Bedaux, R. 1973: *Terrassement dans le rocher et travaux connexes*, Paris, Technique et documentation, 215 p.
- Bianchi, R. 1997: *Il settore delle pietre naturali in Ticino. Analisi, prospettive, proposte*, ("Saggi. Tesi. Documenti. 9"), Bellinzona, Istituto Editoriale Ticinese, 115 p.
- Bissegger, P. 1980: "Noir, brun, rouge, violet et jaspé: les marbres du Chablais vaudois", in: AA.VV., *Von Farbe und Farben. Albert Knoepfli zum 70. Geburtstag*, Zürich, Manesse Verlag, pp. 79-84.
- Bradley, F. 2002: *Marble-Stat 2002. Situazione e Tendenze nell'Industria Lapidaria Mondiale*, ("Libri per il marmo"), s.l., Promorama, 143 p.
- Broggini, O. 2007: "2007, ritorno alla cava. Ripresa in Valle di Peccia l'estrazione del marmo", *Corriere del Ticino*, lunedì 30 luglio 2007.
- Bruni, C., éd. 2008: *Il marmo ieri e oggi. Storia illustrata dell'industria più antica del mondo*, Carrara, Società Editrice Apuana, 212 p.
- Buser, B., Giuliani, G., Rieder, P. 2004: *L'economia regionale della Valle Maggia. Un'analisi input-output (Riassunto in italiano dalla versione originale tedesca)*, Zurigo, ETHZ-Istituto di economia agraria, 2004, 33 p.
- Cardu, M. et al. 2004: "The exploitation of syenite in the Piedmond Alps (Italy): present relevance of the stone and future technological prospects for its sustainable exploitation", in: Prikryl, R, éd., *Dimension Stone 2004. New perspectives for a traditional building material*, London, Taylor and Francis, pp. 289-295.

- Commission Européenne 2006: *La nouvelle définition des PME. Guide de l'utilisateur et modèle de déclaration*, s.l., Communautés Européennes-Office des publications, 50 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://ec.europa.eu/enterprise/enterprise_policy/sme_definition/sme_user_guide_fr.pdf, consulté le 01.09.2009).
- D'Amato Guerrieri, C., éd. 2006: *Città di pietra. 10a mostra Internazionale di Architettura*, Venezia, Fondazione la Biennale-Marsilio editori, 2 Vol.
- de Quervain, F. 1969: *Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage*, Bern, Kümmerly und Frey Geographischer Verlag, 312 p.
- Department of economic and social affairs, éd. 1976: *The development potential of dimension stone*, New York, United Nations, 95 p.
- Dino, G. A., Fornaro, M. 2005: *L'utilizzo integrale di risorse lapidee negli aspetti estrattivi, di lavorazione e di recupero ambientale dei siti*, "Giornale di Geologia Applicata", n. 2, 2005, pp. 320-327.
- DRIRE du centre, éd. 2005: *La remise en état des carrières après exploitation*, Orléans, DRIRE du Centre, 6 p. (document électronique téléchargeable à l'adresse: <http://www.centre.drire.gouv.fr>, consulté le 23.08.2010).
- Eco-bau 2005: *Construction écologique. Fiches selon le code des frais de construction (CFC). Edition janvier 2005*, Bern, Association eco-bau.
- Feldhaus, M. 1986: "Umweltverträglichkeit von Steinen", *Arch+*, 84, märz 1986, pp. 64-65.
- Félix, C. 1996: "Choix de grès tendres du Plateau suisse pour les travaux de conservation", in: Pancella, R., éd.: *Conservation et restauration des biens culturels. Actes du Congrès LCP 1995, Montreux 24-29 septembre 1995*, Lausanne, Laboratoire de Conservation de la Pierre-Epfl, pp. 45-71.
- Ferraresi, A. 2007: "Il parco dei suoni a Riola Sardo, Oristano. Pierpaolo Perra e Alberto Antioco Loche", *architetturadipietra.it*, 5 décembre 2007 (<http://www.architetturadipietra.it/wp/?p=1200>, consulté le 08.07.2009).
- Galin, R. 1984: "La réhabilitation des carrières après exploitation en France", *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, n. 29, 1984, pp. 261-263.
- Giani, G. P. 1992: *Rock slope stability analysis*, Rotterdam, Balkema, 361 p.
- Grandjean, M. 1965: *La ville de Lausanne*, ("Les monuments d'art et d'histoire de la Suisse. Tome 51.", "Les monuments d'art et d'histoire du Canton de Vaud. Tome I"), Bâle, Éditions Birkhäuser, 452 p.
- Greco, V. et al. 2006: "Principi metodologici per azioni di recupero delle cave abbandonate", *Giornale di Geologia Applicata*, n. 4, 2006, pp. 246-252.
- Haller, P. 1943: *Natursteine, künstliche Steine, Leichtbaustoffe*, ("Bautechnische Reihe. Nr. 6. Bauen in Kriegezeiten"), Zürich, Polygraphischer Verlag A.G., 48 p.
- Hintermann & Weber 2001: *La nature demain. Rapport de l'étude pour un projet d'inventaire et de protection des géotopes vaudois*, Montreux, imprimé chez l'auteur, 2001, 50 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/dse/sffn/fichiers_pdf/LaNaturedemain_geotopes.pdf, consulté le 21.10.2009).
- Immcarrara 2008: *Stone Sector 2007. Industria Italiana e Congiuntura Internazionale*, Carrara, Internazionale Marmi e Macchine Carrara Spa, 151 p. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.stat.immcarrara.com/download/download.asp>, consulté le 01.09.2009).

- Immcarrara 2009: *Stone Sector 2008. Industria Italiana e Congiuntura Internazionale*, Carrara, Internazionale Marmi e Macchine Carrara Spa, 151 p. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.stat.immcarrara.com/stone/stone-sector.asp>, consulté le 01.09.2009).
- Julien, P. 2006: *Marbres. De carrières en palais. Du Midi à Versailles, du sang des dieux à la gloire des rois. XVIe-XVIIIe siècle*, Manosque, Le bec en l'air Editions, 270 p.
- Kostantopoulou, P. et al. 2004: "Assessment for energy saving potentials in marble quarries", in: Prikryl, R., éd., *Dimension Stone 2004. New perspectives for a traditional building material*, London, Taylor and Francis, pp. 309-314.
- Kündig, R., éd. 1997: *Die mineralischen Rohstoffe der Schweiz*, Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 522 p.
- Labhart, T. P., Thierstein, F. 1987: *Die Gesteine des Parlamentsgebäudes*, ("Matériaux pour la géologie de la Suisse. Bulletin. n.79"), Bern, Kümmerly und Frey, 32 p.
- Langé, S. 1988: *L'eredità romanica. L'edilizia domestica in pietra dell'Europa occidentale*, Milano, Editoriale Jaca Book, 286 p.
- Maire, P. 2008: *Propriété et usage des ressources souterraines*, Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (mis à disposition par l'auteur).
- Majot, J.-P. 1986: "La ville de pierre. Stratégie pour un matériau naturel", *Archives d'architecture moderne*, n. 31, 1986, pp. 11-44.
- Marino, L., éd. 2007: *Cave storiche e risorse lapidee. Documentazione e restauro*, ("restauro archeologico 13"), Firenze, Alinea editrice, 128 p.
- Mulazzani, M. 2009: "Perra & Loche. Parco dei suoni nelle cave del Sinis di Oristano", *Casabella*, n.774, février 2009, pp. 68-73.
- Niggli, P. 1915: *Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz*, ("Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie V"), Bern, Francke, 423 p.
- Parriaux, A. 1991: "Problème de l'intégration des carrières dans une protection globale de l'environnement avec des exemples de la Suisse", *Bollettino della Associazione Mineraria Subalpina*, Anno XXVIII, n.4, décembre 1991, pp. 731-743.
- Piffaretti, G., éd. 2003: *Le cave di marmo di Arzo*, Arzo, Comune di Arzo, 71 p.
- Pouillon, F. 1973: *Les Baux de Provence*, Paris, F. de Nobele, 55 feuilles et 37 planches.
- Primavori, P. 1997: *I materiali lapidei ornamentali: marmi, graniti e pietre*, Pisa, Edizioni ETS, 224 p.
- Reinhard, E., éd. 1945: *Stein und Steinwerk*, ("Landschaften und Bauten. Band 3"), Bern, Ilionverlag, 384 p.
- Rudhardt, P. 1914: *Mines et Carrières. Les Industries de l'Extraction en Suisse*, Genève, Editions Atar, 182 p.
- Schmid, E. 1970: *Natursteine in Bern. Zusammenstellung und Beschreibung der Bausteine der Stadt*, ("Schweizer Realbogen 127"), Bern, Paul Haupt, 63 p.
- Schneiderfranken, I. 1943: *Ricchezze del suolo ticinese. Studio economico sullo sfruttamento delle pietre da costruzione e delle materie prime minerali*, Bellinzona, Istituto Editoriale Ticinese, 217 p.
- Schwarz, H. 1983: *Die Steinbrüche in der Schweiz*, Zürich, Druckerei Wetzikon AG, 183 p.
- Septfontaine, M. 1999: *Belles et utiles pierres de chez nous*, Lausanne, Musée géologique cantonal, 48 p.

- Service des bâtiments, éd. 1990: *Gymnase de la Cité-Mercerie*, ("Publication du Service des Bâtiments 32"), Lausanne, Etat de Vaud-Services des Bâtiments, 2 dépliants.
- Service des bâtiments, éd. 1994: *Gymnase de la Cité-Mercerie. Nouvelle salle de gymnastique*, ("Publication du Service des bâtiments 46"), Lausanne, Etat de Vaud-Services des Bâtiments, 16 p.
- Shadmon, A. 1996: *Stone. An introduction. Second Edition*, London, Intermediate Technology Publications, 172 p.
- SIA 430 1993: *Recommandation SIA 430 Gestion des déchets de chantier lors de travaux de construction, de transformation et de démolition*, Zürich, Société Suisse des Ingénieurs et Architectes.
- Singewald, C. 1992: *Naturwerkstein. Exploration und Gewinnung. Untersuchung, Bewertung, Verfahren, Kosten*, Köln, Rudolf Müller, 260 p.
- Smith, M. R., éd. 1999: *Stone: building stone, rock fill and armourstone in construction*, ("Engineering Geology Special Publication 16"), London, Geological Society, 478 p.
- Solange, G. 1991: "Une carrière à la cité", *Journal de la construction de la Suisse romande*, n. 9, pp. 7-13.
- St-Triphon 2009: *Musée Cantonal des Beaux-Arts, commune d'Ollon, site «les Andonces» à Saint-Triphon*, dossier établi par Plarel, Lausanne, 10 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://st-triphon.ch/Beaux_Arts/resume.html, consulté le 28.01.2010).
- Stadler, R. 2001: "Steinabbau als kalkulierbares Risiko", *Stein*, n. 10, 2001, pp. 22-23.
- Stein 1996: "Lohnt Lohnabbau? Das Einrichten eines Steinbruchs nach dem Stand der Technik", *Stein*, n. 04, 1996, pp. 21-23.
- Trachsel, H. 2007: *Sandstein. Eine überraschende Vielfalt*, Bern, Stämpfli Verlag AG, 119 p.
- Verband Schweizerischer Steinbruchbetriebe, éd. 1937(?): *Die schweizerischen Natursteine und ihre Verwendungsarten*, Zürich, Verband Schweizerischer Steinbruchbetriebe, 60 p.
- Vittone, R. 1996: *Bâtir. Manuel de la construction*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 950 p.
- ARE 2006: *Carrières de roches dures. Guide pour la planification des sites d'exploitation*, Berne, Office fédéral du développement territorial (ARE), 20 p.
- CC: *Code Civil suisse du 10 décembre 1907*, état au 5 décembre 2008, Confédération Suisse.
- Cst: *Constitution fédérale de la Confédération suisse du 18 avril 1999*, état au 17 mai 2009, Confédération Suisse.
- LAT: *Loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'aménagement du territoire*, état au 1er août 2008, Confédération Suisse.
- LEaux: *Loi fédérale sur la protection des eaux du 24 janvier 1991*, état au 1er août 2008, Confédération Suisse.
- LEM: *Loi sur l'extraction de matériaux du 10 décembre 1990*, état en janvier 1997, Canton de Neuchâtel.
- LFo: *Loi fédérale sur les forêts du 4 octobre 1991*, état au 1er janvier 2008, Confédération Suisse.
- LPE: *Loi fédérale sur la protection de l'environnement du 7 octobre 1983*, état au 1er août 2008, Confédération Suisse.
- LPN: *Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage du 1er juillet 1966*, état au 1er janvier 2008, Confédération Suisse.

- OAT: *Ordonnance du 28 juin 2000 sur l'aménagement du territoire, état au 1er septembre 2009, Confédération Suisse.*
- OBat: *Ordonnance sur la protection des sites de reproduction de batraciens d'importance nationale du 15 juin 2001, état au 1er janvier 2008, Confédération Suisse.*
- OEIE: *Ordonnance relative à l'étude de l'impact sur l'environnement du 19 octobre 1988, état au 1er juillet 2009, Confédération Suisse.*
- OTerm: *Ordonnance sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation du 7 décembre 1998, état au 1er janvier 2009, Confédération Suisse.*
- RELEM: *Règlement d'exécution de la loi sur l'extraction de matériaux du 21 août 1991, état au 12 novembre 2008, Canton de Neuchâtel.*
- RLCar: *Règlement d'application de la loi du 24 mai 1988 sur les carrières, état au 1er juillet 2004, Canton de Vaud.*
- RLE: *Regolamento di applicazione della Legge edilizia del 9 dicembre 1992, état au 1er janvier 2009, Canton du Tessin.*

«La pierre qu'ont rejetée ceux qui bâtissaient Est devenue la principale de l'angle.»

Psaume 128, 22¹

1. ETUDE DE CAS: L'INDUSTRIE DE LA PIERRE NATURELLE EN FRANCE APRÈS LA SECONDE GUERRE MONDIALE

1.1. Introduction



Fig. III.1. Construction de l'ensemble de la Résidence Le Parc à Meudon-La-Fôret, 1957-62, de l'architecte Fernand Pouillon [Lucan, J., éd. 2003]

Le cas du développement de l'industrie de la pierre naturelle en France pendant les deux premières décennies de l'après Guerre est particulièrement significatif pour toute recherche sur l'application de la pierre naturelle dans la construction. En effet, c'est à ce moment-là qu'un changement s'est produit au niveau de l'exploitation de la pierre dans les carrières, de sa mise en oeuvre sur le chantier et de son utilisation. Les énormes quantités de pierre extraites furent utilisées pour la construction de grands ensembles de logement, démontrant la compétitivité sur le plan économique de cette technique de construction. Le bon état de conservation de ces ensembles aujourd'hui, par rapport à ceux construits en même temps avec d'autres techniques, est un des facteurs qui a déterminé notre intérêt envers cette période historique particulière.

Nous essayerons de mettre en évidence comment l'industrialisation du secteur de la pierre naturelle en France dans la période d'après-guerre a été menée selon une démarche "scientifique" de rationalisation, partant de la ressource pour arriver à la mise en oeuvre. Nous montrerons aussi que

1. *La Bible en français*, version Louis Segond 1910, www.info-bible.org, consulté le 30.08.2010.

cela a été l'affaire conjointe d'architectes, de carriers aussi bien que d'ingénieurs.

Cette période de développement industriel du secteur de la pierre naturelle en France est aussi particulière par le fait que, par rapport aux autres exemples de mécanisation de ce secteur d'activité dans d'autres pays de l'Europe, elle a été appliquée à la pierre naturelle comme matériau pour les structures porteuses.

1.1.1. La reconstruction en France après la Seconde Guerre mondiale

Après la Libération (Paris est libérée le 25 août 1944), la reconstruction est une nécessité pressante: 420'000 bâtiments d'habitation ont été détruits durant le conflit ainsi que 1'900'000 partiellement endommagés [Lucan, J. 2001:36]. Le 16 novembre 1944, un nouvel organisme étatique voit le jour afin d'assurer l'organisation de la reconstruction dans son ensemble; il s'agit du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme (MRU) dirigé par Raoul Dautry [*ibid.*]. C'est surtout à partir des années 1950, après une première période de reconstruction dans l'urgence, que des projets d'envergure pour le logement voient le jour.

La pierre naturelle est un matériau qui jouit d'un certain succès déjà à partir de la première reconstruction après l'invasion allemande de 1940, notamment chez certains architectes qui prônent un retour à une architecture de caractère "français", comme le démontre François Vitale, professeur de construction à l'École des Beaux-arts de Paris, qui évoque le caractère "symbolique" de ce matériau [*ibid.*:26].

1.2. Les précédents historiques

1.2.1. Le Paris haussmannien

Dans son ouvrage sur les immeubles parisiens du XIXe siècle, François Loyer traite l'évolution des techniques constructives dans le gros oeuvre [Loyer, F. 1987]. L'auteur relève l'importance d'une évolution "industrielle" des procédés de mise en oeuvre plutôt que des matériaux employés, lesquels restent, surtout dans le cas des structures porteuses, ceux de la tradition [*ibid.*:162]. La pierre naturelle, qui demeure le matériau privilégié des immeubles haussmanniens, est désormais exclusivement de la pierre de taille: les blocs, appareillés en parpaings, sont dressés aussi sur les joints (ce qu'on appelle des "moellons smillés"). Ces éléments sont désormais produits par sciage et présentent donc des surfaces très précises. Ils sont mis en oeuvre sur le chantier grâce à des moyens de levage puissants et sont transportés à Paris par les nouveaux moyens de transport de l'époque (chemins de fer et canaux). Cette facilité d'approvisionnement en pierres de différents types permet, dans le cas de l'immeuble parisien, une utilisation de pierres différentes pour les divers éléments: en particulier des pierres dures pour les soubassements [*ibid.*:162] et des pierres meulières, qui, liées au ciment hydraulique, permettent la réalisation de maçonneries très résistantes pour les fondations et les murs mitoyens [*ibid.*]. Cette disponibilité accrue en pierres dures (calcaires durs) permet de mettre en oeuvre des murs d'une hauteur élevée et pouvant supporter de grandes charges, tout en réduisant l'épaisseur du mur et, en conséquence, son emprise au sol. Ceci conduit, comme l'affirmait Charles Garnier, à une économie soit de la matière employée soit des surfaces occupées par la structure porteuse [Garnier, C. 1985:110]. La dimension des blocs de pierre évolue vers des dimensions de plus en plus grandes: à la fin du XIXe siècle, comme le relève Loyer, des hauteurs de 1 mètre et des longueurs de 2 à 3 mètres

sont d'usage courant [Loyer, F. 1987:164], et l'épaisseur des blocs en parpaings est normalement de 50 centimètres².

De ces nouveaux formats de pierres naturelles découle une nouvelle stéréotomie, qui se base sur le grand appareil. Loyer note qu'à cette époque l'épannelage des pierres est réalisé dans la carrière et que souvent les différents éléments sont préfabriqués dans les ateliers: en chantier, le ravalement et la sculpture des décorations sont, par conséquent, réduits [*ibid*:164]. La précision dans l'exécution des éléments en pierre naturelle est alors permise par l'évolution des techniques de dessin et calcul depuis le XVIIIe siècle.

Une grande facilité de construction est acquise grâce à l'évolution des techniques de production et de mise en oeuvre, et a comme conséquence, dans le cas de Paris, une réduction du emploi des matériaux de démolition: en effet, il est presque impossible d'intégrer les anciens moellons bruts dans les nouvelles maçonneries de parpaings de grand appareil. Les matériaux de démolitions devinrent donc des résidus, souvent utilisés pour combler les anciennes carrières de la rive gauche [*ibid*:167].

Ce prélude sert à la compréhension des développements "industriels" dans l'exploitation de la pierre naturelle en France à partir des années 1940. Il est possible de les interpréter comme une évolution de techniques qui, depuis déjà un siècle, avaient vu le jour lors des grands travaux haussmanniens.

1.3. Les fondements

1.3.1. Maçonnerie et préfabrication

Comme l'a affirmé Yvan Delemontey [Delemontey, Y. 2007], la renaissance de l'utilisation de la pierre naturelle comme matériau de construction dans l'après-guerre commence déjà auparavant, grâce au nouvel intérêt que les architectes portent à la maçonnerie. Cette technique constructive était considérée, après la Première Guerre mondiale, comme dépassée à cause de la préférence de la nouvelle génération d'architectes et ingénieurs envers les ossatures en acier et en béton armé. La maçonnerie, procédé constructif simple, d'exécution facile et nécessitant des ressources réduites, trouve, par contre, une place particulière au sein des réflexions des planificateurs de la reconstruction. Le protagoniste principal de ce renouveau est Pol Abraham qui, en qualité de président de la Commission de Normalisation de la Maçonnerie, prône un retour à cette technique selon une approche "scientifique" et industrielle. Il est compréhensible que la revue "Techniques et architecture", dont le président du conseil de rédaction est Auguste Perret, consacre le numéro 9-10 de 1943 à cette technique constructive et que l'une des plus importantes contributions soit celle de Pol Abraham lui-même, portant le titre "Défense et illustration de la maçonnerie" [Abraham, P. 1943]. Dans ce même numéro nous trouvons plusieurs contributions au sujet de l'industrialisation, de la normalisation et de l'importance pour la reconstruction de ces changements dans les modes de construction: "Maçonnerie et normalisation" [Vitale, F. 1943] et "Reconstruction et industrialisation". On trouve aussi deux articles qui traitent de la pierre naturelle: "Les matériaux de construction" [Demaret, J. 1943] et "La production moderne de la pierre de taille" [Dérivé, M. 1943]. La défense de la maçonnerie ainsi que la démonstration de son actualité s'appuient, entre autres arguments, sur celui de la préfabrication, thème propre à la Modernité: une production standardisée d'éléments issue de l'industrie mécanique.

2. Citation de Emmanuel-Eugène Viollet-le-Duc par François Loyer dans la note 7 du Chapitre III, "Les beautés de la technique" [Loyer, F. 1987:222].

La préfabrication semble être la meilleure réponse aux nécessités de la reconstruction grâce aux économies qu'elle permet, notamment à travers la réduction du temps de mise en oeuvre sur le chantier et des coûts, par la production en série. Il semblait, par conséquent, nécessaire que le secteur de la pierre naturelle s'industrialise aussi et soit normalisé au niveau des formats et de la qualité des produits. Cette réflexion se trouve, toujours sous la plume de Pol Abraham, dans l'article "Maçonnerie" [Abraham, P. 1945], à nouveau publié dans la revue "Techniques et architecture", dont le numéro 1-2 de 1945 est dédié, précisément, à la normalisation. Une année plus tard, en 1946, Pol Abraham écrira la première édition de "Architecture préfabriquée". Cette "normalisation" de la maçonnerie se concrétise, selon lui, par l'utilisation et la production d'une série limitée d'éléments modulaires en accord avec les dimensions standardisées du bâtiment, par la déjà citée préfabrication des éléments et par une standardisation des procédés de mise en oeuvre qui garantissent une réduction des délais de réalisation ainsi que les: «improvisations, flottements, retouches, ajustages et repentirs» [Abraham, P. 1945]. Il affirme que cette dernière partie est la moins développée à l'heure où il écrit son texte.

Nous pouvons constater que ces positions sont en accord avec les réflexions faites par l'architecte suisse Hans Schmidt et contenues dans son texte manuscrit "Construction standardisée", de 1931. Nous le citons ici parce que son engagement le portera à s'occuper des problèmes de standardisation dans la construction de logements collectifs dans l'Allemagne de l'Est. Des projets qui se rapprochent de ceux de la reconstruction d'après-guerre en France. Une standardisation qui, pour Schmidt, devait répondre aux nécessités de simplicité, fonctionnalité et adéquation, propres à la construction de masse. Un procédé technique qui aurait permis la suppression de «l'arbitrage esthétique des architectes» et qui les aurait obligé à un travail «rigoureux, discipliné» afin d'atteindre une «certaine neutralité et uniformité» [Schmidt, H. 1931]. Un changement d'attitude vis-à-vis de la construction qui nécessitait la coopération de tous les participants du secteur du bâtiment.

1.3.2. Industrialisation et normalisation de l'exploitation de la pierre naturelle

L'engagement de la part des scientifiques de la construction au sujet du développement des techniques industrielles dans le secteur de la pierre naturelle permet de réaliser, sur un plan normatif et matériel, les projets cités plus haut. Grâce aux efforts de l'*Association française pour la normalisation* et du *Centre scientifique et technique du bâtiment*, en 1950 il était déjà possible de recueillir les expériences faites afin de publier un cahier au sujet des "calcaires tendres prétaillés" [Germain, J., éd. 1950]. L'année précédente, en 1949, l'*Institut technique du bâtiment et des travaux publics* avait édité le livre "La pierre matériau du passé et de l'avenir", de l'ingénieur Pierre Noël [Noël P. 1949], traitant les nouvelles techniques mécanisées d'exploitation de la pierre naturelle. Un article du même auteur sur le même sujet paraîtra en 1951 dans le numéro de novembre la revue "Bâtir" de la *Fédération nationale du bâtiment et des activités annexes* [Noël, P. 1951]. Pierre Noël sera aussi l'auteur, à la fin des années 1960, de l'ouvrage "Technologie de la pierre de taille. Dictionnaire des termes couramment employés dans l'extraction, l'emploi et la conservation de la pierre de taille" [Noël, P. 1968] qui contiendra, outre les termes et les techniques historiques, une bonne partie des innovations introduites pendant les années 1950. Cette période de renaissance permettra aussi à René-Michel Lambertie de dédier un chapitre de son ouvrage "L'industrie de la pierre et du marbre", publié en 1965, à l'actualité de la pierre et d'énumérer, dans la partie dédiée aux grandes réalisations d'aujourd'hui, l'exemple des «multiples

habitations à bon marché bâties en pierre», réalisés grâce aux «procédés industriels d'extraction, de taille, de manutention», qui rendent les qualités incontestées de ce matériau «à la portée du plus grand nombre» et à des prix qui «sont désormais largement compétitifs» [Lambertie, R. 1965].

Parmi les entrepreneurs de la pierre naturelle qui ont travaillé au développement des procédés industriels dans l'exploitation, il suffit d'évoquer la figure de Paul Marcerou qui a dirigé la *Société française de la pierre normalisée et prétaillée* (SFNTP) et, après sa dissolution 1951, la *Société des carrières et tailleries du Bassin Parisien* (SCTBP) ainsi que la *Société méridionale d'exploitation des carrières de pierre de taille* (SMECPT)³. Paul Marcerou a été actif, depuis les années 1930, dans le développement de machines légères pour l'exploitation des pierres dures et tendres [Delemontey, Y. 2007; Germain, J., éd. 1950]. Il équipa deux carrières pilotes en Normandie, à Fleury-sur-Orne, et en région parisienne, à Méry-sur-Oise. Dans ces carrières, l'exploitation se faisait à l'aide de différents types de batteries de perforatrices à alimentation électrique. Les blocs ainsi extraits étaient successivement débités, dans des formats standards, à l'aide d'armures de sciages équipées de scies à rubans. Fort de son expérience dans ces deux carrières pilotes, Paul Marcerou remportera le concours lancé en 1948 par le Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme pour l'équipement mécanisé de carrières pour la production de pierres prétaillées standardisées. Il était nécessaire pour le Ministère que chaque carrière puisse fournir 10'000 m³ de pierre prétaillée par an [Delemontey, Y. 2007]. Il acquerra ensuite plusieurs droits d'exploitation pour des gisements abandonnés dans l'Ouest et dans le Sud de la France: entre autres, les carrières du Pont du Gard et de Fontvieille. Cette dernière sera équipée avec une nouvelle "machine marcerou", formée d'une série de scies à chaîne qui attaquent directement la masse de la pierre en réalisant une série de découpes rectilignes parallèles. Le résultat obtenu, ce sont des blocs qui présentent, déjà à l'extraction, une qualité de parement pour les faces et des dimensions précises dérivant des formats standardisés. Cette carrière, capable de fournir jusqu'à 10'000 m³ par mois [Delemontey, Y. 2007], fournit la majorité des chantiers de l'architecte Fernand Pouillon dans le Sud de la France, en région parisienne et aussi en Algérie.

L'évolution des procédés de production suivit donc la standardisation permettant une augmentation de la quantité de pierre disponible tout en réduisant l'investissement en temps et main d'oeuvre; ceci permit une forte réduction des prix du matériau et un approvisionnement assuré pour les chantiers.

1.4. La matière première: les calcaires

1.4.1. La classification et la réglementation des roches

Les roches exploitées pour fournir la pierre prétaillée furent surtout des roches calcaires. La grande quantité de gisements accessibles en France ainsi que la facilité dans l'exploitation mécanique de ce type de roches, sont à l'origine du choix de leur valorisation. Il faut aussi souligner la présence de gisements de ce type de pierre calcaire dans la région parisienne, qui fut l'un des principaux lieux de construction.

3. Ces dernières existent encore sous le nom de "Carrières de Provence". Cette société exploite actuellement trois carrières: celles de Castillon du Gard et Vers Pont du Gard; celle des Estillades à Oppède et celle de Fontvieille. Il est intéressant de noter que les grands ensembles construits pendant les années 1950-1960 figurent, encore aujourd'hui, comme références pour cette société. Dans les produits figurent aussi les blocs débités, mais dont les mesures dépendent aujourd'hui des exigences du client. Voir à ce propos le site internet de la société: <http://www.carriere-pierre-provence.com>, consulté le 27.07.2009.

Il s'agissait surtout de roches biogènes des formations du Jurassique inférieur ou moyen; du Jurassique supérieur oolithique; du Crétacé supérieur et du Lutécien [Germain, J., éd. 1950:4]. L'Association française de Normalisation, présidée par le déjà cité Pol Abraham, développa une réglementation pour les essais et la classification des roches calcaires, sous la forme de la norme B10-001. Pour chaque pierre fut établie une fiche descriptive qui contenait les caractéristiques techniques et physiques (densité; gélivité; rupture; porosité; capillarité; usure et difficulté de taille); l'aspect extérieur sous forme de photographies; la classe pétrographique; la texture; la classe de dureté (selon une numérotation croissante de 1 à 14); les aptitudes spécifiques d'emploi en divers climats et des renseignements complémentaires sur les gisements et carrières exploitées. La définition des classes de dureté, établies sur la base de la densité et de la charge de rupture à la compression, était un instrument important pour délimiter les types de roches exploitables avec les nouvelles techniques mécanisées: cette limitation comprenait les classes de dureté de 1 à 6, (correspondant aux calcaires de tendre à ferme, de densité de 1'470 à 2'270 kg/m³ et d'une résistance à la compression variable de 50 à 390 kg/cm²) [*ibid*].

1.4.2. Les formats standardisés

Une autre tâche importante de normalisation fut d'établir les formats standard pour la production en série de la pierre prétaillée: pour cela aussi on fit recours à des études scientifiques. Les épaisseurs pour les blocs de pierre utilisés dans la construction des structures porteuses et des façades devaient répondre non seulement aux exigences statiques, mais aussi permettre une durabilité accrue ainsi que le confort thermique, acoustique et hygrométrique. L'argument principal fut celui de l'inertie thermique de la pierre capable d'amortir les fluctuations de température entre l'intérieur et l'extérieur et, selon l'épaisseur choisie, de garantir une température de la surface intérieure constante et égale à la moyenne journalière [Germain, J., éd. 1950:7]. Ce sont des propos semblables à ceux présentés et discutés par André Hermant dans son article "De l'influence de la masse sur l'habitabilité des constructions" dans le déjà cité numéro 9-10 de septembre-octobre 1943 de la revue "Techniques et architecture" [Hermant, A. 1943]. L'épaisseur des éléments en pierre prétaillée pour les façades fut établie à 40 cm et, pour les refends, à 30 cm. Les deux autres dimensions furent établies afin de respecter la modularité des éléments: une condition nécessaire pour la réduction des découpes et des déchets sur le chantier. Plusieurs séries de dimensions furent déterminées et utilisées dans le temps. En général, elles se situaient à l'intérieur des limites des trois types établis par la Direction des travaux du Ministère de la reconstruction et de l'urbanisme, soit: petit bloc d'une longueur de 20 cm, d'une épaisseur de 40 cm et de 25 cm de hauteur; moyen bloc de 40x60x40 cm et gros bloc de 40x100x75 cm [Germain, J., éd. 1950]. La tendance fut l'utilisation de blocs de grandes dimensions, représentant environ un demi-mètre carré de façade, en exploitant les équipements mécaniques de manutention présents sur le chantier [Bonnome, C. et Léonard, L. 1959:1404]. Les épaisseurs courantes des blocs pour les structures porteuses permettaient, pour les pierres tendres, la réalisation d'immeubles de trois à quatre niveaux au maximum [*ibid*:1404]; selon le type de pierre, cette hauteur pouvait être dépassée, comme le démontre le cas de la Résidence le Parc, à Meudon-la-Forêt, construite par l'architecte Fernand Pouillon entre 1957 et 1962. En effet, les bâtiments les plus hauts atteignent onze niveaux.

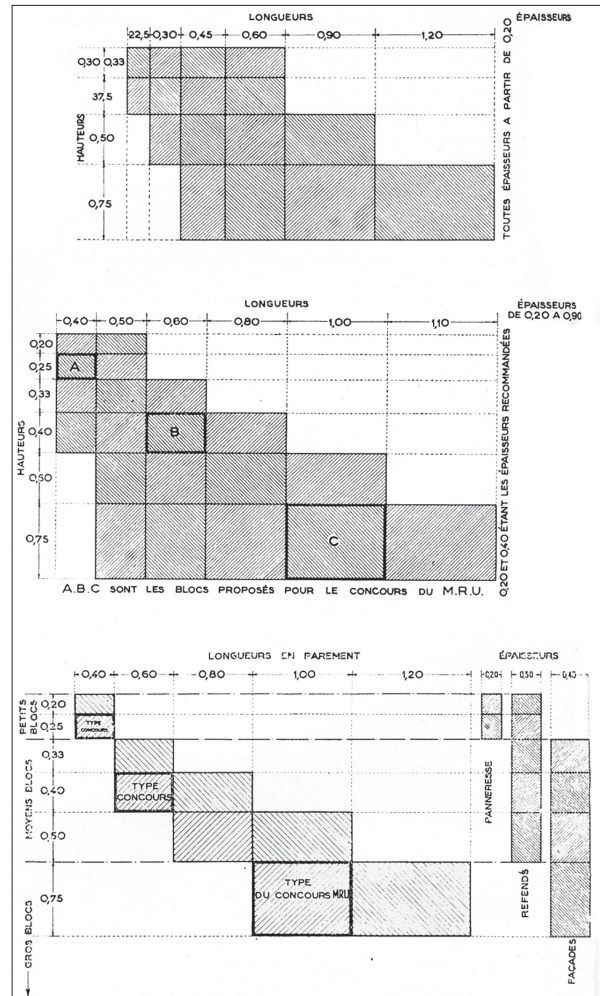


Fig. III.2-3. Les formats standardisés de blocs en pierre naturelle prétaillée [Germain, J., éd. 1950]

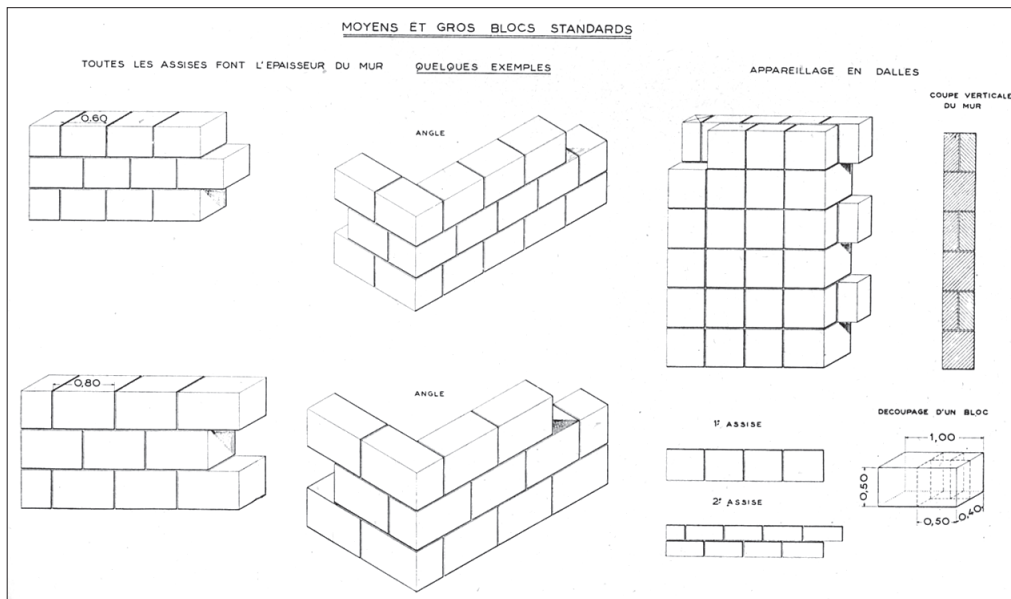


Fig. III.4. Appareillage des moyens et gros blocs standards [Germain, J., éd. 1950]

1.4.3. *La mise en oeuvre*

La mise en oeuvre des blocs se faisait à l'aide d'appareils de levage, dans le cas des gros blocs, ou à la main, pour les petits. Dans la maçonnerie constituée de grands blocs, chaque élément formait parpaings en occupant l'entière épaisseur du mur; les petits blocs étaient, en général, appareillés en panneresses ou en boutisses. Pour la mise en place des blocs, on recourait à des cales en bois, permettant la parfaite mise à niveau des blocs, et à un mortier de pose, qui remplissait aussi les joints verticaux. L'épaisseur des joints, pour des gros blocs, était comprise entre 4 et 15 mm et, pour les éléments légers, entre 20 et 30 mm. Des schémas d'appareillage pour les différentes dimensions de blocs furent aussi développés [Germain, J., éd. 1950:23-25].

1.5. Un procédé "traditionnel évolué"

1.5.1. *Rationalisation de la filière productive*

La technologie de la pierre prétaillée est un procédé qui s'insère dans la filière de l'industrialisation du bâtiment et, plus particulièrement, dans la préfabrication. Dans la France des années 1950, la préfabrication comptait deux approches: la première était celle d'une préfabrication industrialisée, basée sur la production en usine et qui se développa surtout autour de la préfabrication lourde en béton armé, et la deuxième reposait sur une approche dite "traditionnelle évoluée" dans laquelle des procédés et des matériaux traditionnels étaient améliorés au niveau de leur production et du rendement [Simon, E.H.L 1962:36-37; Bonnome, C. et Léonard, L. 1959]. La pierre prétaillée est donc la: «préparation industrielle d'une ressource naturelle inépuisable de la France» selon des procédés d'exploitation qui visent: «à obtenir des débits de série comparables par la constance des dimensions à la production des agglomérés» [Bonnome, C. et Léonard, L. 1959: 1402-1403]. Cette distinction d'approches de l'industrialisation permet de mieux apprécier l'importance de l'expérience française dans le domaine de la pierre prétaillée. En effet, l'industrialisation du secteur de la pierre de taille fut une rationalisation de l'ensemble des processus productifs, de la carrière au chantier, plutôt que son transfert dans des usines sans une vraie remise en question des procédés de production [Delemontey, Y. 2007]. De plus, le fait de ne pas avoir changé radicalement les modes de mise en oeuvre facilita sa diffusion auprès des entreprises engagées dans la reconstruction d'après-guerre, cela couplé à une certaine souplesse et adaptabilité sur le chantier, typique de la technique de la maçonnerie.

1.5.2. *Evolution des machines*

Un même développement, sous forme de technologie "traditionnelle évoluée", fut celui des machines d'exploitation et de découpe. Les nouvelles haveuses mécaniques furent basées sur la technique, largement répandue en France, de la saignée par le biais de l'aiguille, un long pic de 3 à 4 m, ou de florets, qui étaient enfoncés à la masse: c'était le cas des premières haveuses type Lefèvre (carrier exploitant dans les années 1940 une usine pilote à Bonneuil-en-Valois dans l'Oise) ou les perforatrices type Marcerou. Des haveuses à chaîne, telles celles utilisées encore aujourd'hui, virent le jour: des machines simples comme les premières haveuses Korfman ou plus complexes, comme celles développées par Paul Marcerou pour la production de pierres prétaillées directement dans la masse du gisement, permettant la découpe verticale et horizontale en deux passages successifs. Les brevets Lefèvre et Marcerou se portèrent aussi sur le développement des scies, des fils de sciage et des châssis

et armures pour leur utilisation en série. Paul Marcerou développa également un modèle de scie à chaîne portative permettant la découpe sur chantier ou en carrière.

L'amélioration, en termes de productivité, d'une carrière équipée en machines "modernes", par rapport à une traditionnelle, est d'environ quarante fois [Noël, P. 1951:14]. La production journalière augmenta de 10 m³ par chantier à 40 m³, avec une diminution de 20 à 10 hommes par chantier⁴. Pierre Noël analysa la "Grande Carrière" de Saint-Vaast-le-Mello dans l'Oise, une carrière à ciel ouvert dont la production annuelle passa de 3'400 m³ avec 35 ouvriers à 10'000 m³ avec 10 ouvriers [Noël, P. 1951]. Deux chantiers furent équipés avec, chacun, un derrick de dix tonnes avec un bras de 20 m, servant au déplacement des blocs de pierre et des machines; deux haveuses à chaîne de 2,10 m et des scies portatives type Marcerou pour la découpe des blocs extraits.

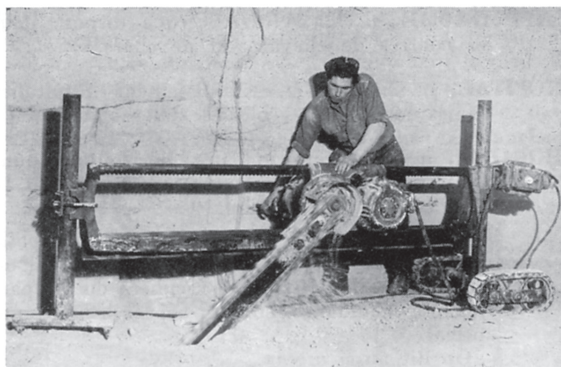


Fig. 1. — Havage mécanique par haveuse Korfmann. (Carrière-usine de Montanier, Oise.)

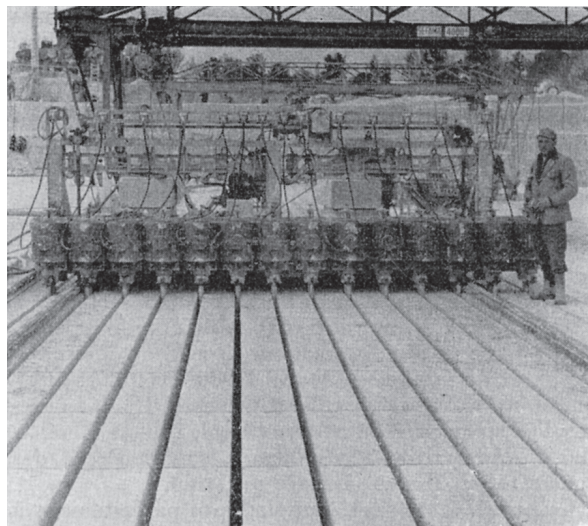


Photo S.C.T.B.P.

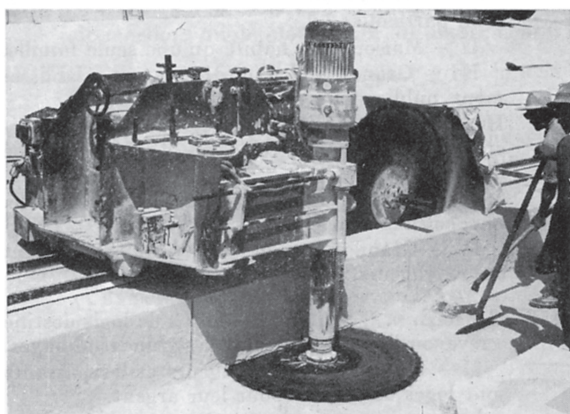


Fig. 2. — Extraction de pierre précisée par haveuse à deux disques en coupes perpendiculaires. (Carrière de Cabéran, Vaucluse.)

Fig. III. 5-6. Haveuses à chaîne et à disque [Noël, P. 1968]. Batterie d'haveuses [Bonnome, C. et Léonard, L. 1959]

Cette floraison d'outils mécaniques d'exploitation est toute à fait propre à l'essor de la pierre prétaillée en France. Il est possible de noter une nette différence par rapport à la mécanisation de l'exploitation dans les gisements de pierre naturelle en Italie, pays qui constitue une référence dans ce champ d'activité. Le développement technologique italien est à mettre en rapport avec l'utilisation principale de ses pierres naturelles, c'est-à-dire le revêtement, surtout dans l'industrie du marbre. Les scieries italiennes furent équipées, déjà à partir de la fin du XVIIIe siècle, de châssis monolame pour la découpe de plaques, actionnés par la force motrice de l'eau. Pendant le XIXe siècle, les châssis à lames multiples furent introduits afin d'augmenter le rendement. Il en a été de même pour les carrières qui

4. Un chantier correspondait à un banc exploité dans la carrière.

exploitaient le marbre à l'aide de fils hélicoïdaux à partir de la fin du XIXe siècle (à Carrare la première entreprise à utiliser le fil hélicoïdal pour l'exploitation fut celle de Adolfo Corsi et Italo Faggioni en 1895 [Bruni, C., éd. 2008]). Ces dernières installations étaient très complexes du point de vue de leur mise en place, mais permettaient de découper des énormes blocs qui auraient ensuite été débités en plaques minces en réduisant les risques et les déchets produits par l'exploitation à la poudre noire. Par la suite, on utilisa le fil diamanté et les haveuses à chaîne, mais toujours dans l'optique d'extraire des blocs de grandes dimensions. Il est aisé de comprendre cela par rapport à la différenciation des étapes productives des plaques de revêtement. Le but principal de l'opération est de pouvoir produire une plaque de pierre de haute qualité, surtout du point de vue de l'apparence. Le carrier extrait les blocs, dont les dimensions sont à mettre en rapport avec celles des machines qui réaliseront les découpages successifs plutôt qu'avec le produit final, la plaque, qui est un produit sur mesure. De là, la nécessité d'exploiter des gros blocs du fait des grandes dimensions des châssis, ce qui signifie un rendement accru pour la taille de la pierre. Ces blocs sont en général transportés dans les scieries qui s'occupent de la transformation en plaques; lesquelles peuvent encore être travaillées jusqu'à atteindre les dimensions et les traitements de surface souhaités par le client. Cette troisième phase de transformation de la pierre naturelle peut être faite soit dans la scierie-même soit, comme c'est souvent le cas, dans un atelier, qui peut être aussi très distant du lieu d'exploitation.

1.6. Les exemples construits

1.6.1. Une approche quantitative

Les ensembles de logements projetés par l'architecte Fernand Pouillon, en France et en Algérie, sont sûrement les exemples les plus connus d'utilisation de la pierre prétaillée, mais d'autres bâtiments et ensembles furent réalisés à la même époque et témoignent, aujourd'hui encore, de l'excellente durabilité des matériaux employés. Il est nécessaire de souligner que ces importantes réalisations concernent des logements bon marché, et non seulement des immeubles de rapport ou des bâtiments publics. En effet, la disponibilité et les prix réduits du matériau ainsi que les frais d'entretien réduits par rapport à d'autres matériaux, faisaient préférer à cette époque l'utilisation de la pierre prétaillée dans la construction de grands ensembles. On citera ici quelques exemples, non exhaustifs, mais qui permettent d'avoir un aperçu de l'ampleur des opérations: le grand ensemble de Sarcelles, par les architectes Labourdette et Boileau, de 8'000 logements dont 21'000 m³ en pierre porteuse et 12'000 m² en murs rideaux; les H.L.M. de Nanterre, architecte Hummel, de 600 logements; le grand ensemble de Massy-Antony, architectes Sonrel et Duthilleul, de 10'000 logements; les H.L.M. à Beauvais, architecte Labourdette, de 300 logements; les H.L.M. Bel-Air à Angoulême, architectes Chaume et Laliard, de 500 logements; les H.L.M. Soyaux à Angoulême, architectes Simon et Poncet, de 10'000 logements; l'opération du C.I.L à Orléans, architecte André Bazin, de 600 logements; les H.L.M. de la Résidence Maryse-Bastié, Migné et Rotonde, à Tours, de 530 logements; les H.L.M. de Châtelleraut de 500 logements; les H.L.M. de Marseille, architecte Louis Olmeta, de 810 logements; les H.L.M. de Aix-en-Provence, architecte Louis Olmeta, de 600 logements; les H.L.M. à Caen, architecte Guy Pison, de 1'116 logements [Delemontey, Y. 2007: 126; Lambertie, R. 1965:112-115]. Il faut ajouter à cette liste les réalisations de l'architecte Fernand Pouillon qui construisit, à lui seul: la reconstruction du Vieux-Port de Marseille, 700 appartements (1949-53); Les Sablettes à Toulon, 150 appartements (1950); à Aix-

en-Provence, 159 appartements (1952); la Cité Buffalo à Montrouge, 466 appartements (1955-58); la Cité Victor Hugo à Pantin, 282 appartements (1955-57); la Résidence le Parc à Meudon-la-Forêt, 2'635 appartements (1957-62); la Cité Point du Jour à Boulogne-Billancourt, 2'260 appartements (1957-63). Et en Algérie: la Cité Diar-es-Saada à El Madaina, 800 appartements (1953); la Cité Diar-el-Mahçoul à El Madaina, 1'800 appartements (1954); la Cité Climat de France à Alger, 3'500 appartements (1955); la Cité de Valmy et la Cité Lescure à Oran, 800 appartements (1957) [Lucan, J., éd. 2003; Bonillo, J., éd. 2001; Dubor, B., éd. 1987].

Les réalisations citées plus haut, sans compter celles de Fernand Pouillon, comportent 33'556 logements, auxquels il faut ajouter les 13'552 de Fernand Pouillon, pour un total de 47'108 logements.

1.7. Fernand Pouillon

1.7.1. La pierre prétaillée à travers les écrits de Fernand Pouillon

Fernand Pouillon nous a laissé deux importants ouvrages dans lesquels nous pouvons trouver des informations significatives pour la compréhension de son oeuvre et de son architecture. En ce qui concerne la période de la reconstruction en France dans les années 1950 et l'utilisation de la pierre prétaillée, il faut chercher quelques informations dans son livre "Mémoires d'un architecte", qui relate sa carrière depuis ses débuts et jusqu'au 11 juillet 1963 [Pouillon, F. 1968]. L'autre ouvrage de Fernand Pouillon est "Les Pierres sauvages". Ceci est la chronique inventée de la construction de l'Abbaye cistercienne du Thoronet par son maître bâtisseur. Tout au long des mémoires de Pouillon, nous retrouvons la figure du carrier et inventeur Paul Marcerou («le titan de la carrière d'Estailade» [ibid:193]), un homme qui développait des machines pour l'exploitation des pierres dures et tendres, et qui: «avait conçu un ensemble de machines capables d'extraire et de tailler au centimètre près, des blocs de pierre tendre de la région d'Arles, à Fontvieille» [ibid:98]. C'était l'époque de la reconstruction notamment du Vieux-Port de Marseille, projet dans lequel Fernand Pouillon réalisa les bâtiments de La Tourette et ceux du Front du Port. L'architecte décrit ainsi cette nouvelle pierre de taille: «La pierre préfabriquée était née. Elle ne reviendrait pas plus cher que la brique ou l'aggloméré de ciment. Mais, arrivant au temps des structures en béton remplies de matériaux légers et à la veille du pan de verre et des façades métalliques, l'invention de Marcerou n'eut et n'aura jamais de conséquences importantes. Cependant, à cette époque où le charbon était rare et le ciment et l'acier insuffisants, les augures du ministère consentirent à ce que les procédés Marcerou intervinsent largement dans la reconstruction» [ibid:98-99]. Fernand Pouillon n'eut pas, par contre, recours à cette technique constructive pour l'ensemble de La Tourette. Dans ce cas, il utilisa la technique de la "pierre banchée", c'est-à-dire des murs en béton coulés dans des coffrages perdus sous forme de plaques de pierre dure de 5 centimètres d'épaisseur [ibid:101 et 108]. Pour les façades du Front du Vieux Port, il décida d'utiliser la pierre prétaillée du Pont du Gard exploitée par Paul Marcerou, qui était, selon Pouillon, en faillite [ibid:117 et 130]. Dans les "mémoires", Pouillon affirme que les chutes de découpe des façades du Vieux Port auraient été utilisées, sous la forme de blocs informes, pour les maçonneries de l'ensemble des Sablettes à Toulon, constituant ainsi une matière première gratuite [ibid:137]. La pierre prétaillée fut aussi le matériau choisi pour l'ensemble des 200 logements de Aix-en-Provence. Cette technique, couplée à des systèmes constructifs particuliers pour les planchers et les cloisons (les premiers, en béton coulés sur des éléments préfabriqués en staff servant de coffrage, et les deuxièmes, en briques

de terre cuite appareillées verticalement), avait comme objectif premier la réduction des coûts de construction et des délais de mise en oeuvre. Cette opération devait servir, toujours selon Pouillon, à la relance de l'entreprise de Paul Marcerou [Pouillon, F. 1968:141 et 143]. Fernand Pouillon décida d'utiliser la pierre naturelle pour ces ensembles de logement, d'une part pour son prix favorable et sa large disponibilité et, d'autre part, parce que, comme il affirmait, elle était le matériau le mieux adapté pour la construction de logements. En effet, Pouillon explique le choix du matériau non comme fait *à priori*, mais plutôt comme une adaptation entre le programme et sa structure: «Pour moi, construire une aérogare en pierre serait une imbécillité, pour ne pas dire une folie. Mais s'imposer des structures dynamiques pour installer des trois pièces-cuisine dans des immeubles de trois à dix étages, n'est pas moins aberrant» [ibid:174].

La pierre prétaillée provenant des carrières de Paul Marcerou à Fontvieille, dont la propriété était passée depuis 1952 à Georges Blachette [ibid:176], fut utilisée aussi pour les ensembles que Fernand Pouillon construisit à Alger: Diar-Es-Sadaa, Diar-El-Mahçoul et Climat de France, grâce aux prix très réduits du fret entre Marseille et Alger. La quantité de 80'000 mètres cubes de pierre transportée est citée par Pouillon [ibid:178]. Même dans les projets parisiens, Pouillon utilisa la pierre prétaillée des carrières de Provence, dans les ensembles de Buffalo à Montrouge, Pantin, Meudon-la-Forêt, Point du Jour à Boulogne-Billancourt. Elle avait aussi été prévue comme matériau pour l'ensemble de logements "Croix des Oiseaux" à Avignon, mais elle fut substituée, en désaccord avec l'architecte, par le procédé de la "préfabrication lourde" en béton [ibid:284-288].

D'autres bâtiments de Fernand Pouillon furent construits en pierre prétaillée, mais ne sont pas cités par l'architecte dans ses "mémoires". Ce sont l'extension de l'hôtel de Police de Marseille, la bibliothèque de la Faculté de droit de Aix-en-Provence et la Bibliothèque universitaire Saint-Charles à Marseille [Lucan, J., éd. 2003:36].

1.8. Conclusions

L'étude de l'activité de la pierre prétaillée en France entre les années 1940 et 1960 permet d'énoncer quelques principes concernant le développement de l'utilisation de la pierre naturelle pour les structures porteuses.

L'utilisation de la pierre naturelle pour la reconstruction de la France après la Seconde Guerre mondiale fut dictée par le fait que ce matériau était largement disponible localement; il nécessitait peu d'investissements en énergie pour son exploitation et transformation; sa mise en oeuvre était aisée; sa durabilité était prouvée et les coûts d'entretien réduits.

Ces arguments confortent l'hypothèse que la pierre naturelle est un matériau durable, économique et utilisable aussi dans la construction de bâtiments d'habitation.

Une connaissance de chaque phase de production est nécessaire parce que la pierre naturelle demande une rationalisation des procédés plutôt qu'une révolution de ceux-ci. En effet, les principes productifs sont toujours les mêmes, mais les outils et les procédures doivent évoluer.

La standardisation des dimensions et des modes d'appareillage de la pierre naturelle apporte des avantages économiques et une rationalisation de l'exploitation de la ressource. Les variations sont toujours possibles à travers l'utilisation de séries d'éléments différents.

La tendance en France, à partir des années 1950, fut de recourir à des éléments standardisés de dimensions croissantes afin de pouvoir profiter au maximum des avantages fournis par l'assemblage d'éléments maniés à l'aide des moyens de levage mécanisés disponibles sur le chantier.

La plus grande différence entre l'état actuel et l'époque du cas étudié n'est pas seulement la diminution de la construction de nouveaux grands ensembles de logement, mais aussi le fait que la construction n'est plus une nécessité à court terme et que l'appui politique au secteur de la pierre naturelle est réduit. Ceci se ressent surtout au niveau de la planification des zones extractives, qui rendent inimaginable, à l'heure actuelle, l'exploitation des volumes cités plus haut; ceci du moins en Suisse.

Le cas de l'industrie française de la pierre présciée s'est développé autour d'un type de roche très précise, les calcaires, qui permettaient de généraliser une technique d'exploitation homogène, celle par découpe de la masse de pierre. Ceci conduisit à la standardisation des formats des pierres; ce qui est dans le cas de notre recherche moins envisageable, vu la différence géologique des roches traitées. Il est donc préférable de chercher une certaine standardisation ou adaptation entre procédés d'exploitation et de mise en oeuvre pour chaque type de pierre naturelle.

«Un objectif principal devrait être celui de la promotion des ressources locales en pierre naturelle comme matériau de construction ordinaire plus que comme matériau inusuel ou exotique.»

[Shadmon, A. 1996:159]

La pierre naturelle est, depuis sa décadence comme matériau de construction pour les structures, survenue dans la période Moderne, considérée comme un matériau noble et son utilisation est, en général, réservée soit aux revêtements minces soit à des constructions spéciales. Le cas de la reconstruction en France, traité au sous-chapitre précédent, reste, dans le contexte européen, un cas isolé. Si l'on remonte, par contre, seulement au XIXe siècle, on s'aperçoit facilement que la pierre naturelle était encore le matériau de construction le plus répandu, au moins en ce qui concerne les structures porteuses verticales, à côté de la brique. En Suisse, cette époque de la maçonnerie correspondit aux grands développements industriels et économiques des centres du Plateau, et à cette époque remonte une partie significative de notre substance bâtie, aussi en ce qui concerne les bâtiments de logement.

Comme il a été évoqué au chapitre dédié à l'exploitation de la pierre naturelle (Chapitre II), la production de plaques minces en pierre naturelle pour le revêtement a eu comme principales conséquences, d'une part, la réduction du nombre de types de roches exploitées, et donc une augmentation de la charge extractive sur un nombre limité de gisements, et, d'autre part, la production d'une quantité croissante de "chutes" d'exploitation, sous différentes formes. C'est pour cela qu'un retour à l'utilisation de la pierre naturelle, également pour la réalisation de structures porteuses, constituerait une forme durable d'utilisation de la ressource et une forme pertinente d'application des principes du développement durable dans le cadre des matériaux de construction.

L'objectif du présent chapitre est donc d'illustrer les différentes formes que l'utilisation de la pierre naturelle sous forme massive pour les structures peut actuellement assumer, ainsi que d'en relever les avantages et les défauts. Il a été choisi de se concentrer surtout sur les formes d'application qui pourraient être appelées "courantes", c'est-à-dire les utilisations de la pierre naturelle dans la construction ordinaire, parce que c'est surtout à ce niveau que le matériau est actuellement peu ou pas assez employé et que la littérature est le plus lacunaire. En plus, ces types de constructions caractérisent fortement notre environnement construit et, de leur qualité et durabilité, dépendent celles de nos lieux de vie.

2.1. L'exemple des maisons individuelles préfabriquées au XXIIIe Salon des Arts Ménagers à Paris en 1954

Lors de la XXIIIe édition du Salon des Arts Ménagers, à Paris, en 1954, treize maisons individuelles préfabriquées furent construites sur l'Esplanade des Invalides. Elles répondaient aux normes de l'époque en matière de surfaces et de prix: «en utilisant une gamme très variée de matériaux, aussi bien sous une forme traditionnelle que dans des applications techniques récentes» [Techniques et Architecture 1954]. À l'intérieur de cet échantillon de treize maisons, deux étaient construites en pierre naturelle et dans les deux cas avec de la "pierre prétaillée" (voir le sous-chapitre III.1). Les deux maisons, construites sur un seul étage, étaient caractérisées, l'une par un langage "moderne" et l'autre

par des formes plus traditionnelles, grâce, en particulier, au toit en pavillon. Ces réalisations sont contemporaines de celles des grandes ensembles cités plus haut et montrent comment le matériau "pierre présciée" fut appliqué également dans le cadre de l'habitat individuel à prix modéré.

La première maison, celle aux lignes "modernes", est construite avec des blocs en pierre présciée de 30 cm d'épaisseur (parpaings de 60x30x30 cm, sauf pour la première assise qui a une hauteur double, donc de 60 cm), hourdés au mortier bâtard. Les maçonneries reposent sur un soubassement qui assure un vide sanitaire tout en empêchant les remontées capillaires d'humidité. Les deux planchers sont en béton armé. La toiture est à une seule pente. Les cloisons intérieures sont en carreaux de plâtre ou en bois. Aucune isolation thermique est prévue.

La maison aux formes traditionnelles, au nom "Logis-Sprint", est construite avec des murs en pierre présciée de 20 cm d'épaisseur, doublées, à l'intérieur par une cloison en carreaux de plâtre, ce qui produit un vide d'air. Les parpaings sont, probablement, des "petits blocs" de format 40x20x20 cm [Germain, J., éd. 1950:XXII], sauf pour la dernière assise qui présente une hauteur plus grande, afin d'assurer la hauteur statique des linteaux des fenêtres et de la porte (peut être, des blocs de 40x20x33 cm). Les planchers sont en hourdis de terre cuite et poutres préfabriquées en béton. Les cloisons intérieures sont en carreaux de plâtre. Cette maison est conçue selon trois variantes de surface croissante: 62, 79 et 98 m².

Si l'on analyse les deux maisons avec plus d'attention, on remarque qu'aucune des deux n'est "moderne" ou traditionnelle, dans le sens que celle qui devrait être moderne l'est seulement dans sa forme extérieure et peut-être dans le fait que des parpaings de taille moyenne sont utilisés pour la maçonnerie. Le plan montre une volonté de modernité dans l'aménagement des pièces: une cuisine-salle à manger, une chambre en partie ouverte sur l'espace principal, des cloisons constituées par des rangements, mais, dans l'ensemble les pièces sont mal définies. Le recours à des planchers en béton armé est, en soi, un signe de modernité, mais introduit un procédé de construction différent de celui de la maçonnerie de pierres présciées; le recours à un plancher en hourdis céramiques dans la maison "Logis-Sprint" est, à notre avis, plus approprié parce qu'il comporte un temps de mise en oeuvre inférieur. Dans ce deuxième prototype, la dimension des parpaings est justifiée par la recherche d'une image générale plus proche de la tradition, mais la petite taille des parpaings n'est pas vraiment adaptée au choix de la pierre présciée. Le plan est efficace et il articule, d'une part, les pièces de jour (salle à manger-séjour et cuisine), avec un accès séparé, et, de l'autre, les chambres, en nombre variable selon la surface choisie. La surface réduite des distributions rend ce plan en quelque sorte "moderne".

La comparaison entre les prix au mètre carré bâti, obtenus grâce aux données fournies dans l'article de la revue *Techniques et Architecture*, permettent de confronter les différentes formes de construction. Le classement, en ordre croissant, est le suivant: Maison "Minimax", 21'372 fr/m², ossature en bois; Maison avec revêtement en bois bakélinisé, 21'372 fr/m², ossature en bois; Maison en pierre prétaillée, 21'388 fr/m², pierre prétaillée; Maison "Logis-Sprint", 22'151 fr/m², pierre prétaillée; Maison "Préfadur", 28'308 fr/m², béton de pouzzolane; Maison "Préfamétal", 30'000 fr/m², ossature en acier⁵. Les maisons en pierre présciée se placent entre les solutions économiques, confirmant ainsi le fait que cette technique constructive était, à l'époque, efficace également au niveau de la maison individuelle.

5. Pour les autres maisons manquent les données soit de la surface bâtie soit du prix.

2.2. La pierre structurale

Les pierres naturelles actuellement exploitées en Suisse (voir le sous-chapitre II.2.8 et Annexes A.1 et A.3) possèdent des caractéristiques mécaniques et physiques qui les rendent bien adaptées à une utilisation structurale. C'est également ce que le patrimoine bâti nous montre avec évidence. Dans la construction courante, c'est-à-dire celle qui s'adresse au plus grand nombre, les éléments à disposition pour la composition architecturale sont assez limités. Si on prend, à titre d'exemple, le cas du logement, on s'aperçoit assez facilement que la structure porteuse détermine fortement la forme et le caractère des différents espaces de la maison, ou de l'appartement. Cette même structure porteuse assure, dans la majorité des cas, aussi la qualité de l'environnement intérieur. De cela l'hypothèse que l'utilisation structurale de la pierre naturelle, grâce à ces caractéristiques mécaniques, physiques et formelles, est une forme d'utilisation adaptée à la construction courante de logements.

2.2.1. Une forme de préfabrication

«L'automatisation de la production devrait idéalement être couplée à la standardisation des éléments en pierre naturelle. Des unités modulaires rendent la pierre naturelle plus compétitive vis-à-vis des autres matériaux de construction.» [Shadmon, A. 1996:143]

Comme démontré par l'étude sur l'utilisation de la pierre prétaillée en France (voir le sous-chapitre III.1), la pierre naturelle se prête, sans nécessiter d'importants changements dans les modes d'exploitation, à la préfabrication. Les développements subis ces dernières années par l'industrie des machines pour la taille de la pierre, surtout en ce qui concerne l'utilisation des outils à contrôle numérique, a permis le développement de produits en pierre naturelle standardisés pour le revêtement, qui rivalisent avec la plus fine production artisanale au point de vue de la qualité d'exécution, mais qui possèdent des prix de vente attractifs. On cite, à titre d'exemple, les produits de PIBA Marmi ou les motifs en bas-relief produits par Testi Fratelli, appelés "Hyperwawe", développés par Pongratz Parbellini Architects⁶. Dans le domaine de la pierre structurale des procédés plus simples sont applicables, qui permettent de produire des éléments de grandes dimensions à partir directement de l'extraction, ou des premières phases de découpe (voir le sous-chapitre II.2.6). Ces éléments peuvent rivaliser, dans le domaine de la construction du logement, avec les produits préfabriqués en béton armé ou en brique. En effets, ces éléments peuvent atteindre des grandes dimensions, proches de celles des panneaux préfabriqués en béton armé. Cette tendance vers des éléments de grande taille peut être observée aussi dans la production des briques en terre cuite qui permettent de réaliser une surface de mur d'un mètre carré avec moins de dix éléments. Des blocs en béton de très grand format ont aussi vu le jour, leurs dimensions peuvent atteindre un mètre de longueur pour cinquante centimètres de hauteur d'assise⁷: l'argument publicitaire principal pour ces produits est la rapidité de mise en oeuvre et la conséquente réduction des coûts.

6. Pour les produits de l'entreprise Piba Marmi, voir: <http://pibamarmi.it>, et pour les éléments de revêtement Hyperwawe de l'entreprise Testi Fratelli, voir: <http://www.hyperwawe.it>, consultés le 30.03.2010.

7. Voir à titre d'exemple, les blocs de l'entreprise française Chaux de Contern à l'adresse internet <http://www.chaux-de-contern.lu/m-fr-175-149-rapidbloc.html>, consultée le 19.04.2010.

2.3. La maçonnerie comme système constructif

Maçonnerie n.f. - machonerie v. 1280; de maçon.

1. Partie des travaux de construction comprenant l'édification du gros oeuvre et certains travaux de revêtement. Grosse maçonnerie (gros ouvrage), comprenant les éléments essentiels du gros oeuvre; petite maçonnerie (ouvrage léger), comprenant la pose des enduits, le carrelage, etc.

Matériaux utilisés en maçonnerie: aggloméré, béton, brique, caillou, ciment, crépi, latte, meulière, moellon, mortier, parpaing, pierre, pisé, plâtre. Entrepreneur de, en maçonnerie. Travaux de maçonnerie.

2. Construction, partie de construction faite d'éléments assemblés et joints. [...] Agencement des éléments d'une maçonnerie: appareil, assise, joint, lit, parement.

(*Le Petit Robert. Dictionnaire de la Langue Française*)

«Une maçonnerie, correctement mise en oeuvre, constitue une solution durable et particulièrement efficace.» [SIA 266/2]

Les roches possèdent, à cause de leur structure cristalline, des caractéristiques mécaniques bien définies et sont des matériaux de construction qui supportent mal les charges de flexion. Leur résistance maximale est atteinte par compression, ce qui signifie que, si l'on utilise un matériau dans la construction en respectant ses caractéristiques, la pierre naturelle doit être mise en oeuvre dans des structures comportant seulement, ou surtout, des efforts de compression. C'est pour cela que la maçonnerie est le système constructif le plus adapté à la pierre naturelle. La présente recherche se limite à l'utilisation de la maçonnerie pour les structures porteuses verticales. Le cas des voûtes et des arcs n'est pas traité⁸.

La maçonnerie est un ensemble d'éléments, les parpaings, disposés selon un certain appareillage, afin de permettre la répartition homogène des forces de compression. Les parpaings peuvent être simplement empilés les uns sur les autres: c'est une maçonnerie de pierres sèches. Le recours à des gros éléments en pierre présciée, présentant des faces parfaitement lisses, permet de mettre en oeuvre des maçonneries de pierre sèche. C'est le cas, par exemple, du chai viticole de Vauvert, de l'architecte français Gilles Perraudin réalisé en 1998 [Casamonti, M., Pavan, V. 2004; Pisani, M. 2002; Pavan, V., éd. 2001]. Une fois la maçonnerie réalisée, il a été nécessaire de remplir les joints afin de garantir l'étanchéité à l'eau et à l'air de la construction. Ceci confirme que le recours à une maçonnerie formée de pierres naturelles et de joints de mortier est, dans le cas de bâtiments habités, la meilleure solution. En plus, le mortier n'assure pas simplement l'étanchéité des joints, mais il permet une meilleure répartition des efforts verticaux de compression entre des surfaces d'assises qui ne sont pas parfaitement parallèles. Cette répartition réduit les risques liés à une transmission ponctuelle des charges: un phénomène qui peut engendrer des ruptures locales des parpaings en pierre naturelle. Un effet semblable peut être produit par le recours à des mortiers trop "durs", c'est-à-dire plus résistants à la compression et moins élastiques que la pierre. Il est important de souligner que le rôle principal du mortier est celui de produire une interface "souple" entre les parpaings et pas celui d'unir les parpaings entre eux.

8. Pour ce sujet, nous renvoyons à des études spécifiques, tels: Grandjean, A. 2010; Laurent, J.-M. 2007; Sakarovitch, J. 1998; Heyman, J. 1996; Hill, P.R., David, J.C.E 1995; Monduit, L. 1980.

2.3.1. La maçonnerie non armée

La maçonnerie en terre cuite, qui est celle qui continue à être utilisée dans la construction courante, a subi, dans les dernières décennies, d'importantes évolutions, visant surtout à améliorer sa résistance aux efforts transversaux et ses possibilités de déformation. Cela résulte de la nécessité d'intégrer des contraintes dynamiques liées surtout aux efforts de séisme. Ces améliorations ont été possibles à travers l'introduction d'armatures verticales et horizontales: les premières à travers les fores des briques et les deuxièmes posées dans les joints de mortier horizontaux. La maçonnerie en terre cuite renforcée est devenue plus résistante et ductile, mais aussi de plus en plus "monolithique", ce qui engendre des problèmes de recyclage ou de réutilisation.

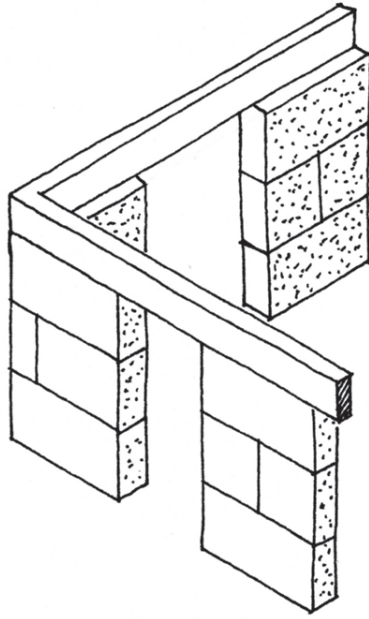
La présente recherche se focalise sur le cas de la maçonnerie en pierre naturelle non armée, d'un côté parce qu'elle constitue le cas le plus défavorable du point de vue dynamique en cas de séisme et, de l'autre, parce qu'elle constitue une forme constructive simple et durable, comme le démontre le patrimoine construit, également pour les possibilités de déconstruction et réemploi qu'elle offre.

2.3.2. Murs et trilithes

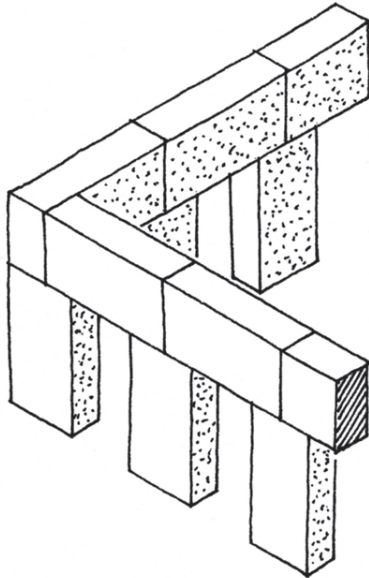
La maçonnerie est donc la forme de structure la plus adaptée à l'usage de la pierre naturelle massive. La maçonnerie étant constituée de parpaings et de joints de mortier, disposés selon un certain appareillage, c'est sur ces trois éléments que la composition de la structure peut être variée. Il est possible de changer les dimensions des parpaings en pierre naturelle et leur nature, mais il a été démontré que, pour améliorer le rendement et rationaliser l'utilisation de la ressource, à un type particulier de roche correspondent des dimensions idéales, dont il serait judicieux de ne pas s'écarter (voir les sous-chapitres II.2.3 et II.2.6). En tout cas, il faut veiller à utiliser des dimensions modulaires pour les parpaings, afin de réduire les découpes en chantier et permettre ainsi d'accroître la vitesse de mise en oeuvre.

L'épaisseur et la nature des joints de mortier est traitée plus loin dans ce chapitre, mais elle aussi ne peut subir que peu de changements, d'une part pour des raisons techniques et, d'autre part, parce qu'afin de réduire les investissements financiers et en temps, il est judicieux de recourir aux seuls joints de pose (les joints de finitions étant souvent, dans le cas d'une utilisation courante, superflus). C'est donc au seul appareillage que se réduit la variation, mais là aussi il est nécessaire d'avoir soin de respecter certaines règles. Premièrement, pour ce qui est des pierres naturelles suisses traitées dans cette recherche et des dimensions proposées pour les parpaings, le type d'appareillage isodome s'impose, et aussi dans sa forme la plus simple, c'est-à-dire celle de l'*opus quadratum*, dans lequel chaque parpaing constitue l'épaisseur entière du mur. En effet, l'utilisation d'un appareillage en boutisses et carreaux ne semble pas se justifier. Deuxièmement, il faut respecter le principe du chaînage d'angle et celui de l'absence des coups de sabre, c'est-à-dire de l'élimination de toute superposition des joints verticaux.

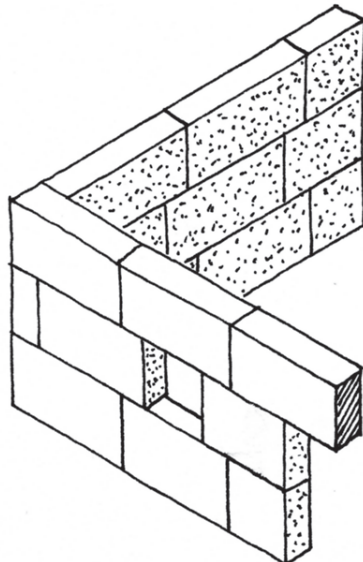
Trois principes de construction sont considérés dans notre recherche pour les maçonneries en pierre naturelle: le premier est celui du mur continu, dans lequel on réalise des ouvertures; le deuxième se compose de trilithes et le dernier est celui d'une série de pans de murs reliés entre eux par un chaînage continu horizontal. Les deux dernières solutions s'approchent d'un mur soi-disant "albertien". En effet, pour Leon Battista Alberti, l'origine même de la colonne est à rechercher dans l'évidement du mur



Pans de mur reliés par un chaînage



Trilithes



Mur continu

qui devient ainsi une séquence ordonnée de pleins et de vides⁹. Cette forme de mur a été utilisée par Karl Friedrich Schinkel et a été définie par Roberto Gargiani comme un "mur ordonnancé"¹⁰ [Fanelli, G., Gargiani, R. 2008:316] et comme aboutissement ultime de la théorie d'Alberti [*ibid*:410]. C'est une forme constructive qui permet de produire un mur avec une structure ordonnée et constante et, en même temps, qui laisse une grande liberté pour l'emplacement des cloisons intérieures qui subdivisent les espaces. Karl Friedrich Schinkel utilisa cette solution pour les façades des ailes latérales de la Schauspielhaus de Berlin (1818-1921) qui contiennent des fonctions diverses: des bureaux ou des salles.

Le choix d'utiliser l'une ou l'autre forme de mur ne doit pas se réduire à un pur choix formel, mais plutôt être déterminé par la fonction de l'élément structurel, la résistance qu'il doit avoir et les efforts auxquels il est soumis, sans oublier le type de pierre utilisé et, en conséquence, ses dimensions.

Pour les murs continus et les trilithes, les éléments caractéristiques sont les linteaux et les appuis des planchers. Ces derniers sont traités dans un sous-chapitre séparé (voir le sous-chapitre III.2.4.8). En ce qui concerne les linteaux, il faut considérer, comme cela a déjà été soulevé à plusieurs reprises, que la pierre naturelle a une résistance à la flexion réduite. Si l'on applique la règle du tracé des linteaux monolithiques proposée par Jean-Marc Laurent [Laurent, J.-M. 2007:45] et qu'on la transforme en une relation mathématique, la hauteur statique minimale d'un linteau est égale à $\sqrt{3}/6$ (= 0,29) fois la largeur de l'ouverture (voir le schéma à l'Annexe A.5). Dans le cas d'éléments de grandes dimensions et d'un rapport modulaire entre les côtés de 4:1:2, la relation $\sqrt{3}/6 \times L$ est toujours respectée, parce que la largeur de l'ouverture est égale à la hauteur de l'élément. Cette règle est respectée aussi pour des rapports modulaires de 6:1:3 et 8:1:4.

Le chaînage des angles est à traiter avec soin surtout lors du recours à un système structurel basé sur une succession de trilithes. Dans ce cas, il semble judicieux de prévoir des angles réalisés avec des éléments appareillés, ou alors de bien vérifier la résistance dans les deux directions des blocs formant l'angle: la solution géométrique adoptée est donc déterminante.

Pour les pans de murs reliés par un chaînage continu, il faut faire attention à la connexion de ce dernier avec la maçonnerie. La liaison se fera soit par frottement entre la surface rugueuse de la pierre naturelle et le béton (cette solution est indiquée surtout pour des chaînages en béton armé coulés sur place) soit à travers des connecteurs métalliques transmettant les charges par cisaillement, dûment dimensionnés (ceci pour des éléments de chaînage en béton armé préfabriqué ou métalliques).

2.4. Conception et réalisation de maçonneries non armées en pierre naturelle massive

Dans les paragraphes qui suivent, la conception et la réalisation de maçonneries non armées en pierre naturelle massive seront traitées pour le cas de constructions courantes. Le cadre géographique de la recherche étant restreint à la Suisse, on se réfère aux prescriptions suisses en matière de construction, c'est-à-dire aux Normes éditées par la *Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes* (SIA). Néanmoins, on veillera à faire ressortir des principes généraux valables aussi dans d'autres contextes. Pour cela des sources provenant d'autres pays ont aussi été consultées.

9. «... puisque aussi bien une rangée de colonnes n'est rien d'autre qu'un mur percé et ouvert en de nombreux endroits» [Alberti, L. B. 2004:82].

10. Dans l'édition italienne, ce type de mur est appelé "muro trabeato" qui, dans sa signification littérale, correspond mieux au cas du trilithe [Fanelli, G., Gargiani, R. 1998:281 et 434].

En suivant l'hypothèse de recherche qui déclare la nécessité d'une adaptation entre type de roche, exploitation et élément constructif, en premier lieu est traité le rapport entre les techniques d'exploitation contemporaines (voir le sous-chapitre II.2.3), les dimensions des blocs et leur mise en oeuvre. Ensuite, la maçonnerie est étudiée selon ses deux composantes: les parpaings en pierre naturelle et le mortier. La mise en oeuvre selon des techniques contemporaines simples est aussi exposée. À la fin seront traités les éléments structurels horizontaux et les ouvertures, du point de vue de leur influence sur la maçonnerie.

2.4.1. Influence des techniques d'exploitation sur les éléments de construction en pierre naturelle

La pose des pierres de construction avec les lits de carrière, qui correspondent aux plans de stratification des roches sédimentaires ou de foliation des roches métamorphiques, perpendiculaires à la direction des efforts principaux a été toujours reconnue comme une garantie pour la durabilité de la construction. Depuis l'Antiquité et jusqu'à nos jours, les spécialistes soutiennent cette façon de faire, mais des exceptions sont possibles.

La durabilité de l'ouvrage étant l'une des priorités de toute construction, on considère la possibilité d'une pose en délit seulement dans le cas des roches cristallines. Pour tout autre type de roche, la pose en lit est impérative. Ceci influence la dimension des éléments et leur emplacement précis dans la maçonnerie.

Les conditions géologiques du gisement influencent fortement la dimension des blocs extraits: les fissures verticales limitent les dimensions des blocs à extraire, et les horizontales définissent la hauteur des bancs de la carrière. Cette hauteur peut être très variable, surtout pour les roches sédimentaires: à titre d'exemple, dans certains gisements de roches calcaires du Jura, elle peut varier de 5 à 100 cm. On nommera cette dimension H_{banc} .

L'extraction de la roche dans la carrière est aujourd'hui fortement mécanisée. Les dimensions des outils utilisés influencent également la dimension des blocs. Dans des gisements présentant des fissures naturelles, on exploite au maximum ces dernières pour l'extraction et elles déterminent la taille des blocs. Par contre, dans le cas de roches compactes, les dimensions dépendent surtout des modes d'exploitation. Chaque technique d'exploitation a des dimensions propres, qu'on essayera de résumer et dont dépend la hauteur d'extraction, que l'on nomme H_{extr} :

- perforation: 4 m (longueur maximale des florets)
- haveuses: horizontale et verticale 3.5 m (longueur de la lame)
- fil diamanté: >10 m (longueur maximale de la boucle de fil)
- flame-jet: 5 m, jusqu'à 20 m dans le granite (efficacité de la cassure thermique)
- water-jet: 3 m (pression de l'eau)

Pour la présente recherche, nous admettons que $H_{\text{extr}} \leq H_{\text{banc}}$ pour les roches cristallines alpines, et que $H_{\text{extr}} \geq H_{\text{banc}}$ pour les autres roches, sauf dans le cas des grès de la Molasse de type arkosique de la Suisse Orientale.

Aux deux contraintes susmentionnées, on peut ajouter, en ce qui concerne la hauteur des blocs extraits, les dimensions idéales du bloc marchand. Ces dernières dépendent directement de l'utilisation finale de la pierre et de la taille des machines utilisées dans le façonnage. Il est clair que ces dimensions varient d'un pays à l'autre, mais pour ce qui est des blocs destinés à la production de plaques minces, leurs valeurs sont assez homogènes. Elles sont normalement de l'ordre des 150x150x300 cm (6.75m³). La hauteur maximale, déterminée par les outils de découpe, pourrait donc contraindre la hauteur du bloc dans le cas de gisements de roches compactes ou de bancs de forte épaisseur. C'est le cas, en Suisse, des blocs extraits dans les carrières de gneiss au Sud des Alpes ou dans certains gisements de grès de la Molasse de type arkosique de la Suisse Orientale.

On peut donc définir les trois dimensions du bloc comme $L \times P \times H_{\text{banc}}$ ou H_{extr} (ou L est la largeur et P la profondeur).

La valeur de P dépend du type de mise en oeuvre choisie, c'est-à-dire soit une forte épaisseur pour satisfaire les exigences thermiques, soit une épaisseur réduite dans le cas de roches possédant une résistance à la compression élevée, et qui assurent la seule fonction porteuse.

Nous pouvons déjà énoncer deux principes simples:

- La hauteur du bloc est contrainte soit par la nature géologique du gisement (H_{banc}) soit par la dimension des outils utilisés dans l'exploitation (H_{extr}).
- Les dimensions L et P du bloc dépendent de l'utilisation du bloc. Leur variation est simple à réaliser, mais il faut tenir compte des possibles fractures verticales et d'une réduction des chutes.

Le poids de l'élément dépend de son volume et donc de ses dimensions. Dans le cas de la pierre naturelle, vu son poids spécifique élevé, le mode de mise en oeuvre peut influencer la dimension des blocs. C'était le cas, par exemple, de la construction des deux maisons à Majorque de l'architecte danois Jørn Utzon [Pardey, J. 2004:58-59]. Des blocs de pierre de dimensions standards (80x10x40; 80x20x40 et 40x20x40 cm pour un poids maximal de quatre-vingt kg) furent utilisés parce que les ouvriers locaux les mettaient en oeuvre sans recours à des engins de levage. Jørn Utzon privilégia cette technique traditionnelle et décida donc d'utiliser pour l'appareillage les formats locaux. Des cas similaires pourraient être rencontrés lors de la construction dans des lieux difficiles d'accès ou en absence d'engins mécaniques: dans ces situations, la contrainte du poids est prépondérante.

La modularité des rapports entre les dimensions est une nécessité pour des éléments constructifs standardisés. Selon ce qui a été énoncé plus haut, on admet la hauteur comme valeur fixe.

Si la seule pose en lit est admise, il est impossible de changer la position d'un élément vertical avec celle d'un élément horizontal. Ceci pose un problème lors de la conception: la quantité exacte des éléments et leur position doit être déterminée de manière précise. Il faut donc préparer des plans de calepinage précis qui doivent servir aussi à la commande des pièces. Une standardisation des éléments assure une réduction du nombre d'éléments différents à l'intérieur de l'appareillage: cela ne réduit pas seulement les coûts, mais aussi le temps de réalisation et le danger de fautes de construction.

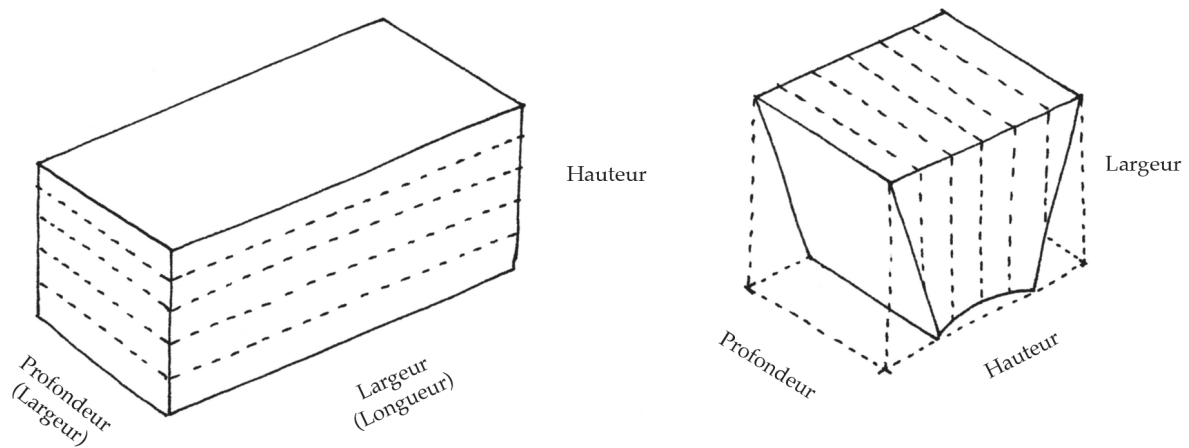


Fig. III.7. Dimensions des éléments en pierre naturelle et leur notation

Nous résumons ici les observations faites afin d'énoncer quelques règles, selon le type de roche, permettant de définir les dimensions des éléments de maçonnerie:

- Grès
 - Les éléments sont toujours posés selon leur lit (stratification).
 - La hauteur est dépendante de la hauteur des bancs ou, parfois, de la capacité des outils d'extraction.
 - La profondeur de l'élément dépend, dans la majorité des cas, de la thermique et, pour les grès les plus résistants, par la résistance à la compression.
 - La largeur dépend de la modularité.
- Calcaires
 - Les éléments sont toujours posés selon leur lit, sauf pour les types les plus résistants.
 - La hauteur est dépendante de la stratification, donc de H_{banc} .
 - Leur résistance à la compression permet de réaliser des parois porteuses d'épaisseur réduite.
 - La largeur du bloc est déterminée par la modularité.
- Gneiss
 - La pose en délit est possible.
 - En général, la hauteur des bancs correspond à celle d'extraction ou alors elle est contrainte par les outils d'extraction.
 - Vu la grande résistance à la compression, la profondeur de l'élément peut être réduite.
 - La largeur est en accord avec la modularité.
- Granites
 - La pose en délit est possible.
 - La hauteur dépend surtout de la technique d'exploitation.
 - Vu la grande résistance à la compression, la profondeur de l'élément peut être réduite.
 - La largeur est en accord avec la modularité.

En règle générale, pour exprimer les dimensions des éléments en pierre naturelle, on suivra le principe utilisé par les carriers, c'est-à-dire qu'on donnera la Largeur de l'élément x la Profondeur x la Hauteur, exprimées en centimètres [Fig. III.7].

La hauteur est toujours le dernier terme, parce que cela indique la dimension perpendiculaire au lit de la pierre. Cette règle a été développée par les carriers de gisements de roches tendres.

2.4.2. *Le cadre normatif suisse: les normes SIA pour la construction en maçonnerie*

Les normes de construction suisses, Normes SIA, qui doivent être considérées lors de la conception et la réalisation d'une structure en pierre naturelle sont: la Norme SIA 266:2003 *Construction en maçonnerie* (par la suite SIA 266:2003), la Norme SIA 266/1:2003 *Construction en maçonnerie – Spécifications complémentaires*, la Recommandation SIA V178:1996 *Maçonnerie de pierre* (par la suite SIA V178). Les principes sont fixés par les Normes, et la Recommandation règle les particularités de la maçonnerie en pierre naturelle. La Norme SIA 266/2 *Maçonnerie en pierre naturelle* n'est pas encore entrée en vigueur actuellement¹¹, mais sa version de projet au 2008 a été consultée et considérée dans le cadre de notre recherche. Dans sa forme actuelle la norme SIA 266/2 se calque dans plusieurs parties sur la SIA 266:2003. Dans les avant-propos de cette norme, on trouve une affirmation importante: «La présente norme se limite à la mise en oeuvre d'ouvrages nouveaux en maçonnerie de pierre naturelle» [SIA 266/2 2008:4], ce qui est une différence radicale par rapport à l'ancienne Recommandation SIA V178:1996, qui traitait surtout des problèmes de maintenance des constructions existantes. Ce changement de cible n'a pas empêché le maintien d'un élément très singulier, c'est-à-dire le diagramme permettant d'estimer la résistance à la compression d'une maçonnerie en pierre naturelle en partant de la résistance à compression de la roche et du mode d'appareillage. Ce diagramme permet autant d'évaluer la résistance des maçonneries existantes que d'en concevoir des nouvelles¹².

Nous résumons les principes contenus dans les Normes et dans la Recommandation afin de constituer un cadre unitaire pour la construction en maçonnerie de pierre massive.

2.4.3. *Les éléments et leur appareillage*

Selon la SIA V178: «La maçonnerie de pierre est un ouvrage de pierres généralement hourdées au mortier, éventuellement combinées avec du béton, et se comportant comme un tout. Selon la mise en oeuvre, on distingue: la maçonnerie de pierre massive et la maçonnerie mixte (mur en béton avec parement de pierre)» [SIA V178 1996:1.11].

Les maçonneries se distinguent en quatre types: le mur massif, à un ou deux parements; le parement; le placage; le mur de pierres sèches (maçonnerie massive non hourdée). Le parement est un mur autoporteur, d'épaisseur variable entre 4 et 10 cm, qui ne fait pas partie de la structure porteuse. Le placage est un revêtement en pierre naturelle suspendu à la structure porteuse (dans la Norme 266/2, ce type de construction n'est plus considéré).

Les différents types d'appareillage sont définis, par la SIA V178, selon le format des pierres et le type de joint.

11. Mois d'août 2010.

12. Les réflexions qui suivent sont le fruit d'entretiens directs avec le Prof. Eugen Brühwiler, directeur du Laboratoire de maintenance, construction et sécurité des ouvrages (MCS), Institut d'Ingénierie Civile, Faculté ENAC, EPFL, qui a contribué au développement de ce diagramme dans le cadre de la commission SIA.

Si l'on se réfère à la Recommandation V178, les éléments concernés par la présente recherche sont, dans la plupart des cas, des blocs, parce que leur poids dépasse les 300 à 500 kg. En tout cas, pour une application structurelle en accord avec les techniques d'exploitation contemporaines, les types de maçonneries à considérer seront le G4 (moellons équarris); G5 (pierre de taille) et G6 (blocs épannelés) (Fig. III.8).

Forme des pierres en parement		Joints	Pierres brutes B	Pierres façonnées G
Pierres de formes irrégulières (appareil cyclopéen)			B1 Maçonnerie cyclopéenne, en moellons bruts	G1 Maçonnerie cyclopéenne, en moellons épannelés
Pierres litées (soit naturellement, soit par façonnage) assises ± parallèles	Hauteur variable des assises, joints d'assise interrompus		B2 Maçonnerie à assises irrégulières, en moellons bruts, appareil écossais ¹⁾	G2 Maçonnerie à assises irrégulières, en moellons équarris, appareil écossais
	Hauteur variable des assises, joints d'assise continus		B3 Maçonnerie à assises irrégulières continues, en moellons bruts	G3 Maçonnerie à assises irrégulières continues, en moellons équarris
	Hauteur constante des assises, joints d'assise continus		B4 –	G4 Maçonnerie à assises régulières, en moellons équarris
	Pierre de taille (toutes faces façonnées), joints continus ou interrompus		B5 –	G5 Maçonnerie de pierre de taille
Blocs	> 300...500 kg, formes diverses		B6 Maçonnerie de blocs bruts	G6 Maçonnerie de blocs épannelés

¹⁾ L'appareil "romain" ressemble à l'appareil "écossais": ses assises sont décalées tous les 1 à 3 moellons

Fig. III.8. Types d'appareillages selon SIA V178 [SIA V178 1996]

La norme SIA 266:2003 fixe les exigences minimales pour les maçonneries¹³:

- $f_{xk} \geq 1,8 \text{ N/mm}^2$
- $E_{xk} \geq 1,8 \text{ kN/mm}^2$ (pour la pierre $E_x = 1000 f_x$, selon SIA V178)

Il faut, pour toute maçonnerie, indiquer les valeurs suivantes, justifiées par des essais:

- f_{fxk} résistance à la traction par flexion perpendiculaire à l'assise
- E_{xk} module d'élasticité de la maçonnerie sollicitée perpendiculairement à l'assise
- f_{xk} résistance à la compression perpendiculaire à l'assise
- f_{yk} résistance à la compression perpendiculaire aux joints verticaux

Pour les pierres constituant la maçonnerie, la résistance à la compression perpendiculaire à l'assise f_x devra être supérieure à 10 N/mm^2 [SIA V178 1996:3.2]. Des valeurs inférieures à 20 N/mm^2 seront en tout cas vérifiées par des essais et ces mêmes valeurs devront être garanties en oeuvre par des mesures adéquates [SIA V178 1996:4.12]¹⁴. Selon la SIA 266:2003, la résistance à la traction sera supérieure à $1,8 \text{ N/mm}^2$ (7 N/mm^2 pour les parpaings des maçonneries standards dans lesquels la pierre naturelle ne figure pas). La mise en oeuvre des pierres naturelles répondra aux règles de l'art, surtout

13. Dans la notation utilisée par les Normes SIA, les lettres latines comportent des indices pour indiquer le type d'effort considéré. Dans le cas des maçonneries, l'indice X est utilisé pour les efforts de compression, donc f_x indique la résistance à la compression du parpaings, par contre, f_{xk} indique la résistance à la compression perpendiculaire à l'assise de la maçonnerie (indice K).

14. La norme allemande DIN 1053-1 préconise d'utiliser seulement des roches qui possèdent une résistance supérieure à 20 N/mm^2 [Schneider, K.-J., Schubert, P., Wormuth, R. 1999:222].

en ce qui concerne la pose en lit, qui est obligatoire pour les roches tendres tels les calcaires et les grès. Les pierres seront choisies selon leur durabilité et leur résistance aux intempéries. Dans la nouvelle Norme SIA 266/2, un facteur qui caractérise le degré d'exposition aux intempéries devrait être introduit afin de pouvoir évaluer autant la résistance de la maçonnerie que sa durabilité.

Dans les maçonneries appareillées selon des assises régulières, on admettra la distribution des charges concentrées selon un angle d'environ 33° (rapport de 2 sur 3) [SIA V178 1996:3.3.1.4].

Les maçonneries non armées doivent être stabilisées transversalement à leur plan, par des murs de refend ou par des dalles.

Pour les calculs de vérification de la sécurité structurale la SIA V178 prévoit des formules simplifiées. On mentionne également les formules prévues par la SIA 266:2003.

La résistance à la compression de la maçonnerie perpendiculairement à l'assise, f_{xk} , est estimée par le biais du diagramme qui met en relation la résistance à la compression de la pierre et le type d'appareillage [SIA V178 1996].

La valeur de f_{xd} est calculée selon la formule $f_{xd} = \eta_1 \eta_2 f_{xk} / \gamma_M$ [SIA 266 2003:4.2.1.1].

La résistance à la compression de la maçonnerie perpendiculairement aux joints verticaux, f_{yk} , est calculée selon la relation suivante: $f_y = 0.5 f_x$, pour les murs en maçonnerie appareillés selon des assises régulières [SIA V178 1996].

La valeur de f_{yd} est calculée selon la formule $f_{yd} = \eta_1 \eta_3 f_{yk} / \gamma_M$ [SIA 266 2003:4.2.1.2].

Le module d'élasticité de la maçonnerie, E_x , est calculé, en première approximation, par le rapport: $E_x = 1000 f_x$ ou grâce à la relation: $E_x = E_b \times (\text{volume \% de pierre}) + E_m \times (\text{volume \% de mortier})$ [SIA V178 1996:3.2.3.2].

La valeur de E_{xd} est calculée selon la formule $E_{xd} = E_x / \gamma_M$ [SIA 266 2003:4.2.1.5]

Les conditions à respecter pour la contrainte séisme sont relatives aux épaisseurs des murs et des piliers qui devront être supérieures à 150 mm et dont la hauteur, mesurée entre les dalles, sera inférieure à 17 fois l'épaisseur [SIA 266 2003:4.7].

2.4.4. Mortiers et joints

Les exigences pour les mortiers sont fixées par la SIA 266:2003 et comportent une résistance à la compression minimale de 5 N/mm² (dans le cas des maçonneries standards d'au moins 15 N/mm²). Pour les mortiers il est indispensable que leur module d'élasticité soit inférieur à celui de la pierre utilisée, cela afin de permettre une redistribution des charges par le mortier et non par la pierre, donc: $E_b > E_m$ [SIA V178 1996:3.2]. Le rapport entre les modules d'élasticité sera compris entre 1 et 5 [SIA V178 1996:4.2]. Le diamètre maximal des granulats sera toujours compris entre un demi et un tiers de l'épaisseur du joint. On veillera à utiliser des mortiers dont la composition est en accord avec celle de la pierre, ceci afin de réduire les efflorescences dues aux sels alcalins, les salissures et les dommages. Les mortiers les plus adaptés sont ceux à base de chaux, aérienne ou hydraulique, et les mortiers bâtards (mélange de ciment et chaux hydraulique). Les mortiers au ciment, même s'ils sont toujours présents dans les normes, ne devraient pas en règle générale être utilisés, d'une part en raison de leur rigidité, et, d'autre part, à cause des dangers liés à la cristallisation des sels alcalins, surtout

dans les zones exposées à l'eau, et à cause de leur étanchéité élevée.

En ce qui concerne les aspects techniques et pratiques de l'utilisation des mortiers à base de chaux, il faut se référer aux différents ouvrages spécialisés, par exemple, l'excellent "Techniques et pratiques de la chaux" publié par l'Ecole d'Avignon [Ecole d'Avignon, éd. 2003].

Les joints verticaux et ceux d'assise seront toujours remplis. Si une épaisseur du joint inférieure à 1 cm est choisie, la résistance du mortier n'est pas à considérer, si cette épaisseur est plus grande, il faut tenir compte du fait que la maçonnerie sera d'autant moins résistante que l'épaisseur du joint sera plus élevée [V178 1996:11 et SIA 266/2 2008:17].

2.4.5. Utilisation du diagramme de la Recommandation SIA V178 pour la conception de nouvelles maçonneries en pierre naturelle

Après avoir traité des différents éléments formant la maçonnerie, pour la concevoir en tant que structure, les normes suisses prévoient un outil particulier, qui a déjà été mentionné plus haut: un diagramme mettant en relation les caractéristiques de la roche, la mise en oeuvre de la maçonnerie et la résistance à la compression de cette dernière. Pour l'utilisation de cet outil, une fois choisi le type de roche, il est nécessaire de déterminer le type d'appareillage ainsi qu'une série de facteurs qui influencent la résistance finale. Dans le cas d'une construction basée sur le principe d'une forte préfabrication des éléments en pierre naturelle, le type d'appareillage sera celui constitué de pierres de taille (type G5 selon SIA V178 1996) ou, éventuellement, de moellons équarris (type G4 selon SIA V178 1996). Ces types sont ceux qui présentent les meilleures performances techniques. Pour les facteurs influençant la résistance à la compression de la maçonnerie, on essayera toujours de concevoir des modes de mise en oeuvre ayant un effet positif sur la résistance, c'est-à-dire: forme rectangulaire des éléments; grandes dimensions; rugosité de la face d'assise; joints d'assise minces; section aplatie des éléments; liaisons transversales efficaces (joints pleins); mortier présentant une bonne résistance. Il est nécessaire en tout cas de considérer avec prudence les données concernant la résistance à la compression de la roche, valeur f_x , fournies par les producteurs parce qu'une certification n'est pas encore obligatoire en Suisse, et la dimension des éprouvettes utilisées pour les essais peut influencer les données obtenues. En effet, des petits cubes de pierre présentent généralement des valeurs de résistance à compression plus élevées que des éléments de grande taille. Il faut toujours utiliser, si elles existent, des données concernant la résistance à la compression de gros échantillons ou d'échantillons de maçonnerie. La résistance à la compression de la maçonnerie est dans tous les cas inférieure à celle de la pierre naturelle utilisée, à cause de la présence du mortier, et parce que, ce dernier, sous l'effet des charges horizontales est écrasé et a tendance à être repoussé horizontalement. Ceci engendre, à la longue, des efforts de traction dans la roche qui, une fois dépassée la résistance à la traction de la pierre naturelle, produisent des fissures et la cassure du parpaing. C'est aussi pour cela qu'il est nécessaire de recourir à des mortiers moins résistants à la compression que la pierre naturelle.

Le résultat obtenu pour la résistance à la compression de la maçonnerie à l'aide du diagramme permet une première évaluation de la résistance statique de l'ouvrage et peut fournir des renseignements au niveau du choix de la mise en oeuvre la plus appropriée.

Pour les roches présentant une résistance à compression réduite, inférieure à 40-60 N/mm², des éléments de grand épaisseur représenteront le choix le plus judicieux. Dans ce cas de figure, l'épaisseur finale sera dictée par les exigences thermiques, qui est pratiquement toujours supérieure à celle statique.

Les roches compactes qui possèdent des valeurs élevées de résistance à la compression, donc supérieures à 60 N/mm², peuvent être mise en oeuvre avec des épaisseurs réduites, garantissant la seule fonction porteuse de la structure. L'épaisseur finale dépendra surtout des contraintes dynamiques imposées par le comportement en cas de séisme: la valeur minimale étant celle contenue dans la Norme SIA 266 de 150 mm [SIA 266 2003:4.7]. Le rapport entre la hauteur des murs et leur épaisseur doit satisfaire la relation $h_w \leq 17t_w$ (t_w étant l'épaisseur de l'élément porteur). À titre d'exemple, si l'on compare ces valeurs avec celles contenues dans les normes italiennes pour la construction en maçonnerie, on s'aperçoit que les normes suisses sont moins restrictives. En effet, l'épaisseur minimale des maçonneries en pierre de taille, qui sont le seul type de maçonnerie de pierre naturelle utilisable dans des zones sismiques selon les normes italiennes, est de 240 mm et la relation entre la hauteur libre et l'épaisseur doit être toujours inférieure à 12 [Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006:32; Iacobelli, F. 2006]. Ces valeurs sont celles appliquées pour les zones sismiques italiennes 3 et 4 qui présentent des valeurs d'accélération horizontale du sol qui contiennent les valeurs des quatre zones suisses.

Une épaisseur minimale de 240 mm pour les maçonneries porteuses en pierre naturelle est envisagée aussi par les normes allemandes [Schneider, K.-J., Schubert, P., Wormuth, R. 1999:222].

La figure III.9 montre deux exemples d'application du diagramme.

1. Grès de la Molasse de Berne, résistance à la compression de la roche entre 32 et 50 N/mm²: résistance à la compression d'une maçonnerie en pierre de taille d'environ 15 N/mm².

2. Gneiss type "Iragna", résistance à la compression de la roche de 180 N/mm²: résistance à la compression d'une maçonnerie en pierre de taille supérieure à 40 N/mm².

2.4.6. Calepinage, transport et entreposage des blocs des maçonneries

Le calepinage consiste à établir un dessin, en plan, coupe et élévation, des différents éléments en pierre naturelle formant la maçonnerie et de leur emplacement à l'intérieur de cette dernière. Il n'est pas simplement nécessaire pour la taille des éléments, mais il est indispensable lors de la pose. Chaque pièce est donc numérotée et son numéro est reporté sur le dessin, ou calepin. Il constitue la base pour établir les appels d'offres et contrôler les fournitures. De plus, il permet d'organiser le transport et l'entreposage selon l'ordre de pose des éléments et ainsi d'augmenter la vitesse de mise en oeuvre tout en réduisant les risques d'erreurs.

Si les blocs de pierre de taille sont de dimensions constantes et modulaires, le calepin sera facilement établi et il faudra surtout veiller à l'emplacement des éventuelles pièces spéciales. Si les blocs sont, à cause des moyens d'exploitation et de façonnage employés, de dimensions variables, un calepinage correct de la maçonnerie devra permettre de regrouper, selon les assises, des éléments de hauteur semblable afin de réduire les différences dans les épaisseurs des joints de mortier. Pour ce faire, il faut impérativement que le tailleur de pierre et l'architecte travaillent de manière coordonnée.

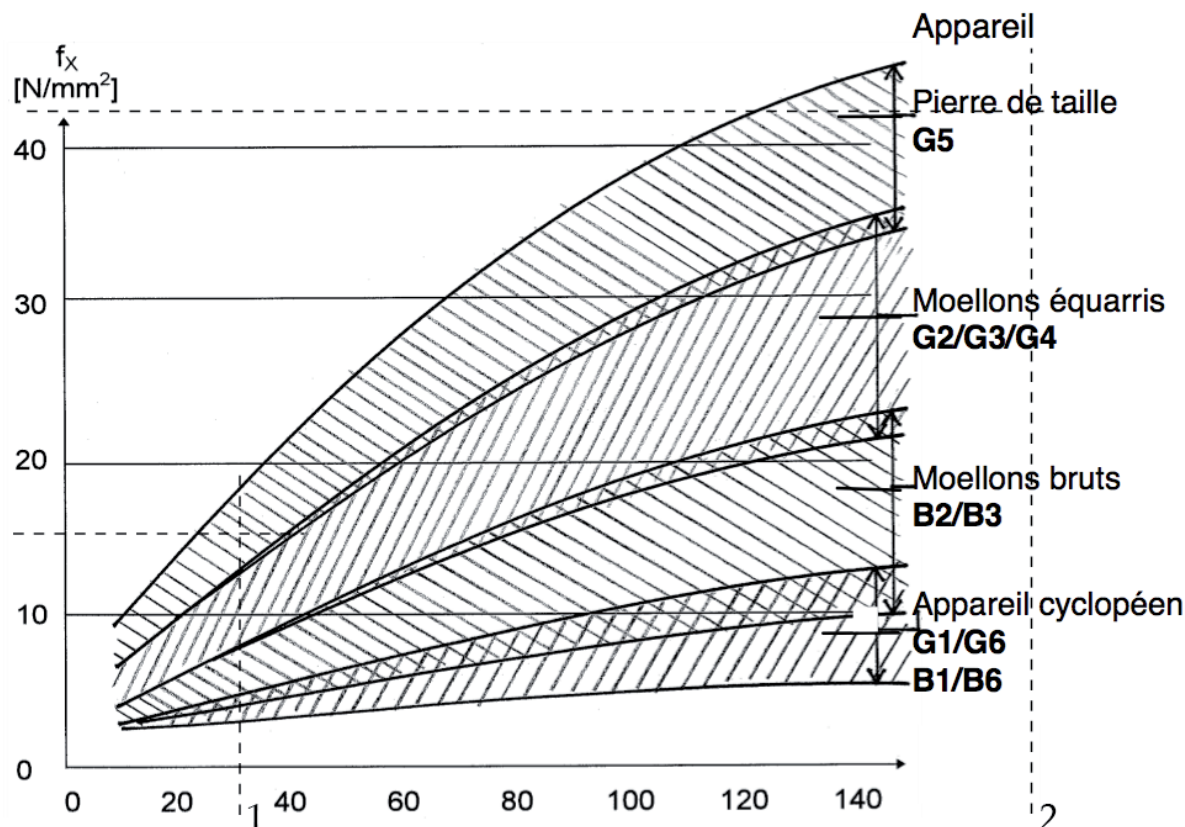


Fig. III.9. Diagramme SIA V178 pour déterminer la résistance à la compression des maçonneries en pierre naturelle de taille [SIA V178 1996]

Les blocs de pierre naturelle de taille découpés en carrière doivent être transportés et entreposés sur le chantier de la future construction. Pour le transport on fait recours, en général, à des camions de 20 tonnes. Le transport par le chemin de fer peut être envisagé si la distance entre la carrière et le chantier est élevée ou si le chantier et la carrière sont proches des voies ferrées.

Les blocs sont soit posés sur des carrelets en bois, suffisamment durs pour résister à l'écrasement dû au poids de la pierre naturelle, soit chargés sur des palettes, si leurs dimensions sont réduites.

L'entreposage se fait en chantier dans un lieu approprié, en veillant à protéger les blocs des intempéries et des éventuels chocs. Pour les roches particulièrement sensibles, il faut réduire au strict minimum le temps d'attente avant la mise en oeuvre.

Une bonne habitude est celle de ne pas retourner les pièces lors du transport et de l'entreposage, c'est-à-dire que les blocs devraient rester dans la position selon laquelle ils seront mis en oeuvre dans la maçonnerie. Ceci est important si la pierre naturelle présente un lit, et que ce dernier doit être respecté lors de la pose pour en garantir la durabilité.

2.4.7. Mise en oeuvre des maçonneries

Dans la mise en oeuvre, on veillera à réaliser des joints de dilatation dans les murs continus tous les six à huit mètres de longueur, cela parce qu'en moyenne les pierres montrent une variation de longueur d'environ 1 mm/m [SIA V178 1996:5.6.1]. Cette exigence n'est pas à remplir lors de la réalisation de murs en blocs hourdés [SIA 266/2 2008:36].

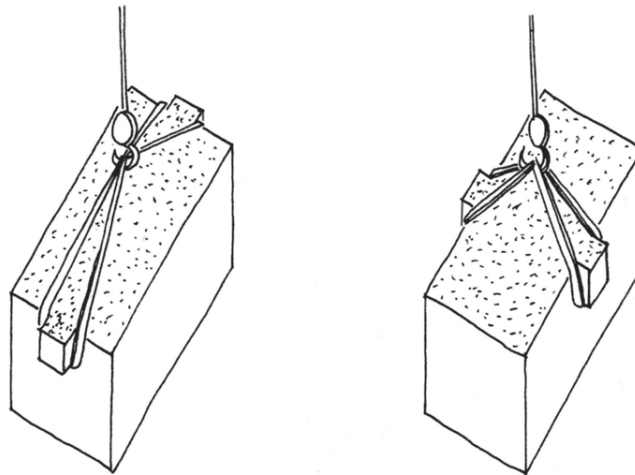
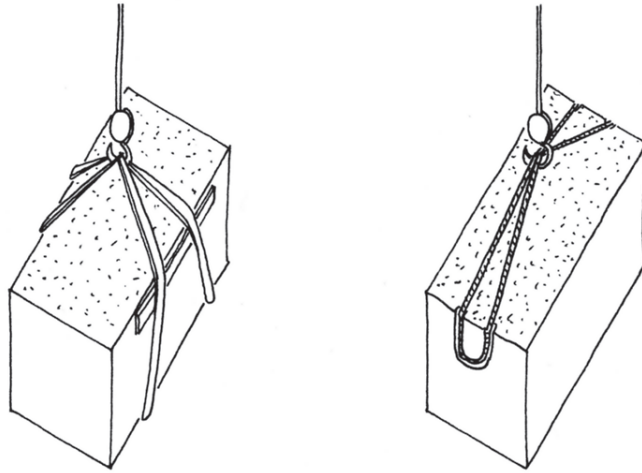
Les angles seront traités avec soin et on réalisera une chaîne d'angle [SIA V178 1996:5.6.3].

Pour la mise en oeuvre des blocs de pierre, si l'on fait recours pour la pose à des cales (en bois ou en plastique) ou à des coins (en bois), ils seront retirés après la prise du mortier.

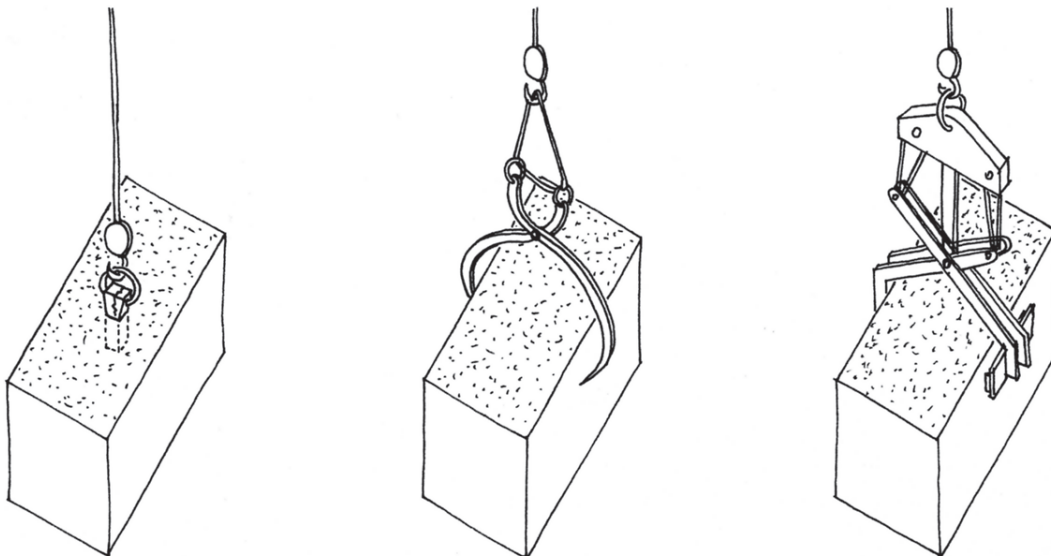
La mise en place des éléments en pierre naturelle massive se fait toujours mécaniquement, si ces derniers sont des blocs. Seulement dans le cas de maçonneries de pierre de taille de dimensions réduites, dont le poids des parpaings n'excède pas les 60 kg, il est possible de concevoir une mise en place manuelle. Pour le levage des blocs existent différents types d'outils qui permettent la connexion de l'élément à l'engin de levage [Planche VII]. Les plus simples sont les cordes, les sangles et les chaînes, qui, selon le type de mise en oeuvre, peuvent aisément suffire. Historiquement, pour permettre la mise en place sans le risque d'écraser les cordes et les élingues, des entailles ou des tenons étaient pratiqués dans les blocs pour le levage. Les tenons nécessitent souvent de retailler ces éléments après la mise en oeuvre; les entailles peuvent, par contre, être intégrées ou remplies avec du mortier. Les louves, de différentes formes et tailles, utilisées depuis l'époque romaine, permettent de concentrer en un seul point, au centre de la face supérieure de la pierre, la connexion. Ceci est un avantage lorsqu'une mise en place côte à côte des blocs s'avère nécessaire. Les pinces articulées permettent de soulever les blocs sans y pratiquer aucun type d'entaille, mais leur efficacité dépend de la forme et de la rugosité des faces de l'élément (des éléments qui présentent des décrochements facilitent la prise). Une évolution contemporaine de ce mode de levage est la pince mécanique, qui se serre autour de l'élément et se desserre une fois la mise en place faite. Les avantages principaux sont le fait qu'une seule personne peut utiliser cet outil, et que la précision de pose est élevée. Il faut, par contre, considérer l'encombrement latéral de la pince qui peut rendre difficiles, voir impossibles, certaines positions de mise en place des blocs (par exemple, la position côte à côte pour laquelle la louve s'avère encore le meilleur choix). Une matière souple permet d'améliorer la prise des pinces, mais il faut toujours veiller à ce qu'elle ne laisse pas de traces sur les blocs.

Les engins de levage contemporains sont aussi très nombreux et sont toujours à adapter au type de construction. En général, les grues automotrices présentent désormais des capacités de levage élevées, couplées à la possibilité de se déplacer à proximité de la zone de mise en oeuvre. Ces grues existent en différentes tailles qui permettent une adaptation entre la taille de l'ouvrage, les possibilités de manoeuvre et la taille des éléments à soulever. Pour des blocs de grandes dimensions, ceci constitue un avantage parce qu'il est ainsi possible de réduire la longueur du câble de levage. En effet, vu le poids élevé des éléments, les câbles se rallongent et, à cause de leur "élasticité", rendent moins précise la mise en place. Ce problème est à considérer aussi dans le cas de l'utilisation de grues à tour soit à mât fixe soit à mât tournant. Pour ces types, il faut aussi faire attention à la capacité de soulèvement, qui est souvent réduite à partir d'une certaine distance, à cause des contrepoids. Pour des ouvrages de petites dimensions, les grues hydrauliques des camions ou encore des élévateurs à fourche avec crochet de soulèvement et bras télescopique peuvent être employées avec succès. Cette technique à été employée récemment par l'architecte français Gilles Perraudin dans les chantiers du chai Viticole de Solan, à la Bastide d'Engras dans le Gard (2003-2007), et d'une maison et galerie d'art à la Croix Rousse à Lyon (2006-2009)¹⁵.

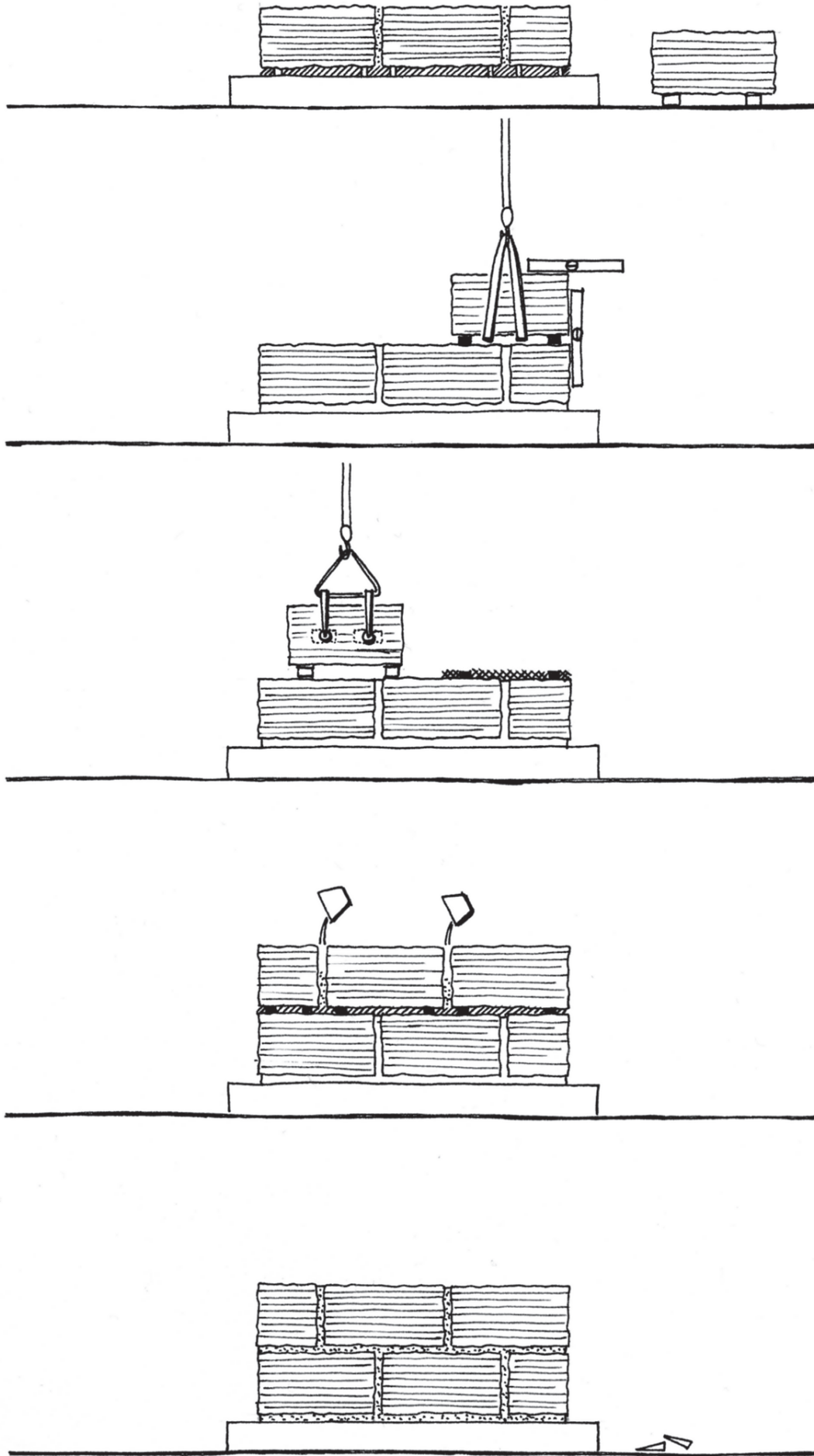
15. Voir à ce propos deux films présentant la mise en oeuvre dans le site internet de l'agence Perraudinarchitectes de Lyon: http://perraudinarchitectes.com/projets/chai_solan/chai_solan.htm et http://perraudinarchitectes.com/projets/maison_crimee/crimee.html, consultés le 26.08.2010.



Cordes et sangles



Louve, pince et pince mécanique





Levage du bloc en pierre naturelle de taille



Vérification du niveau horizontal



Vérification de l'aplomb du mur et du bloc



Mortier de pose



Mise en place définitive du bloc



Coulage des joints verticaux avec un mortier fin

2.4.8. Les éléments structurels horizontaux: les planchers

Les structures horizontales à utiliser pour des maçonneries en pierre naturelle massive doivent présenter une rigidité dans leur plan suffisante pour distribuer de manière uniforme les éventuels efforts horizontaux, produits par le vent ou par les forces de séisme, à l'ensemble de la structure porteuse verticale. Elles sont donc, de préférence, des dalles en béton armé, des planchers à hourdis (avec poutres en béton armé préfabriqué ou métalliques), ou des planchers à ossature métallique ou en bois (aussi sous forme de dalles en bois massif ou en caissons). En ce qui concerne les planchers en bois, il est nécessaire de soigner l'appui afin d'éviter tout risque d'écrasement produit par le poids de la maçonnerie. C'est donc surtout le détail de l'appui qui est traité afin de définir quelques principes propres à chaque famille de planchers selon le type de connexion avec la maçonnerie.

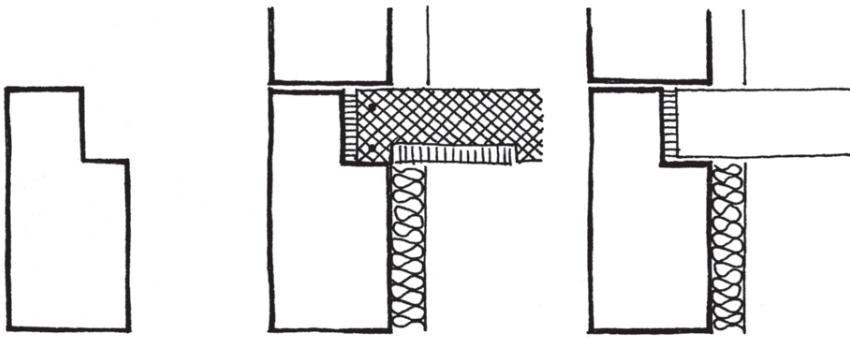
La nature de l'appui est aussi fonction de l'épaisseur de la maçonnerie en pierre naturelle, ceci parce que, selon les normes SIA, l'encastrement entre les dalles et les murs porteurs sera complet, si l'épaisseur des murs est inférieure à 150 mm, et il sera en tout cas supérieur à 120 mm, si l'épaisseur du mur dépasse les 150 mm [SIA 266 2003:5.1.3.4]. Cette valeur de 120 mm est aussi contenue dans les normes italiennes pour la construction en maçonnerie [Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006:42-43; Iacobelli, F. 2006].

Quatre familles d'appuis ont été déterminées selon le rapport avec la maçonnerie en pierre naturelle [Planche X]. Le premier type d'appui est constitué par une entaille linéaire produite dans le bloc de pierre; le deuxième, qui se rapproche du premier, est produit par une assise de hauteur différente dans l'appareillage du mur; le troisième est réalisé à l'aide d'un chaînage continu et le quatrième par une sablière, en bois ou en profilé métallique industriel, sur laquelle est posé le plancher. Pour les appuis du premier type, il serait nécessaire d'en réduire la profondeur dans le cas des planchers en bois afin d'éviter l'écrasement, et le quatrième type est, par contre, restreint aux seuls planchers à ossature. Le choix de la bonne solution constructive dépend aussi de l'épaisseur de la maçonnerie en pierre naturelle: certaines solutions nécessitent une épaisseur suffisante pour réaliser l'appui proprement dit, ainsi que l'éventuelle coupure du pont thermique. Le chaînage continu et l'appui par le biais de sablières sont réalisables pour toute épaisseur de la maçonnerie. Du point de vue de la réalisation, l'appui produit par entaille dans la pierre nécessite le recours à des fraises à disque diamanté et à une solution soignée pour les rencontres dans les angles.

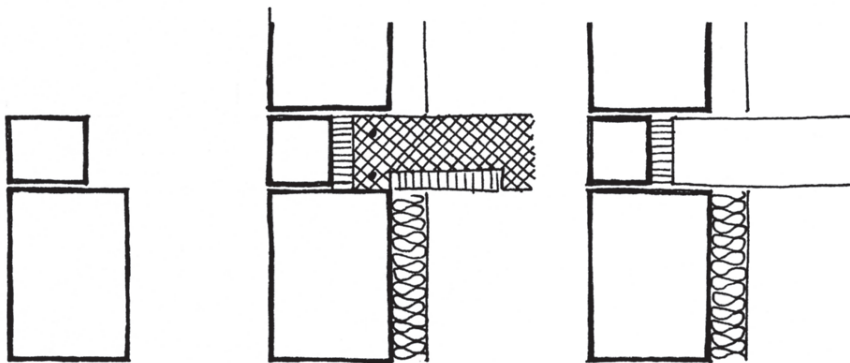
2.4.9. Les ouvertures

L'ouverture, dans une maçonnerie, renvoie toujours au problème du soutien des éléments qui sont superposés, afin d'éviter la fragmentation du système en petits pans de mur. En effet, une partie importante de la résistance statique et dynamique de la maçonnerie est assurée par l'homogénéité et continuité du système formé par les parpaings et le mortier.

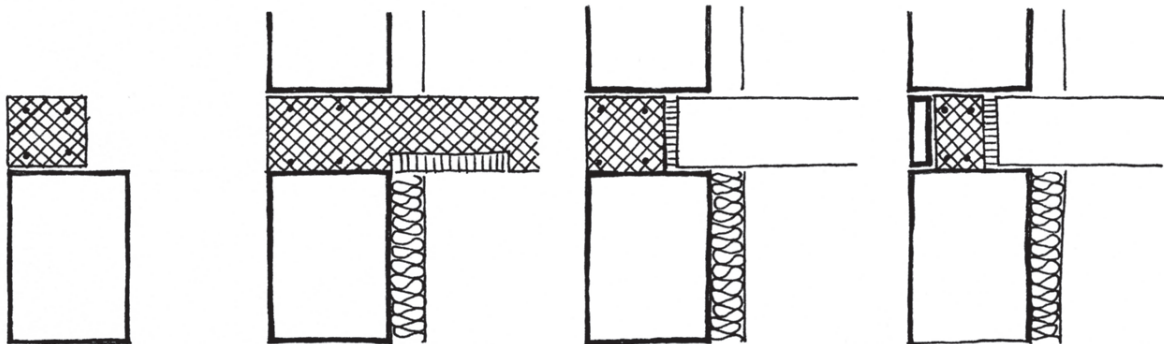
Dans un système entièrement construit en pierre naturelle, la taille de l'ouverture est liée à la dimension maximale des éléments à disposition: les linteaux monolithiques. L'introduction de la plate-bande, linteau composé de claveaux et d'une clé, de forme plate, permet de franchir des portées plus importantes, mais produit des poussées horizontales qui doivent être reprises. Cette forme stéréotomique simple a été largement utilisée dans le passé et aussi dans les architectures de Fernand



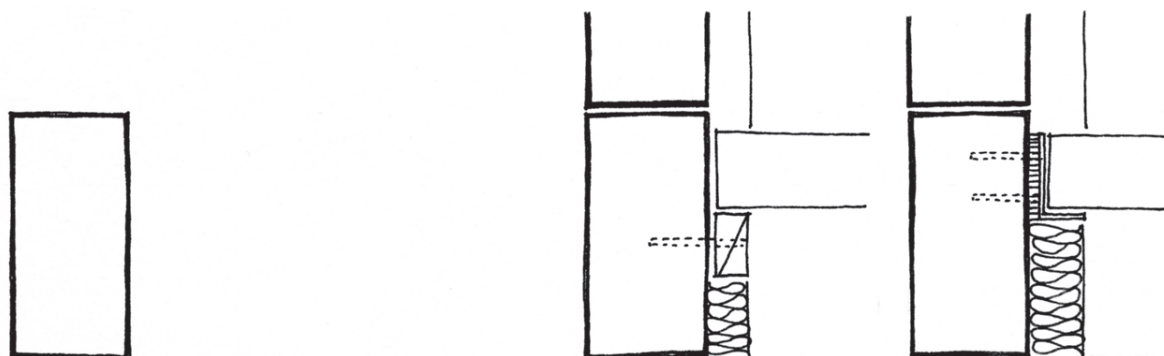
Appui par une entaille linéaire



Appui par une assise spéciale



Appui par un chaînage continu en béton armé

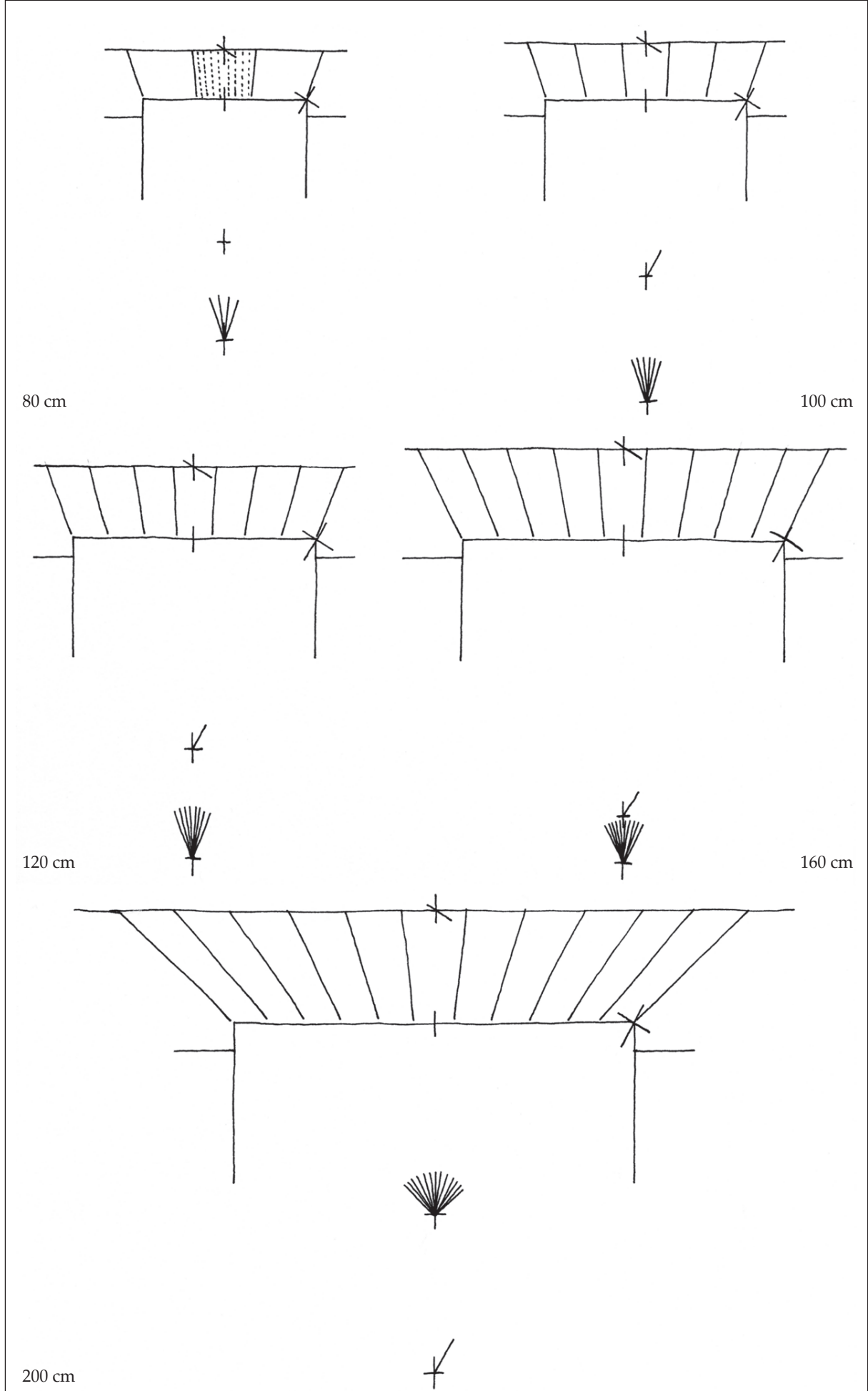


Appui par une sablière

Pouillon et Gilles Perraudin. En règle générale, les plates-bandes peuvent être réalisées à l'aide de cintres, sans recourir à des armatures métalliques: les claveaux sont uniquement soumis à des efforts de compression. Pour cela, ces éléments sont posés avec la stratification perpendiculaire à la direction des efforts ce qui leur donne, dans le plan de la façade, une apparence en délit. Il est impératif d'éviter une pose erronée, c'est-à-dire en délit avec stratification parallèle à la direction des efforts, parce que cela nuirait à la durabilité de la pierre naturelle. Selon Laurent, la hauteur statique des plates-bandes est déterminée de la même manière que pour un linteau monolithique (voir le sous-chapitre III.2.3.2) [Laurent, J.-M. 2007:45-48]. Dans l'ouvrage "Pratique de l'art de construire" publié en 1910, nous trouvons une formule mathématique pour calculer la hauteur statique en fonction de la portée: étant L la moitié de la portée, exprimée en mètres, alors la hauteur statique de la plate-bande est: $e = (L + 5)/2$ [Claudel, J., Laroque, L. 1910:637]. Pour ce qui est du tracé, une plate-bande se compose toujours d'un nombre pair de claveaux et d'une clé, donc d'un nombre impair de pierres. Historiquement le tracé est dessiné à l'échelle 1:1, ce qui permet de produire directement les gabarits, ou panneaux, pour la taille des pièces. Pour obtenir un tracé utilisable, il faudra en tout cas le dessiner soit à l'échelle 1:20 soit 1:10. Il est important de considérer l'épaisseur du joint du clavage et d'enlever cette épaisseur de celle tracée pour chacun des claveaux. Les plates-bandes d'une portée inférieure à 1 m seront composées de 3 pierres; celles d'une portée d'environ 1 m de 5 pierres et pour des portées supérieures, l'on pourra recourir à 7, 9 ou 11 pierres. De la portée, et du nombre de pierres utilisées, découle la distance entre la base de la plate-bande et le foyer depuis lequel on trace les axes des claveaux. Pour 3 et 5 pierres cette distance équivaut à 1,5 fois la portée; pour 7 pierres à $4/3$ de la portée; pour 9 pierres elle est égale à la portée et pour 11 pierres elle correspond à $\sqrt{2}/3$ fois la portée [Planche XI] [Laurent, J.-M. 2007:45-48]. Dans l'ouvrage de Claudel et Laroque, on trouve aussi une formule mathématique pour établir la distance du foyer depuis la base de la plate-bande. Dans ce cas aussi, étant L la moitié de la portée, exprimée en mètres, la distance au foyer est: $x = 3*(L^2 - e^2)/2*e$ (où "e" est la hauteur statique déterminée plus haut) [Claudel, J., Laroque, L. 1910:637]. L' "Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment", publiée en 1959, donne, pour la plate-bande, un schéma graphique peu précis et peu articulé [Dubuisson, B. 1959:224], il en est de même pour le terme "plate-bande" dans "Technologie de la pierre de taille. Dictionnaire des termes couramment employés dans l'extraction, l'emploi et la conservation de la pierre de taille" [Noël, P. 1968] et pour les plates-bandes illustrées dans l'ouvrage "Die Konstruktionen in Stein" de 1903 [Warth, O. 1903]. Dans le manuel "Bâtir" [Vittone, R. 2010:457], le schéma explicatif du tracé d'une plate-bande en pierre de taille suit le même procédé que celui reporté par Laurent [Laurent, J.-M. 2007:45-48] autant pour la hauteur statique que pour la distance du foyer, qui est assumée comme étant égale à 1,5 fois la portée.

Une confrontation entre les résultats issus de l'application des règles contenus dans Laurent [Laurent, J.-M. 2007] et dans Claudel et Laroque [Claudel, J., Laroque, L. 1910] montre des différences importantes qui se réduisent avec l'augmentation de la portée, surtout en ce qui concerne la distance du foyer depuis la base de la plate-bande. Dans le cas de la hauteur statique de la plate-bande, la formule de Claudel et Laroque est plus prudente: la hauteur statique, pour des portées entre 0,8 et 1,8 m, est toujours proche des 40 cm. L'application de la règle de tracé de Laurent produit des valeurs variables entre 0,25 et 0,50 m, pour ces mêmes portées.

PLANCHE XI - TRACÉ DES PLATEBANDES



Cette solution constructive, comme celle du linteau monolithique, s'applique pour les maçonneries continues percées ou pour les trilithes. Dans ce dernier cas de figure, le recours à la plate-bande doit être soigneusement vérifié afin de réduire les risques liés aux poussées horizontales que ce type d'élément structurel introduit dans la maçonnerie. Pour la construction en pans de murs reliés par un chaînage, c'est ce dernier qui assure la fonction de linteau: sa hauteur statique est, en conséquence, aussi fonction de l'ouverture maximale des baies.

2.5. Exemples d'application

Nous essayons de résumer les principes de conception des maçonneries en pierre naturelle, énoncés plus haut, avec trois exemples qui concernent des roches suisses actuellement exploitées. Pour chaque roche, un type particulier a été choisi. Ensuite, en considérant la pétrographie et les modes d'exploitation, la taille et le mode d'appareillage sont déterminés. Le problème des ouvertures est aussi traité, surtout pour les linteaux en pierre naturelle.

2.5.1. Calcaire: le roc de la Cernia (Fiche 20, Annexe A.1, et Planche XII)

Le roc de la Cernia est un calcaire cristallin (micritique) du Portlandien, appartenant aux gisements de roches sédimentaires du Jura suisse, et exploité à Valangin, dans les hauteurs de la ville de Neuchâtel. La nature même de la roche détermine des bancs de carrière assez réguliers, mais d'une hauteur réduite, qui varie entre 40 et 80 cm. C'est cette dimension, définie plus haut comme H_{banc} , qui est déterminante.

L'entreprise qui exploite ce gisement de roche concentre son activité surtout dans la production de blocs et concassés pour les travaux de génie civil. Une petite partie du gisement est exploitée pour la pierre de taille. Pour des raisons d'économie et d'adaptation aux modes d'extraction principaux, il a été choisi de considérer comme élément de base le bloc extrait pour les travaux de génie civil. Ce bloc, extrait par perforation et à l'explosif, présente toutes ces faces brutes de cassure et de géométrie très irrégulière.

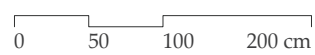
Ses dimensions moyennes sont: 80-120 x 40-60 x 40-60 cm.

Ce calcaire possède une résistance à la compression perpendiculaire à la stratification de 90 N/mm². Une maçonnerie de pierre de taille, hourdée au mortier, présentera, selon le diagramme SIA V178, une résistance à la compression d'au moins 30 N/mm², ce qui rend possible aussi la réalisation de murs porteurs d'épaisseur réduite.

La possibilité de concevoir des maçonneries porteuses d'épaisseur réduite, permet d'établir les dimensions des parpaings, en accord avec celles du bloc extrait. Par simple division d'un bloc extrait, il est possible de produire un parpaing de 90x30x50 cm. La hauteur n'est pas en accord modulaire avec les autres dimensions parce que la pose est toujours faite selon le lit. Ces éléments ont un poids de 360 kg, ce qui permet le recours à des moyens de levage légers.

Pour des maçonneries de forte épaisseur, dictée par des exigences thermiques ou statiques, les parpaings assument des dimensions de 100x50x50 cm.

La réalisation d'ouvertures dans cette maçonnerie, par le biais de linteaux en pierre naturelle, nécessite, sauf pour des petites baies, la mise en oeuvre de plates-bandes.



2.5.2. Grès: le grès de la Molasse de Berne (Fiche 2, Annexe A.1, et Planche XIII)

Les gisements exploités à Berne sont formés par du grès de la Molasse marine supérieure du Burdigalien, connu sous le nom de molasse de Berne. Les gisements sont puissants et la hauteur des bancs élevée.

Les carrières d'Ostermundingen sont exploitées à la haveuse et au fil diamanté, ce qui permet d'extraire des blocs de géométrie précise et de dimensions constantes: 200-300x100x100 cm. La hauteur des blocs est contrainte par la longueur de la lame de la haveuse, utilisée pour la découpe verticale: c'est donc la valeur H_{extr} qui est déterminante dans le cas du grès de la Molasse de Berne. Ce matériau, utilisé surtout dans la restauration de maçonneries en molasse dans le Plateau suisse, présente, parfois, des imperfections et des blocs de qualité inférieure sont disponibles. Ils présentent la même taille que les autres et permettent de produire des gros éléments de construction.

La résistance moyenne à la compression perpendiculairement à la stratification est de 35 N/mm². Cette valeur est inférieure à celle énoncée plus haut, de 60 N/mm², considérée comme minimale pour permettre la mise en oeuvre de maçonneries porteuses minces. Selon le diagramme SIA V178, la résistance à la compression d'une maçonnerie de pierre de taille, hourdée au mortier, en grès de la Molasse de Berne est d'au moins 15 N/mm².

Les blocs pour la construction, dans le cas de bâtiments d'habitation, auront une profondeur qui sera déterminée par les exigences thermiques; dimension qui, en tout cas, sera inférieure ou égale à 60 cm. En adaptant ces données aux dimensions des blocs extraits, la taille des éléments de construction est de 200x50x100 cm. Une modularité entre toutes les dimensions est obtenue, mais en tout cas seulement la pose selon le lit est possible. La hauteur des éventuels éléments verticaux est limitée à 110 cm. Le poids d'un bloc est de 2'200 kg, ce qui nécessite des engins de levage adaptés.

La réalisation d'ouvertures dans la maçonnerie est possible par le biais de linteaux monolithiques dont la longueur maximale est de 300 cm (200 cm dans le cas de l'utilisation des blocs de construction définis plus haut). Cette largeur est suffisante pour des baies courantes.

2.5.3. Gneiss: les ortho- et paragneiss du canton du Tessin (Fiches 7-13-14-16-18-19, Annexe A.1, et Planche XIV)

Les roches métamorphiques exploitées dans les gisements du Nord du Tessin sont des ortho- ou des paragneiss à deux micas. La foliation de ces roches produit des plans de clivage naturels qui sont exploités dans l'extraction.

L'exploitation de ces roches dures est faite à l'aide de perforations et d'explosif, en général du cordeau détonant. La longueur des florets de perforation détermine donc la hauteur des blocs extraits qui, aujourd'hui, découle aussi de la dimensions des blocs marchands, ce qui équivaut à 300-350x160x160 cm. Dans la production d'éléments de grandes dimensions pour la construction, il faut considérer aussi la contrainte de la profondeur maximale de découpe d'une fraise, outils normalement utilisé pour la découpe des blocs, qui correspond à 150 cm, pour le cas du Tessin. Normalement, des gros blocs sont séparés du gisement et ensuite découpés, par perforation, afin de produire les blocs à travailler. C'est donc la dimension choisie pour l'élément de construction qui déterminera, dans le cas



0 50 100 200 cm

de ces roches, la dimension des blocs à extraire en carrière.

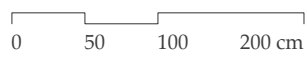
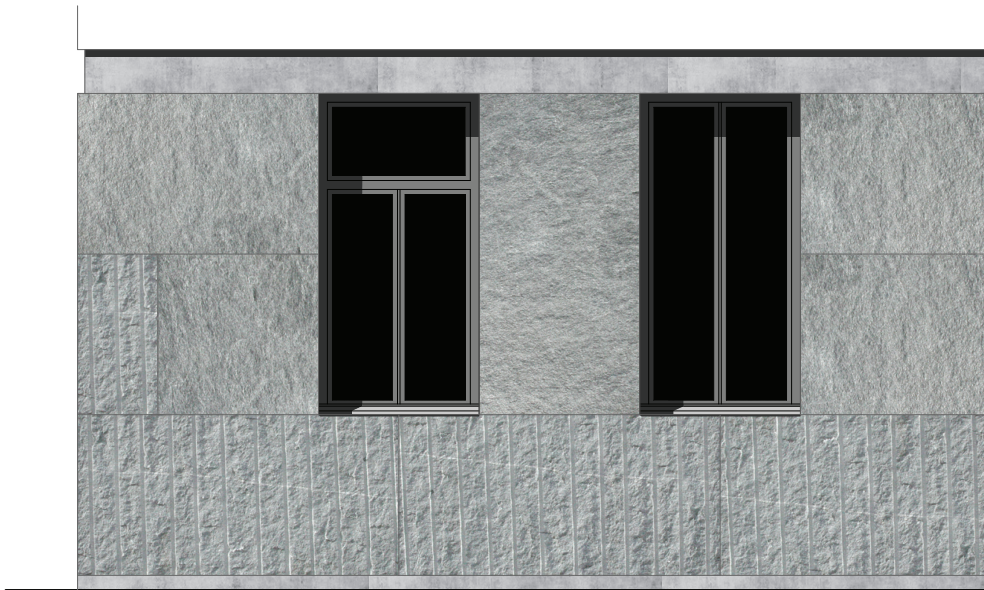
La résistance à la compression de ces gneiss est très élevée, de l'ordre des 180 N/mm^2 , perpendiculairement à la foliation. Une maçonnerie de pierre de taille, hourdée au mortier, atteint, selon le diagramme SIA V178, une résistance à la compression qui dépasse largement les 40 N/mm^2 . Ces roches permettent donc de concevoir des maçonneries porteuses minces¹⁶.

Les éléments de construction, de grandes dimensions, devraient être posés selon leur foliation, mais, comme il a été énoncé auparavant, une pose en délit est possible. Vu la grande hauteur des blocs extraits, des éléments verticaux qui respectent le sens de la foliation sont en tout cas concevables. Un bloc de construction pour maçonnerie peut donc avoir une taille de $240 \times 30 \times 110 \text{ cm}$. La hauteur ne doit pas forcément respecter la modularité si l'on considère la seule pose en lit. Les éléments verticaux, pour une construction de type trilithique, en accord avec les dimensions des éléments de maçonneries, assument une taille de $90 \times 30 \times 220 \text{ cm}$. Cette hauteur permet de réaliser des baies de la dimension d'une porte et reste à l'intérieur de la contrainte constituée par la longueur maximale des florets de perforation.

Dans le cas de maçonneries de forte épaisseur, les dimensions peuvent être de $220 \times 55 \times 110 \text{ cm}$, pour les blocs, et de $110 \times 55 \times 220 \text{ cm}$ pour les éléments verticaux. Dans ce cas de figure, une éventuelle pose en délit des éléments verticaux pourraient être justifiée par la production d'éléments identiques en carrière.

Les ouvertures dans la maçonnerie et les architraves des trilithes sont réalisables avec des linteaux monolithiques dont la dimension est variable, mais qui est toujours à considérer comme inférieure à 300 cm .

16. Des essais à la compression sur des échantillons de maçonnerie de gneiss type Cresciano, hourdés au mortier bâtard, réalisés au *Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction* de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ont montré une valeur moyenne, pour la résistance à la compression de la maçonnerie, de $32,9 \text{ N/mm}^2$ (voir lesous-chapitre III.4.5.2.5)



3. EXEMPLE D'ÉTUDE: BÂTIMENT DE LOGEMENT EN PIERRE STRUCTURELLE

Dans ce paragraphe, nous introduisons le cas d'étude qui a servi pour les vérifications de la résistance aux séismes de la maçonnerie en pierre naturelle (voir le sous-chapitre III.4.5) et pour le calcul du bilan thermique (voir le sous-chapitre III.5.8.1). C'est un bâtiment de logement dont la structure est réalisée en pierre naturelle massive. Les dimensions principales de l'immeuble découlent de la lecture des données statistiques sur la construction, publiées dans l'ouvrage "Atlas des mutations spatiales de la Suisse" [Schuler, M. et al. 2007]. Dans le chapitre 8, "Habiter et vivre", on trouve des données importantes au sujet des bâtiments construits en Suisse jusqu'en 2000. De ces dernières, découle qu'en Suisse 80% des bâtiments sont des immeubles d'habitations, dont 98% ont une hauteur variable entre 1 et 5 niveaux¹⁷. Ceci permet de définir l'immeuble d'habitation de faible hauteur comme cas général pour la Suisse. En ce qui concerne le nombre et la surface des logements, la moyenne est de 7 logements par immeuble, avec une surface moyenne de 99 m² divisés en 4 pièces, ce qui correspond à deux appartements par étage, si on se réfère aux hauteurs ci-dessus.

Au-delà des considérations statistiques, le fait de traiter le cas de l'immeuble de logement est très contraignant du point de vue des exigences de confort et de sécurité (même si ce type d'utilisation est considérée comme la classe la moins sensible dans la Norme SIA pour les séismes [SIA 261 2003]). Les contraintes économiques sont aussi élevées, mais une utilisation de la pierre massive dans ce contexte serait sûrement la meilleure des façons de promouvoir ce matériau et d'inverser une tendance qui le considère comme le matériau riche par excellence.

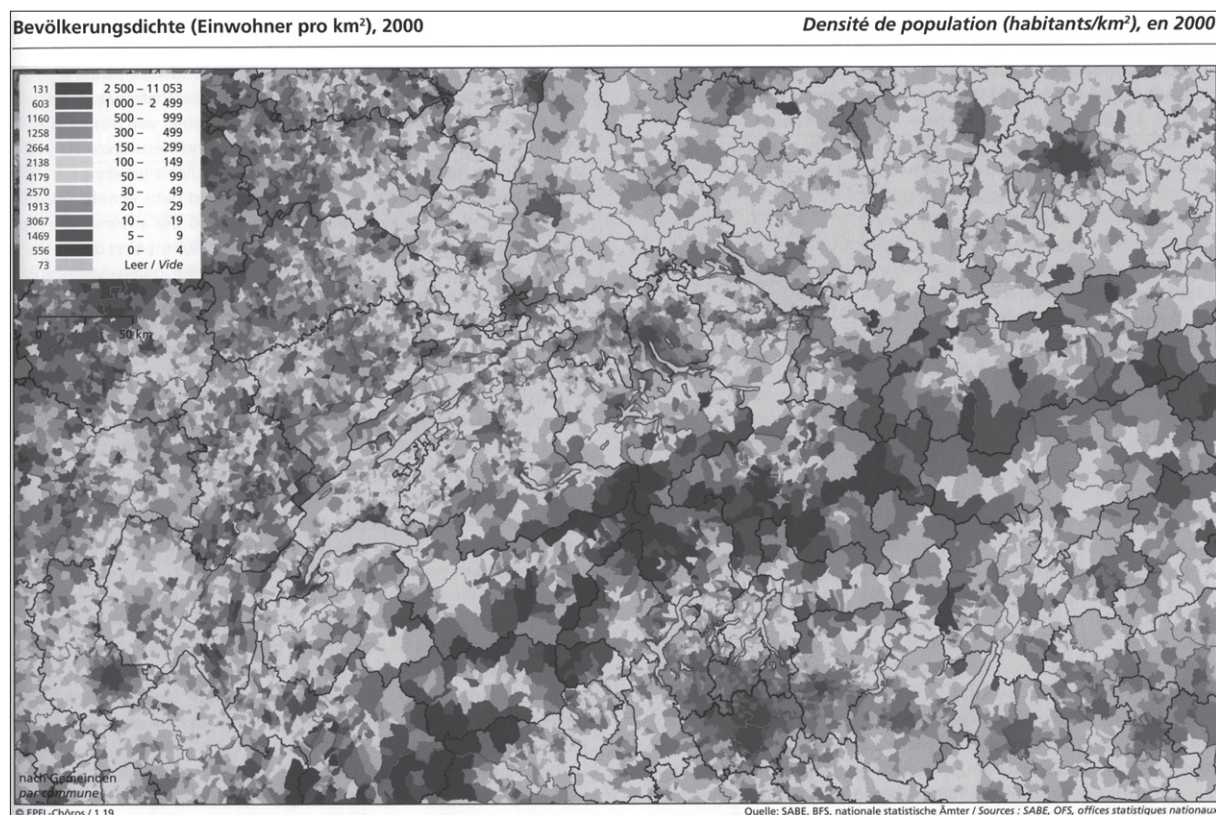


Fig. III.10. Carte de la densité de population en Suisse en 2000 [Schuler, M. et al. 2007]

17. Voir aussi les données du Recensement Fédéral 2000 publiées par l'Office Fédéral de Statistique: http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/09/02/blank/key/gebaeude/art_und_grosse.html, consulté le 18.02.2010.

Ce type de bâtiment constitue une bonne partie du parc immobilier suisse, surtout dans les régions du Plateau. Dans cette partie de notre pays, nous retrouvons la majorité des agglomérations urbaines et, en conséquence, la plus haute densité de population. La demande croissante de logements dans ces zones, ainsi que la volonté de réduction de l'étalement des zones urbaines, est aussi une confirmation du bien fondé du choix de traiter comme exemple d'étude celui d'un immeuble de logement.

3.1. Projet

3.1.1. Principes de base

Les dimensions de l'immeuble découlent des données statistiques susmentionnées, c'est-à-dire une hauteur de 5 niveaux et deux appartements de trois à quatre pièces par étage, d'une surface d'environ 100 m².

La distribution des deux appartements se fait par une cage d'escalier avec ascenseur.

Un niveau en sous-sol pour les caves et les locaux techniques est prévu. Les parkings souterrains ne sont pas pris en compte, d'une part vue la petite taille de l'immeuble et, d'autre part, en accord avec la volonté de réduction du nombre de véhicules privés dans l'habitat urbain. En tout cas, leur intégration pourrait se faire en ajoutant un niveau de sous-sol, ce qui n'influence pas la construction en maçonnerie de pierre naturelle.

Le système constructif se base sur des maçonneries en pierre de taille non armées, pour la structure verticale, et qui constituent aussi les refends de stabilisation, et de dalles en bois (type planches clouées ou en panneaux massifs), mixtes bois-béton ou en béton armé. Pour la cage d'ascenseur une construction en béton armé ou en maçonnerie est possible. Les cloisons intérieures, porteuses ou non, sont en brique de terre cuite.

3.1.2. Deux variantes structurelles

Deux variantes structurelles ont été étudiées et retenues. Elles se basent sur deux différentes conceptions du plan de l'immeuble. La première variante reprend le schéma traditionnel basé sur un système de murs porteurs périphériques qui assurent aussi la stabilité. La deuxième présente un noyau central de stabilisation avec une structure périphérique porteuse. Cette dernière peut être réalisée avec différentes solutions constructives: éléments préfabriqués en bois, maçonneries isolantes en terre cuite, éléments en pierre naturelle, etc. [Planches XV et XVI].

3.1.3. Choix des pierres naturelles

Le choix des pierres naturelles à utiliser a été, en premier lieu, défini par rapport à la résistance à la compression des maçonneries, à l'aide du diagramme contenu dans la Recommandation SIA V178. On a limité le choix aux pierres qui présentent une résistance à la compression supérieure à 40 N/mm², ce qui permet de considérer aussi des épaisseurs réduites des murs. En effet, la résistance finale de la maçonnerie est telle que l'épaisseur peut être déterminée par la seule vérification sismique. Dans le cas de roches présentant une résistance inférieure à 40 N/mm², des essais devraient être réalisés afin de pouvoir garantir une résistance minimale constante.

Les pierres choisies pour les vérifications sont le Roc de Cernia, calcaire micritique exploité à Valangin (NE); le grès de Rorschach, grès calcaire exploité à Buchen-Staad (SG) et le gneiss type Iragna, exploité à Iragna (TI). Elles sont représentatives des trois régions géologiques suisses et des trois familles des roches les plus exploitées actuellement. On a ensuite confronté les dimensions des blocs extraits afin de pouvoir déterminer la taille maximale des éléments à utiliser, toujours avec le souci de réaliser des maçonneries et non pas des systèmes basés sur des éléments isolés. Le cas le plus contraignant est celui du Roc de Cernia, qui a donc déterminé la dimension des blocs, c'est-à-dire: 120x30x60 cm (poids du parpaing de 580 kg). Ce bloc permet une pose toujours en lit.

3.2. Construction

3.2.1. Fondations

Les fondations et le niveau en sous-sol sont réalisés en béton armé. Ce type de structure est celui qui permet, avec des épaisseurs réduits, de transmettre les charges du corps du bâtiment au sol soit sous forme d'efforts de compression soit de traction. Un système de fondations en maçonnerie non armée de pierre naturelle nécessite, par contre, des masses très importantes afin de transmettre les charges seulement par compression. Ce système est possible, mais la quantité de pierre à mettre en oeuvre ainsi que l'emprise des fondations le rendent peu efficace dans le cas d'un immeuble de 5 niveaux (voir à ce sujet l'étude de Raphaël Dauphin sur un bâtiment en pierre massive de deux niveaux [Dauphin, R. 2006]). De plus, la reprise des efforts de traction dans la maçonnerie oblige au recours à une armature en acier.

3.2.2. Maçonnerie

Comme cela a déjà été mentionné, une maçonnerie non armée pour les murs porteurs et refends en pierre naturelle a été choisie par souci de simplicité dans l'exécution de l'ouvrage, mais aussi parce que cette technique de mise en oeuvre permet le démontage des éléments et n'introduit pas de conflits entre matériaux différents, en réduisant tout risque de dégradations à long terme. Il semblait aussi pertinent de connaître les limites de la technique la plus simple, afin de pouvoir par la suite étudier des solutions plus complexes pour des cas spécifiques.

Les mortiers de mise en oeuvre ont été choisis selon la Norme SIA 266/2: il faut veiller à utiliser des mortiers plus souples que les parpaings (module d'élasticité "E" inférieur) et, en général, contenant de la chaux. Les mortiers au ciment sont, en règle générale, à proscrire, à cause de leur souplesse réduite, de leur imperméabilité à l'eau et des sels alcalins qu'ils contiennent. Les mortiers à la chaux ou les mortiers bâtards sont les plus adaptés pour ce type de maçonnerie. En ce qui concerne les surfaces de pose, il est nécessaire de veiller à ce que ces dernières ne soient pas lisses, afin de garantir un bon frottement interne de la maçonnerie.

3.2.3. Dalles

Deux solutions pour les dalles ont été envisagées: la première est celle des dalles en béton armé coulé sur place, avec des prédalles préfabriquées comme coffrage, et la deuxième est celle d'un plancher en bois massif, type planches clouées ou caissons structurels, éventuellement avec une couche de béton armé pour rigidifier la structure. Les dalles constituent des éléments de stabilisation qui permettent

aux charges horizontales d'être transmises et distribuées à toute la maçonnerie. C'est pour cela qu'elles doivent posséder une rigidité suffisante dans leur plan.

La connexion entre les dalles et les maçonneries en pierre naturelle se fait, dans le cas des dalles en béton armé coulé sur place, par frottement ou à travers les fers d'armature, et, pour les planchers en bois, par le biais de cornières métalliques fixées aux deux structures.

3.3. Quelques considérations sur les coûts d'une maçonnerie en pierre naturelle massive

La question du coût est souvent soulevée et utilisée pour écarter, à priori, le recours à la pierre naturelle comme matériau de construction. L'utilisation de ce matériau comme élément de revêtement mince est, par contre, toujours d'actualité.

En ce qui concerne l'évaluation des coûts de construction, ce n'est pas dans les objectifs de notre recherche de produire des chiffres. Ceci pour des raisons simples: premièrement, les prix d'un matériau de construction comme la pierre naturelle ne sont ni constant ni homogènes, dans le sens qu'ils dépendent du type de pierre naturelle, de la carrière, du type de produit et aussi des quantités demandées, il serait donc illusoire de pouvoir fournir une liste de prix. Deuxièmement, les prix de construction sont liés à la conjoncture et à l'offre et à la demande, donc des paramètres liés à une période précise, ce qui exclut toute possibilité de généralisation. De plus, comme il a déjà été cité à plusieurs reprises, le prix de la pierre naturelle locale pourrait rapidement devenir concurrentiel si des taxes sur l'énergie étaient introduites. Troisièmement, le prix d'un matériau de construction doit toujours être comparé avec celui d'autres matériaux dans des conditions de mise en oeuvre semblables. Par exemple, on ne peut pas comparer le prix d'une maçonnerie en pierre naturelle avec celui d'une plaque de revêtement, parce que les deux ont des fonctions très différentes.

Dans ce sous-chapitre nous essayons de donner quelques indications, en utilisant surtout le principe de la comparaison, pour réaliser un premier choix et une première estimation lors de la conception d'une nouvelle structure en pierre naturelle massive.

3.3.1. Comparaison entre solutions constructives en pierre naturelle

Il est aisé de comparer différents modes de construction réalisés à partir d'un même matériau parce que le prix brut de ce dernier peut être assumé comme constant. Une première comparaison peut donc être faite entre l'utilisation de la pierre naturelle massive et celle sous forme de plaque de revêtement. Si l'on assume comme constant le prix de la matière première, c'est-à-dire le prix au mètre cube de la pierre naturelle extraite¹⁸, il faut ajouter à ce prix celui des différentes phases de transformation, donc les découpes. Vu que les éléments massifs ne sont que peu travaillés par rapport aux plaques minces et que les découpes peuvent être réalisées par des outils simples, nous pouvons conclure que, en général, la plaque mince est plus chère comparée à un élément massif. Ceci n'est pas toujours valable dans le cas de roches clivables, comme les schistes ou certains gneiss, parce que la découpe d'éléments minces est facile et comporte un investissement réduit.

Même dans le cas où la plaque mince de revêtement est moins chère que l'élément massif, il faut, pour pouvoir les comparer en tant qu'éléments de construction, ajouter au prix de la plaque mince celui de

18. Ceci est le cas le plus défavorable, parce que, pour des éléments massifs, il est possible d'utiliser de la pierre naturelle de qualité inférieure par rapport à celle pour la production de plaques minces.

la structure qui doit la supporter et celui de la structure porteuse.

Les éléments massifs pour les façades autoporteuses peuvent être comparés aux éléments massifs structurels. Dans ce cas de figure, le prix au mètre cube de la pierre naturelle est encore une fois constant. Les phases de transformation sont aussi pratiquement les mêmes, mais souvent, la taille réduite des éléments composant le mur autoporteur nécessite un nombre supérieur de découpes, ce qui entraîne une augmentation des coûts. Le recours à des éléments de grandes dimensions aussi pour les revêtements de façades rend les prix des deux solutions proches; le prix d'une façade autoporteuse par rapport à l'unité de surface est en général inférieur vu l'épaisseur réduite. Dans ce cas aussi, pour pouvoir comparer deux types semblables de constructions, il faut ajouter au prix de la façade autoporteuse celui de la structure porteuse et des ancrages, qui sont limités. Au prix de la façade porteuse en pierre naturelle massive doit être ajouté celui de la solution constructive adoptée pour assurer l'élimination du pont de froid au niveau de la tête des dalles, parce que c'est surtout dans cela que réside l'avantage principal d'un système de double mur.

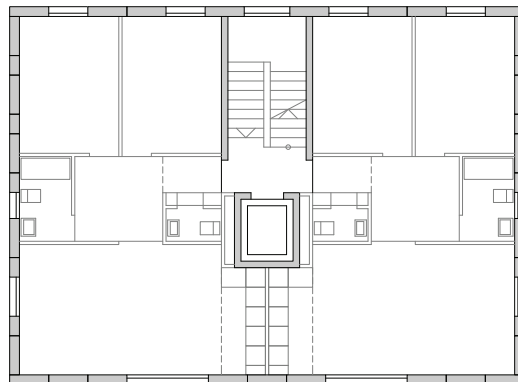
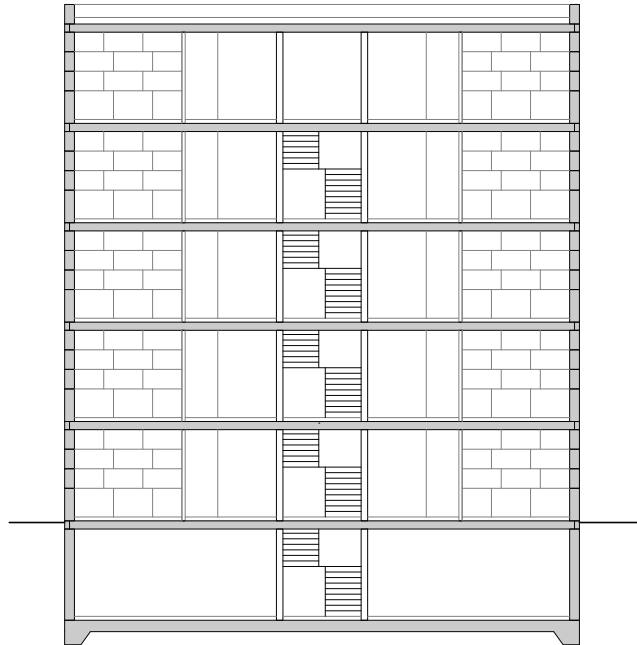
3.3.2. Comparaison entre construction en pierre massive et autres structures porteuses

Ce type de comparaison est plus difficile que la précédente parce que, d'une part, les prix des matériaux sont variables, ainsi que ceux de leur mise en oeuvre et, d'autre part, le résultat n'est pas comparable dans tous les cas de figure. En effet, au niveau d'une façade, la qualité, en terme de durabilité, facilité d'entretien et caractère, qui peut être atteinte par une façade en pierre naturelle ne peut que difficilement être comparée à une façade réalisée avec une isolation périphérique crépie, qui est, à l'heure actuelle, l'une des solutions les plus économiques. Dans le cas des façades, il est donc nécessaire de confronter les façades en pierre naturelle, structurelles ou autoporteuses, avec des façades qui présentent des matériaux résistants apparents, tels la brique de parement, et le béton apparent, coulé sur place ou préfabriqué.

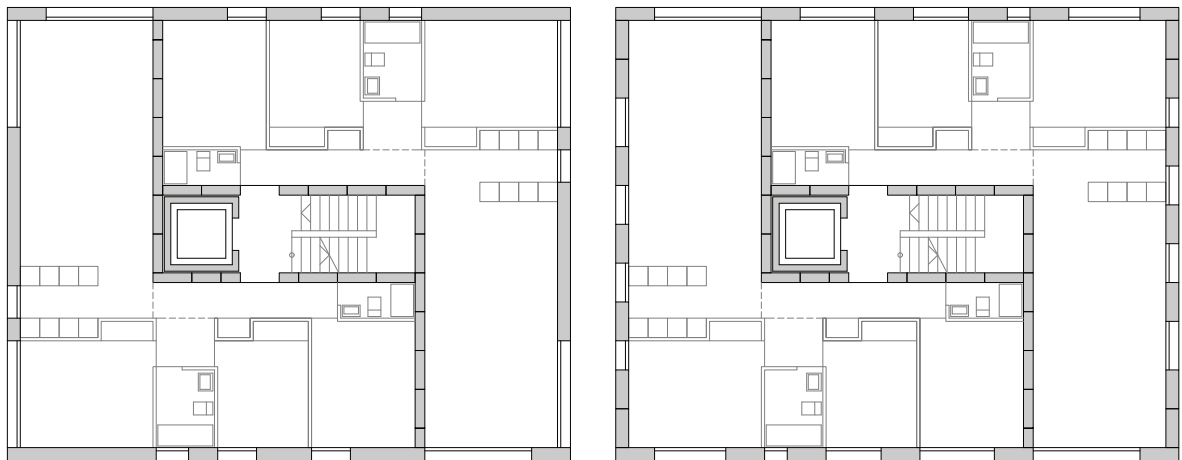
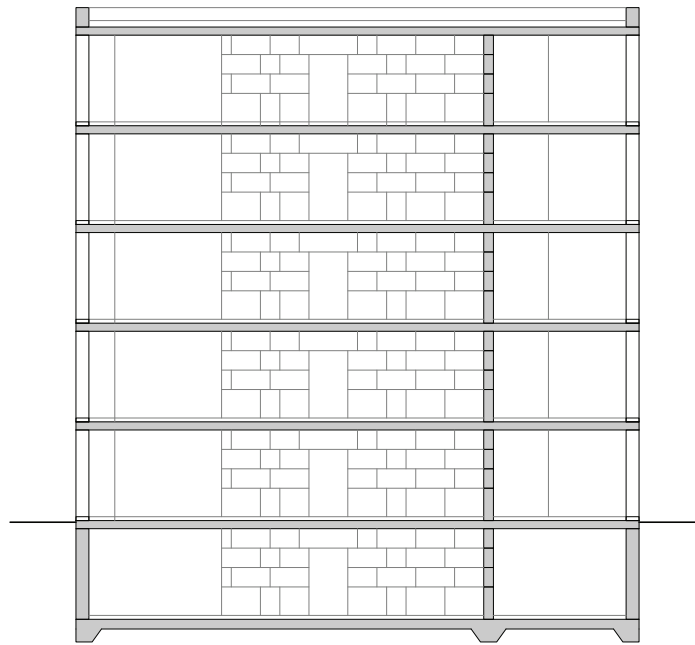
Dans le cas des façades autoporteuses en brique de parement, le prix de ce matériau est en général inférieur à celui d'un même élément en pierre naturelle. L'avantage, aussi économique, pour la pierre naturelle est de permettre la réalisation d'éléments de grande taille qui réduisent le temps de mise en oeuvre. Pour la comparaison du prix d'une telle façade avec celui d'une façade structurelle en pierre naturelle valent les mêmes considérations faites plus haut pour le cas des façades autoporteuses et structurelles en pierre naturelle.

Le prix d'une façade en béton armé apparent est très variable et dépend, d'une part, du mode de mise en oeuvre, donc soit coulé sur place soit préfabriqué, et, d'autre part, de la finition de surface à obtenir, qui est fonction du type de coffrage et d'éventuels traitements de surface successifs. Du point de vue de la solution constructive, un mur en béton armé apparent demande des solutions semblables à celles d'une maçonnerie en pierre naturelle structurelle, sauf dans le cas du recours à un double mur, dont le prix est à comparer, par contre, à celui d'une façade autoporteuse. Dans le cas du béton armé coulé sur place, il faudrait aussi tenir compte d'un temps de mise en oeuvre plus long, à cause de la nécessité d'en permettre la prise.

Le béton armé est un matériau qui demande un investissement en énergie très élevé pour sa production et donc son prix risque d'augmenter fortement dans le futur, mais même aujourd'hui ce type de construction n'est pas toujours plus économique par rapport à celui en pierre naturelle massive.



0 200 400 800 cm



0 200 400 800 cm

4.1. Bases théoriques. Le séisme

4.1.1. La sismologie

La sismologie, qui est la discipline qui étudie la génération, la propagation et l'enregistrement des ondes élastiques dans la terre, est relativement jeune. Son développement s'est fait en parallèle avec celui sur l'étude de la planète Terre et de ses profondeurs. La théorie de la tectonique des plaques (voir le sous-chapitre I.1.1) a été le point de départ pour mieux comprendre les phénomènes sismiques. En effet, les tremblements de terre sont causés, d'une part, par les contraintes tectoniques du sous-sol, et d'autre part, par des facteurs anthropiques (tels les effondrements des mines, les explosions, les excavations, etc.) [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:14]. En ce qui concerne les causes tectoniques, les séismes se produisent seulement à l'intérieur de la lithosphère, au niveau des limites des plaques: les plus dangereux sont les superficiels, qui ont lieu à moins de 60 km de profondeur et qui sont engendrés par les collisions continentales ou par le coulisement des plaques. La zone de rencontre des plaques africaine et européenne se trouve dans le Bassin méditerranéen qui est donc la zone sismique la plus active d'Europe et d'Afrique.

La lithosphère est soumise à des contraintes qui, quand la résistance des roches est dépassée, causent une rupture. L'endroit où cette rupture a lieu s'appelle "hypocentre", sa projection verticale sur la surface est appelée "épicode" [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:17]. L'énergie émise lors de la rupture des roches de la lithosphère se propage, sous forme d'ondes élastiques, à l'intérieur de la terre. Deux types d'ondes existent, qui correspondent à des ondes de compression-dilatation, longitudinales, appelées "ondes P" (primaires) car plus rapides, et des ondes de cisaillement, transversales, appelées "ondes S" (secondaires). Quand des ondes S arrivent à la surface, elles se propagent parallèlement à la surface libre selon deux formes: les ondes de Love et celles de Rayleigh. Ce sont ces deux derniers types d'ondes, de basse fréquence et forte amplitude, qui engendrent les dommages liés aux séismes.

Chaque séisme est caractérisé par la détermination des coordonnées de son épicode, de sa date et de sa magnitude. Cette dernière valeur indique, selon une échelle logarithmique, l'amplitude maximale enregistrée des ondes par rapport à la distance à laquelle l'enregistrement a été réalisé. L'intensité, normalement indiquée en chiffres romains, indique, par contre, les effets du séisme. L'échelle d'intensité comporte douze degrés. Aucune correspondance directe entre intensité et magnitude ne peut être établie [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:30].

4.2. Le séisme en Suisse

La région alpine et le fossé rhénan sont les zones sismiques les plus actives de l'Europe centrale [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:17]. Dans cette zone c'est la surrection des Alpes qui engendre les tremblements de terre. Ces deux zones concernent également la Suisse, mais qui reste, de toute façon, un pays avec une sensibilité sismique modérée.

4.2.1. Historique

L'introduction de normes concernant la construction parasismique pour la Suisse entière remonte à

moins de dix ans. Ceci est explicable par le fait que notre pays est considéré généralement comme peu sensible à ce type d'événement. Les faits démentissent cette appréciation, partagée par une majorité de la population: le dernier séisme avec des dégâts significatifs a été celui de Sion, dans le Canton du Valais, en 1946 (intensité VIII et magnitude de 6,1) et celui de Bâle de 1356 a été le plus grand séisme qui a eu lieu au Nord des Alpes dans l'histoire (intensité IX, magnitude de 6,5 à 7) [Lestuzzi, P. 2008; Giardini, D. et al. 2004].

Les régions suisses les plus sensibles aux risques de tremblements de terre sont, comme démontré par les cas historiques susmentionnés, celles des Cantons de Bâle et du Valais.

4.2.2. Cadre normatif

Les principaux règlements suisses qui concernent la résistance aux séismes des constructions sont deux normes professionnelles éditées par la *Société suisse des ingénieurs et des architectes*, Normes SIA, basées sur les Eurocodes. Les bases pour le dimensionnement parasismique des structures se trouvent dans la Norme SIA 260 *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses*. La Norme SIA 261 *Actions sur les structures porteuses* spécifie la définition des actions sismiques; la répartition en classes des ouvrages; les mesures constructives et de conception ainsi que les méthodes d'analyse structurelle, en particulier dans son chapitre 16 "séisme" [SIA 261:2003]. Ces deux textes sont complétés par des normes qui traitent des différents matériaux de construction (Normes SIA de 262 à 266) et par la Norme SIA 267 sur la géotechnique, pour les problèmes de séisme en rapport aux fondations.

4.2.3. Les quatre zones de séisme

La norme SIA 261 propose une division du territoire suisse selon quatre zones de séisme. Pour chaque zone est indiquée la valeur de l'accélération horizontale du sol, pour un sol de type A. Une période de retour de référence de 475 ans est considérée.



Fig. III.11. Les quatre zones de séisme suisses [SIA 261 2003]

Zone Z1	$a_{gd} 0.6 \text{ m/s}^2$
Zone Z2	$a_{gd} 1.0 \text{ m/s}^2$
Zone Z3a	$a_{gd} 1.3 \text{ m/s}^2$
Zone Z3b	$a_{gd} 1.6 \text{ m/s}^2$

La zone Z1 correspond au territoire du Plateau suisse, du Jura, du Canton du Tessin et des Grisons italiens. La zone préalpine du nord des Alpes, ainsi que les Cantons des Grisons et de Bâle campagne, constituent la zone Z2. Les zones Z3a et Z3b sont formées, respectivement, par le canton de Bâle-Ville et celui du Valais.

Le fait que la plupart des grands centres habités en Suisse se trouve en zone Z1 constitue un potentiel pour l'application de la construction en maçonnerie de pierre naturelle non armée.

4.2.4. Les six classes des sols de fondation

La norme SIA 261 définit aussi six classes pour les sols de fondation. Selon leurs constituants, les sols possèdent des résistances variables en cas de séisme. Les facteurs d'ajustement donnés par la norme permettent de prendre en compte la nature du sol lors de la détermination du spectre de réponse élastique de la structure. Elles sont énumérées ici selon un ordre décroissant de résistance.

Sol A: roche sous une couche de terrain de maximum 5 m	$S = 1.0$
Sol C: sables, graviers et moraines de plus de 30 m	$S = 1.15$
Sol B: sables et graviers cimentés de plus de 30 m	$S = 1.20$
Sol D: sables fins, limons et argiles de plus de 30 m	$S = 1.35$
Sol E: couche alluviale sur sol A ou B	$S = 1.40$
Sol F: dépôts à structure sensible (tourbe, craie lacustre,...)	

4.2.5. Les trois classes d'ouvrage

Trois classes d'ouvrages sont définies par la Norme SIA 261, selon le degré de sensibilité et de sécurité qui doit être garanti aux occupants.

- I. Habitation, administration, industries, parkings
- II. Bâtiments publics et à forte fréquentation
- III. Infrastructures vitales

En ce qui concerne la construction en maçonnerie de pierre naturelle non armée et les objectifs de notre recherche, on se référera toujours, sauf si indiqué, aux ouvrages de la classe I.

4.3. Les effets du séisme sur les structures

Les ondes sismiques se propageant à la surface, tout objet qui y est posé ou enfoncé subit les effets du tremblement de terre. Dans le cas des constructions, ce sont donc les fondations qui sont en premier lieu soumises aux forces engendrées par les ondes sismiques. La fondation transmet ensuite ses forces à la superstructure: c'est donc un comportement inverse par rapport à celui du cheminement statique des charges. L'effet principal du séisme est d'engendrer dans la structure des déformations et des déplacements qui provoquent des charges: là encore un principe inverse, parce que, normalement,

c'est une charge qui produit des déformations [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:53]. Les sollicitations sismiques sont elles-mêmes particulières, parce qu'elles ont un caractère horizontal, cyclique et dynamique.

On énumère de suite, les formes principales de dégâts de la structure qui peuvent être relevées lors d'un séisme, reprises de l'ouvrage de Pierino Lestuzzi et Marc Badoux [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008]. Dans la majorité des cas, ces dégâts sont dus à une mauvaise conception de la structure.

L'effondrement en galette (*pancake*) est causé par la rupture des éléments structurels verticaux suite à une stabilisation latérale insuffisante.

Les murs en maçonnerie présentent des fissurations en forme de croix produites essentiellement par les efforts de cisaillement qui se traduisent dans des forces de tractions (auxquelles la maçonnerie est moins résistante). Ces fissures peuvent s'agrandir et causer la ruine de l'élément.

La présence d'une zone sans éléments de stabilisation dans une construction peut engendrer des dégâts importants lors d'un séisme, si cette zone n'a pas été conçue expressément. C'est le cas des immeubles de plusieurs étages dont la structure d'un niveau serait une série d'éléments porteurs verticaux, comme il est fréquent pour les rez-de-chaussée commerciaux. Les déformations globales de la structure se concentrent localement au niveau de ces éléments porteurs, qui risquent la rupture. Cette forme de dégâts est appelée "étage souple" (*soft-storey*) et elle est très répandue [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:55].

Une autre forme de rupture qui touche les éléments porteurs verticaux est causée par l'effort tranchant lorsque leur hauteur et leur résistance sont réduites. En effet, plus la hauteur est faible, plus l'effort tranchant produit lors d'une déformation latérale par le moment de flexion est élevé. Aux extrémités de l'élément porteur, cet effort peut souvent atteindre la valeur du moment plastique et engendrer donc des déformations importantes et ensuite la rupture. C'est le cas du phénomène de la colonne captive et de la colonne courte (*short column*). Dans le premier cas, la longueur de la colonne est réduite par des éléments non porteurs, tels des remplissages entre les colonnes, qui empêchent sa déformation latérale. Par contre, dans la colonne courte, c'est le dimensionnement de l'élément même qui est erroné, son élancement étant insuffisant.

La ruine d'une structure peut être produite aussi par la perte de cohésion des éléments structurels horizontaux, surtout dans le cas des planchers et poutres dont la longueur des appuis est insuffisante. Ce danger est particulièrement élevé dans les structures formées par des éléments raccordés au moyen de fixations mécaniques qui peuvent subir des ruptures.

Les effets des ondes sismiques sont amplifiés par des terrains meubles et, encore plus, lorsque ces terrains atteignent un état d'incohérence accrue: c'est le cas des limons et des sables fins qui sont soumis au phénomène de liquéfaction. La perte de portance du sol qui en dérive peut produire, sur les versants, des glissements de terrains et, en plaine, des affaissements locaux. Une structure fondée sur ce type de sols peut donc être déformée et subir, en conséquence, des dégâts. Un phénomène différent, mais qui a des conséquences semblables, concerne les sols formés par des argiles.

En milieu urbain, des bâtiments rapprochés peuvent se déplacer latéralement, suite aux sollicitations horizontales, et entrer en collision ("martèlement").

Ce danger est plus important si les modes d'oscillations sont différents, comme pour des constructions de hauteurs différentes, ou si les hauteurs d'étages ne sont pas les mêmes, parce que les dalles de l'un percutent les éléments porteurs verticaux de l'autre.

Une majorité des dégâts susmentionnés peut être éliminée par une bonne conception qui se traduit par une sécurité accrue, ce qui est le but de toute forme de construction.

La bonne conception parasismique d'une structure devrait considérer, au moins, quatre éléments fondamentaux: la forme qui, en plan et en élévation, doit être compacte et régulière; le système structurel de contreventement qui doit suivre les principes de symétrie et continuité; les éléments non porteurs qui doivent être séparés de la structure et fixés, et l'implantation qui doit être choisie en considérant la forme du terrain et les bâtiments voisins.

Une forme régulière en plan permet de faire correspondre le centre de masse et le centre de cisaillement. Pour des formes irrégulières, le risque est que ces deux centres soient éloignés, engendrant ainsi des efforts de torsions supplémentaires dans la structure. Les formes compactes permettent d'atteindre cet objectif, c'est pourquoi il est conseillé de diviser les formes complexes par le biais de joints sismiques (c'est-à-dire de joints qui permettent la déformation d'une structure par rapport à l'autre).

En élévation, une forme simple et régulière produit un emplacement favorable du centre de gravité. Afin de réduire les dangers liés à la torsion, la disposition en plan et en élévation des éléments de stabilisation doit être symétrique par rapport au centre de masse: les solutions les plus favorables sont celles qui produisent une grande distance entre ce centre et les refends. Il est nécessaire ensuite que ces mêmes éléments de stabilisation soient continus à travers tout le bâtiment: chaque décalage ou interruption peut engendrer un risque de rupture locale de la structure.

Tous les éléments non porteurs doivent être, d'une part, séparés de la structure, afin de permettre leur déformation, mais, d'autre part, fixés aux parties porteuses pour ne pas se déverser et constituer ainsi des dangers pour les occupants ou pour les personnes se trouvant à l'extérieur.

L'implantation de la construction doit aussi considérer les risques sismiques, non seulement pour éliminer tout danger de martèlement, mais aussi parce que des terrains escarpés ou avec une morphologie complexe nécessitent des structures adaptées. La régularité étant l'objectif à atteindre, il s'avère nécessaire de diviser aussi la structure des fondations par des joints sismiques.

4.4. Résistance des maçonneries en cas de séisme

La maçonnerie est une technique constructive très répandue du fait de sa simplicité de mise en oeuvre et du coût réduit des matériaux qui la constituent. Du point de vue sismique, elle associe une grande rigidité avec une capacité de déformation réduite, en présentant une rupture fragile [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:265]. Le danger principal pour les maçonneries lors d'un séisme est celui de leur rupture dans la direction perpendiculaire à leur plan à cause des charges transversales. En ce qui concerne la maçonnerie de briques de terre cuite ou de béton, aujourd'hui, on fait recours à une armature verticale et horizontale en acier pour en améliorer la résistance sismique. Le cas des maçonneries en pierre naturelle est traité par analogie à celles de brique, mais en indiquant les différences principales.

4.4.1. Mécanismes de rupture: balancement, glissement des joints et cisaillement

La norme suisse concernant les maçonneries, SIA 266:2003, et celles traitant de la construction en pierre naturelle, SIA V178:1996 et SIA 266/2:2008, proposent une analyse basée sur le principe des champs de contraintes. L'Eurocode 8 et les normes américaines FEMA 310 et 356 proposent une approche qui considère les différents mécanismes de rupture. Cette approche est plus explicite et permet de mieux comprendre les bases de la rupture des maçonneries soumises à des efforts de séisme, c'est pour cela qu'il a été choisi de la reprendre ici de suite et d'en expliquer les particularités liées à l'utilisation de la pierre naturelle.

Trois modes de rupture sont possibles pour une maçonnerie, ce sont la rupture par balancement, ou flexion, (*rocking*); celle par glissement le long des joints d'assise (*sliding*) et celle par cisaillement (*shear*). Dans le cas du balancement, le voile en maçonnerie est considéré comme un élément rigide qui peut basculer. Dans le cas d'une rupture par cisaillement, dans un premier temps on assiste à une rupture le long des joints de mortier (moins résistants) qui peut prendre une forme "en escalier" suivant le cheminement des forces latérales. Cette forme de fissure permet un glissement des parties de la maçonnerie qui peuvent entraîner sa ruine. Un cas encore plus défavorable de rupture par cisaillement est celui qui se présente comme fissuration des parpaings de la maçonnerie, à cause de forces latérales élevées et de leur résistance réduite, ou d'une trop grande résistance du mortier. Les fissures sont, dans ce cas, obliques et forment des plans de glissement très raides qui favorisent la ruine de l'ensemble. Le cas de rupture par glissement des joints d'assise, c'est-à-dire le long des joints horizontaux, peut permettre, dans un premier temps, un comportement en flexion, mais, à long terme, ou sous des forces latérales élevées, peut amener à une rupture par cisaillement.

La prise en compte des différents modes de rupture est importante pour déterminer la déformation qu'une maçonnerie peut admettre. Un comportement de la structure selon le mode de flexion (basculement) permet une grande capacité de déformation tout en restant stable, à la différence de la rupture par cisaillement qui comporte des déformations réduites [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008:278].

Lors de l'action d'efforts latéraux dans une maçonnerie en pierre naturelle, la première phase de déformation suit le mode de flexion, mais, quand les efforts augmentent, la rupture des joints de mortier entraîne un mode par glissement des joints et, dans la phase finale, par cisaillement. Ces modes de déformation ont été observés dans des essais expérimentaux sur une maçonnerie de grès de la Molasse [Devaux, M. 2008; Favez, P. 2007]. La phase de glissement est très longue, vu la grande résistance à la compression des parpaings en pierre naturelle, qui retarde l'apparition de ruptures à travers le matériau. Cette partie est assimilable au mode de rupture par flexion, ce qui fait que la maçonnerie de pierre naturelle non armée présente une bonne capacité de déformation, par rapport à une maçonnerie traditionnelle en terre cuite. Dans le cas d'une maçonnerie formée par des parpaings de roche dure, une longue phase de basculement a été observée (voir le sous-chapitre III.4.5.2.5). Ce phénomène est explicable aussi à travers l'approche proposée par les normes suisses des champs des contraintes. En effet, un voile de maçonnerie est toujours soumis à un effort normal, V , qui est la somme de son poids propre et du poids propre des éléments qu'il soutient. Lors d'un séisme, les efforts latéraux, appliqués sur la structure, subissent une déviation à travers la maçonnerie qui dépend de l'effort normal, du frottement interne des joints des parpaings et de la résistance à compression

des parpaings-mêmes. La force résultante, oblique, est appelée bielle de compression et autour de cette ligne le matériau est soumis seulement à la compression. La résistance à la compression de la maçonnerie influence l'étendue de cette zone de compression: plus cette résistance est élevée, plus la zone est réduite. Dans le cas de la maçonnerie en pierre naturelle, les valeurs de résistance à la compression sont élevées, ce qui permet à la structure de résister à des grands efforts de cisaillement et donc de prolonger le mode de déformation par flexion.

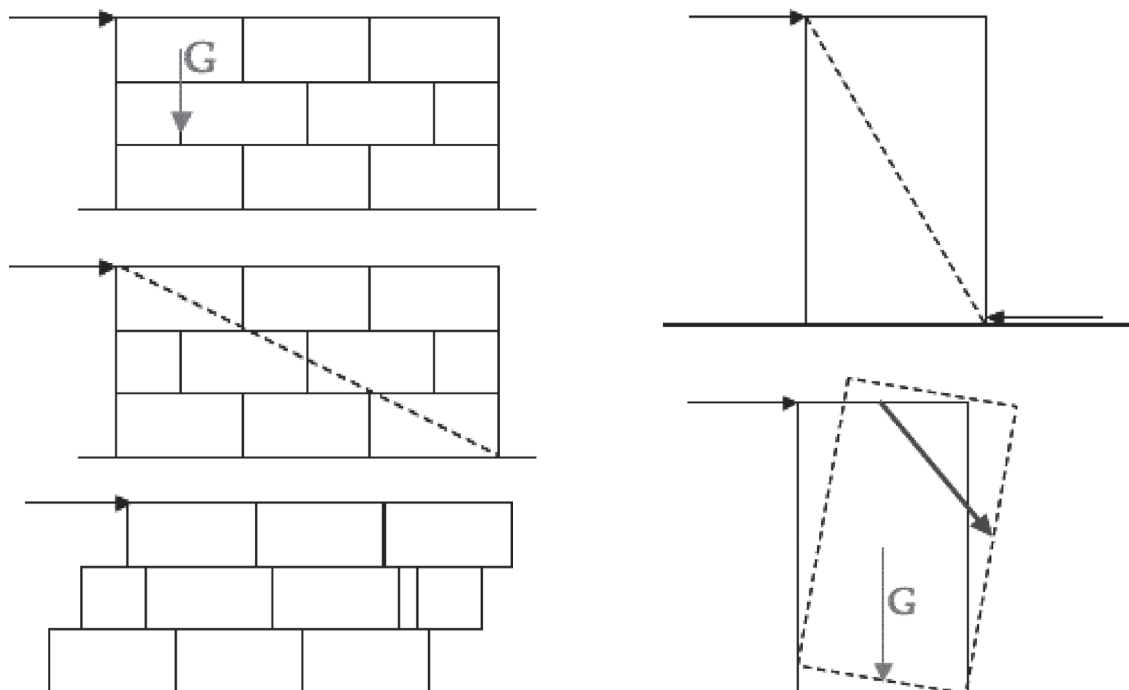


Fig. III.12-13. Mécanismes de rupture dans une maçonnerie en pierre naturelle: cisaillement et glissement des joints. Dans un élément monolithique: cisaillement et basculement

4.4.2. Elancement

Même si une maçonnerie présente une bonne résistance dans son plan, il est toujours nécessaire de garantir que la rupture n'advienne pas dans la direction transversale. Pour réduire ce danger, il faut considérer l'élanement du voile en maçonnerie: c'est-à-dire le rapport entre sa hauteur et son épaisseur structurelle. Selon la Norme SIA 266, cette valeur doit toujours être égale, ou inférieure, à 17. Valeur qui est admise aussi pour la pierre naturelle dans la Norme SIA 266/2:2008. La norme américaine FEMA 310 comporte, par contre, une articulation de cette valeur: pour les étages inférieurs d'un bâtiment elle doit être égale ou inférieure à 18; pour les étages supérieurs, à 14, et pour tous les autres cas à 16. Dans le cas des normes italiennes¹⁹, pays qui comporte des zones à fort risque sismique et un grand patrimoine en maçonnerie, l'élanement des maçonneries en pierre naturelle de taille est toujours considéré comme inférieur à 12 (dans les zones 3 et 4, donc de plus faible risque sismique) et à 10 dans les autres zones²⁰. L'épaisseur minimale est imposée et elle correspond à 240 mm, dans

19. Nous avons considéré deux ouvrages qui traitent de l'application des différentes normes en matière de maçonnerie et résistance aux séismes en Italie: Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006 et Iacobelli, F. 2006.

20. Le territoire italien a été partagé en quatre zones sismiques qui comportent les accélérations maximales au sol suivantes (elles sont rapportées à un sol rocheux très rigide, de catégorie A):

Zone 1: $a_g = 0,35g = 3,43 \text{ m/s}^2$

Zone 2: $a_g = 0,25g = 2,45 \text{ m/s}^2$

Zone 3: $a_g = 0,15g = 1,47 \text{ m/s}^2$

Zone 4: $a_g = 0,05g = 0,49 \text{ m/s}^2$

les zones 3 et 4, et à 300 mm dans les autres [Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006:32]. L'épaisseur de 240 mm est aussi contenue dans les normes allemandes, selon lesquelles un élancement supérieur à 10 est possible seulement pour des maçonneries avec appareillage en pierre de taille soit isodome soit avec assises d'épaisseurs régulières. En tout cas, cet élancement ne dépassera pas 14 [Schneider, K.-J., Schubert, P., Wormuth, R. 1999:223].

La résistance de la maçonnerie est augmentée par l'effet de forme qu'un changement de direction engendre. C'est le cas des murs continus et des angles qui les connectent: le système formé par ces deux murs connectés est plus résistant que les des deux murs séparés grâce à l'effet de stabilisation que l'un a sur l'autre hors du plan. Cet effet de stabilisation nécessite la continuité de la maçonnerie, c'est-à-dire qu'elle ne peut pas être interrompue. Les ouvertures prennent donc la forme de percements et leur nombre doit être limité, au moins dans les parties de maçonnerie nécessaires à la stabilisation de la construction.

4.4.3. Les refends de stabilisation

L'effet de forme cité plus haut peut être augmenté par le recours à des refends connectés à la maçonnerie: ils ont comme effets principaux de diminuer la longueur libre des murs et de les stabiliser hors de leur plan. Les refends assurent également la descente des charges verticales et appartiennent, en conséquence, à la structure porteuse du bâtiment. Les refends peuvent prendre la forme de contreforts ou de murs continus, selon le type, la taille et l'utilisation de la construction.

La haute résistance à la compression de la pierre naturelle (valeur de calcul pour la maçonnerie de 13 MPa contre 3,5 MPa pour la terre cuite) permet de réduire le nombre de refends pour assurer la descente des charges. Ceci a comme effet une augmentation de l'effort normal dans ces mêmes refends, ce qui augmente leur résistance. De plus, la bielle de compression dans un matériau résistant est moins épaisse [Berger, C. 2008].

Dans le cas d'un refend continu, servant à la stabilisation d'un immeuble de plusieurs étages, la hauteur de l'élément est influencée aussi par la nature des planchers qui doivent produire un effet de stabilisation latérale. Un plancher rigide, qui permet une stabilisation latérale optimale, a un effet bénéfique sur la résistance du refend. Normalement, l'on considère surtout les dalles en béton armé comme des éléments rigides dans leur plan, mais, selon les suscitées normes italiennes, des planchers qui comportent au moins une couche de béton armé, solidaire à la structure, de 50 mm le sont aussi [Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006:38]. C'est le cas des planchers mixtes bois-béton ou métal-béton. La distance verticale entre deux planchers est aussi déterminante. Dans les normes italiennes sont admises des distances inférieures à 5 m [*ibid*:32].

Si l'on compare les zones sismiques italiennes avec celles de la Suisse, on s'aperçoit que les deux zones de plus faible sensibilité pour l'Italie comprennent les quatre zones suisses.

Dans le tableau suivant, les valeurs des caractéristiques mécaniques des parpaings en terre cuite et ceux de trois types représentatifs de pierres naturelles suisses sont confrontés (IR: gneiss type Iragna; RS: grès calcaire de Rorschach; RC: calcaire micritique Roc de Cernia) [Berger, C. 2008].

Caractéristique	Evaluation	Terre cuite TC	Pierre naturelle
Résistance à la compression f_{xk}	-SIA 266 §3.1.3.3 -valeurs par les fournisseurs	7 MPa	180 MPa IR 80 MPa RS 92 MPa RC
Valeur de calcul en compression de la maçonnerie perpendiculairement à l'assise f_{xd}	-SIA 266 §4.2.1.1 -SIA 266/2 §2.3.2.2 et §3.1.3.2	3.5 MPa	32.5 MPa / 2.5 13 MPa Tous
Valeur de calcul en compression de la maçonnerie oblique à l'assise f_{yd}	-SIA 266 §4.2.1.2 -SIA 266/2 §4.2.1.2	1.1 MPa	6.5 MPa Tous 13 MPa (Si en bloc) comme façade 2A)
Module de Young E	-SIA 266 §3.1.4.1 -fournisseurs	7'000 MPa	67'200 MPa IR 10'100 MPa RS - RC
Poids volumique γ	- SIA 261 Annexe A -fournisseurs	13 kN/m ³	26 kN/m ³ IR 24.5 kN/m ³ RS 26.3 kN/m ³ RC

4.4.4. La recherche à l'Epfl

Les connaissances en matière de résistance des maçonneries en pierre naturelle en cas de séisme en Suisse sont en développement. On citera, dans le cadre des recherches réalisées à l'Epfl, la thèse de doctorat de Mylène Devaux "Seismic Vulnerability of Cultural Heritage Buildings in Switzerland" [Devaux, M. 2008] ainsi que l'ouvrage de Pierino Lestuzzi et Marc Badoux "Génie parasismique. Conception et dimensionnement des bâtiments", publié par les Presses Polytechniques et Universitaires Romandes [Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008]. En ce qui concerne les essais expérimentaux pour déterminer la capacité de déformation de maçonneries en pierre naturelle, le *Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction (IMAC)* en a réalisé deux: l'un en 2007, dans le cadre de la thèse de Mylène Devaux, et l'autre en 2010, dans le cadre de notre recherche. Ils sont traités en détail par la suite.

4.5. Projets du Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction (IMAC) de l'Epfl

À l'occasion de l'élaboration de mon travail de Master en Architecture, à la Section d'Architecture de l'Epfl, qui traitait d'un projet d'un bâtiment en pierre massive dans le Canton du Tessin, une collaboration avec le *Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction (IMAC)*²¹ de la Faculté Enac a commencé afin de déterminer la résistance en cas de séisme de maçonneries non armées en pierre naturelle. Sous la direction du Dr Pierino Lestuzzi, un travail de semestre pour un étudiant master de la Section de Génie Civil fut lancé. À la suite de cette première expérience positive, d'autres collaborations ont eu lieu, toujours sous la direction du Dr Pierino Lestuzzi.

21. Pour de plus amples renseignements sur les activités de ce Laboratoire, consulter sa page internet: <http://imac.epfl.ch/index.jsp>, consulté le 24.06.2010.

Nous allons exposer ici les travaux effectués dans ce cadre et puis leurs résultats. Un essai expérimental réalisé en 2007, qui ne découle pas de la collaboration citée ci-dessus, est aussi décrit, en raison d'une problématique proche et pour l'importance des résultats pour les projets réalisés après cet essai.

4.5.1. Description des projets réalisés

4.5.1.1. Semestre d'été 2006

Etudiant: Raphaël Dauphin

Titre du projet: "Sécurité sismique d'un bâtiment en maçonnerie de pierres naturelles"

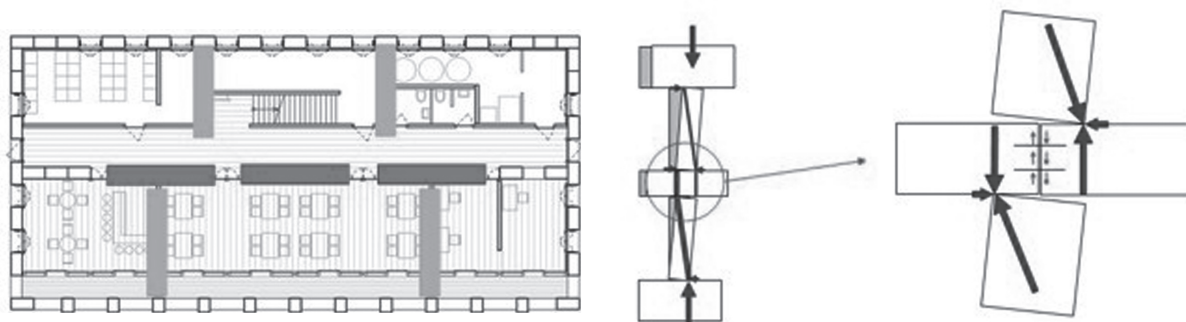


Fig. III.14. Le plan de l'Auberge et les forces agissantes sur une articulation des trilithes de la façade Sud [Dauphin, R. 2006]

Les vérifications réalisées par Raphaël Dauphin en 2006 concernait une auberge de jeunesse de deux niveaux, sans sous-sol, situé dans la commune de Lodrino dans le Canton du Tessin.

La structure porteuse du bâtiment est constituée par les façades et par trois murs de refend longitudinaux en maçonnerie de pierre naturelle non armée: des blocs de gneiss de 220x110x55 cm. Les refends transversaux sont quatre parois à ossature bois et panneaux cloués: ce sont des diaphragmes peu utilisés en Suisse, mais assez diffusés aux Etats-Unis pour la stabilisation en cas de séisme.

Des dalles en bois type planches clouées forment les planchers horizontaux.

Le bâtiment se trouve sur un sol de type C, la zone de séisme est la Z1 et la classe d'ouvrage considérée est la II, vu le caractère public d'une auberge de jeunesse.

Les évaluations ont été effectuées pour vérifier la résistance en cas de séisme de la structure ainsi que la stabilité au déversement des éléments verticaux en pierre naturelle qui forment les trilithes de la façade Sud.

La norme de référence est la SIA 261:2003. Les données concernant la pierre, fournies par le producteur, ont été utilisées. Les caractéristiques des refends en panneaux de bois sont issues de publications scientifiques.

4.5.1.2. Semestre de printemps 2007

Etudiant: Bela Lamoth

Titre du projet: "Construction en pierre massive: étude sismique"

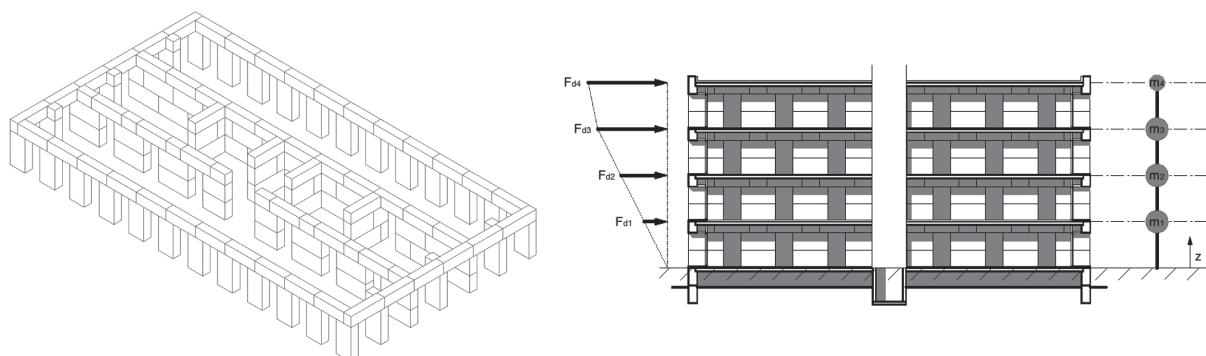


Fig. III.15. Axonométrie d'un étage type de l'immeuble d'habitation et répartition verticale des efforts de séisme [Lamoth, B. 2007]

Ce projet traitait la vérification de la résistance en cas de séisme d'un immeuble d'habitation de quatre niveaux, sans sous-sol, situé dans le Canton du Tessin.

La structure porteuse verticale du bâtiment est constituée par des maçonneries non armées en pierre naturelle formées par des blocs de gneiss de 220x110x55 cm. Les façades sont constituées par des éléments trilithiques.

La cage d'ascenseur est en béton armé.

Deux types de dalles sont considérés: en bois, type planches clouées, et en béton armé.

Le sol de fondation est de type C, la zone sismique est la Z1 et la classe d'ouvrage est la I.

Les évaluations visaient la détermination de la résistance au séisme de la structure.

La norme de référence est la SIA 261:2003.

4.5.1.3. Essai expérimental de 2007

Etudiant: Pascale Favez

Titre du projet: "Détermination de la résistance sismique des maçonneries anciennes par essais expérimentaux"

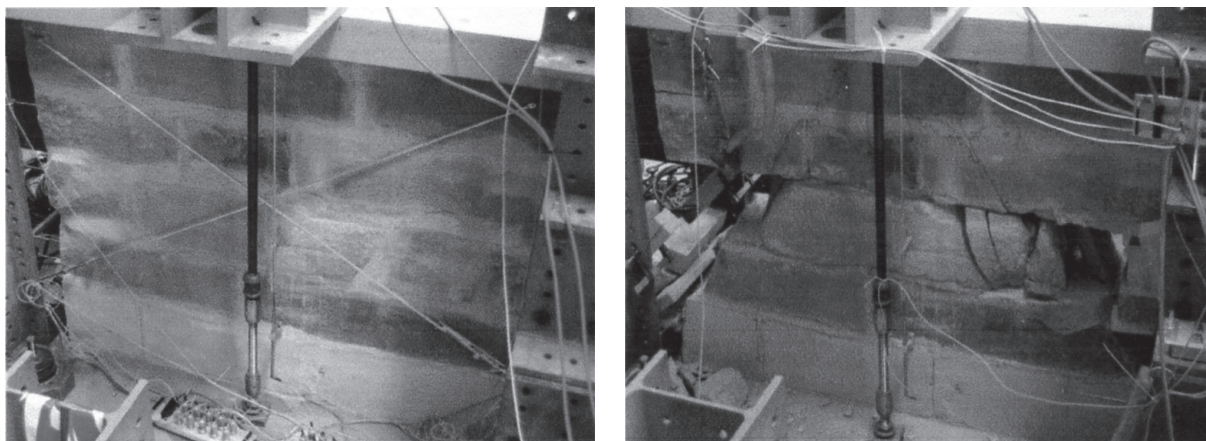


Fig. III.16. Essai expérimental sur une maçonnerie de grès de la Molasse [Favez, P. 2007]

Cet essai, qui a été réalisé comme Projet de Master en Génie Civil, avait comme but la mensuration des déformations d'une maçonnerie de pierre naturelle soumise à des charges cycliques, simulant celles des séismes. Les blocs constituant cette maçonnerie provenaient de la Cathédrale de Lausanne (grès de la Molasse de l'Aquitainien). L'assise de base était, par contre, formée par des blocs de calcaire.

Un mortier de pose à la chaux fut choisi afin de reproduire les caractéristiques d'une maçonnerie historique.

Des essais parallèles ont été effectués pour déterminer la résistance à la compression de la pierre, du mortier et de la maçonnerie.

L'objectif était de mieux comprendre et mesurer le comportement réel d'une maçonnerie de pierre naturelle soumise à des actions horizontales cycliques. Il était important de pouvoir évaluer les modes de rupture par basculement et par cisaillement dans ce type de structure et la capacité de déformation [Devaux, M. 2008; Favez, P. 2007].

4.5.1.4. Semestre d'automne 2008

Etudiant: Christoph Berger

Titre du projet: "L'analyse parasismique d'un immeuble en pierre naturelle"

Le projet avait comme objectif l'étude de faisabilité, sous l'aspect de la résistance en cas de séisme, de deux immeubles de logements situés en Suisse. Les deux immeubles avaient des dimensions en plan semblables ainsi que cinq niveaux (lors des estimations, la hauteur a varié entre quatre et six étages) et un en sous-sol.

La structure porteuse est constituée par des maçonneries non armées en pierre naturelle massive: blocs de 120x30x60 cm. Trois types de roches ont été considérées: gneiss type Iragna; grès calcaire de Rorschach; calcaire micritique Roc de Cernia. Dans la variante 2, l'enveloppe est formée par des éléments de pierre naturelle de grand format: 120x50x280 cm. Le niveau enterré est en béton armé: ce choix semble réaliste dans un contexte urbain, pour l'utilisation de ce niveau pour les caves des logements et pour garantir une bonne transmission des charges au terrain, même dans la cas de sols de qualité moyenne.

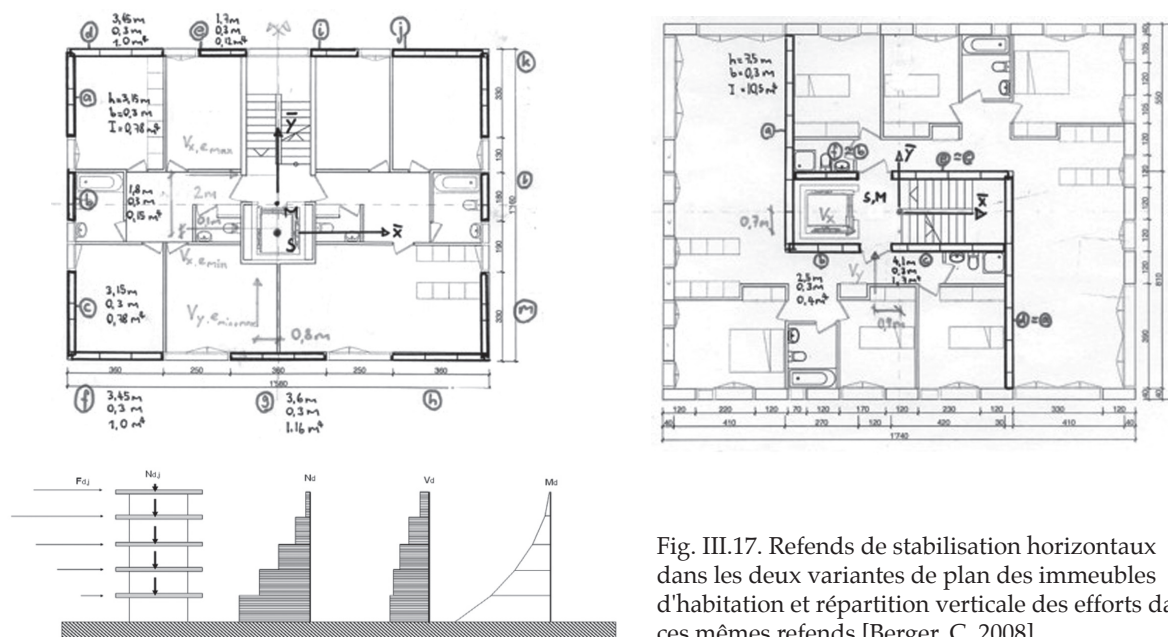


Fig. III.17. Refends de stabilisation horizontaux dans les deux variantes de plan des immeubles d'habitation et répartition verticale des efforts dans ces mêmes refends [Berger, C. 2008]

Les planchers sont constitués soit par des dalles en bois, type planches clouées, soit par des dalles en béton armé.

La cage d'ascenseur est en maçonnerie de briques (silico-calcaires, ciment ou terre cuite).

Les sols de fondations et les zones de séisme sont variables, ceci afin de déterminer les limites d'application. La classe d'ouvrage est la I.

Pour les deux variantes, la résistance en cas de séisme et la sécurité au basculement des maçonneries et des éléments isolés en pierre naturelle ont été considérées.

La norme utilisée est la SIA 261:2003. En ce qui concerne les modes de rupture, leur calcul s'est basé sur la norme SIA 261:2003, l'Eurocode 8 et les recommandations américaines de la FEMA ("Federal Emergency Management Agency").

4.5.1.5. Projet de Master 2010. L'essai expérimental

Etudiant: El Mehdi Khaldoun

Titre du projet: "Détermination du comportement sismique des maçonneries en pierres naturelles par essais expérimentaux. Essai statique cyclique"

Le projet de Master en Génie Civil, réalisé au semestre de printemps 2010 par El Mehdi Khaldoun, avait comme objectif de mesurer et observer le comportement d'une maçonnerie en gneiss soumise à des charges cycliques horizontales. Ceci afin de pouvoir mesurer sa capacité de déformation ainsi que la résistance au cisaillement dans son plan. En effet, même si la capacité de déformation des maçonneries est, généralement, considérée comme réduite, l'essai de 2007 sur une maçonnerie similaire en grès de la Molasse, avait montré qu'elle était sûrement supérieure aux valeurs attendues. En utilisant une roche aux caractéristiques mécaniques et pétrographiques qui se trouvent à l'opposé par rapport au grès de la Molasse, cet essai devait permettre d'augmenter les données sur la capacité de déformation des maçonneries en pierre naturelle.

Le mur, appareillé selon un *opus quadratum* régulier, se compose de quatre assises, chacune formée par deux blocs de gneiss de 80x40x40 cm et d'un bloc de 40x40x40 cm, posés selon leur foliation. La surface de pose a été gardée la plus brute possible, c'est-à-dire proche de l'état de cassure en carrière; les différentes faces ont été simplement retaillées par Olivier Fawer, tailleur de pierre, afin de garantir une certaine rectitude géométrique. La pose et la construction du mur, selon les règles de l'art, a été

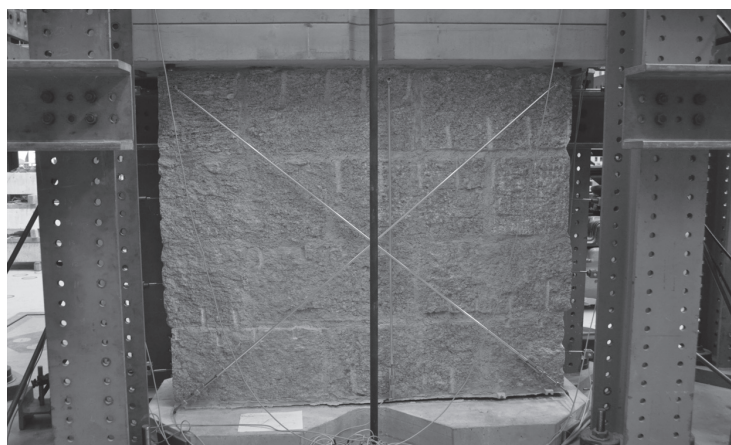


Fig. III.18-19. Essai expérimental sur une maçonnerie en gneiss. À gauche, le basculement du mur entier et, à droite, la rupture par compression d'un échantillon [Khaldoun, E. M. 2010]

faite par Olivier Fawer, avec le support d'El Mehdi Khaldoun et moi-même. Ceci a été une opportunité supplémentaire d'apprentissage. Le mortier utilisé pour les joints était un mortier bâtard formé de trois volumes de sable pour un de liant, ce dernier composé de 2 volumes de ciment Portland pour un de chaux hydraulique naturelle (NHL 5). Pour les joints d'assise le mortier a été mélangé avec du sable de granulométrie 0-3 mm et, pour les verticaux, avec un sable plus fin, de granulométrie 0-1,5 mm. Pour la conduite de l'essai, le premier joint d'assise ainsi que le dernier ont été réalisés avec de la résine époxy à deux composants, type Sikadur, et ceci afin de permettre une meilleure adhésion entre la pierre naturelle et les plaques de béton armé qui ont permis, l'une la pose du mur et l'autre l'application des charges horizontales et verticales au sommet du mur. Parallèlement à la mise en oeuvre de la maçonnerie à échelle grandeur, six échantillons, formés chacun par trois parpaings de gneiss de 30x15x15 cm superposés, ont été préparés afin de réaliser des essais de compression sur la maçonnerie ainsi que des mesures de la résistance au cisaillement.

L'essai a commencé après cinq semaines de séchage du mortier du mur, ce qui a permis le montage du bâti de charge et d'atteindre les caractéristiques mécaniques requises pour le mortier bâtard.

4.5.2. Résultats des projets

4.5.2.1. Semestre d'été 2006

Les vérifications effectuées lors de ce projet ont confirmé qu'un bâtiment de trois niveaux, appartenant à la classe d'ouvrage II, avec structure porteuse en pierre naturelle massive, des refends transversaux en panneaux de bois et des planchers en bois, type planches clouées, peut être construit en zone de séisme Z1 et sol type C.

De plus, les refends longitudinaux en pierre naturelle peuvent assumer une fonction de stabilisation, s'ils sont formés par une maçonnerie appareillée. Pour augmenter la stabilité des refends, des liaisons entre les blocs, sous forme de goujons métalliques, pourraient être nécessaires.

Les éléments verticaux de la façade doivent être liés aux planchers afin d'éviter tout risque de basculement hors du plan. Ces liaisons peuvent être réalisées, par exemple, par des goujons métalliques.

Des fondations en pierre naturelle sont possibles, mais les volumes à mettre en oeuvre sont importants, vu que la transmission des charges horizontales se fait essentiellement par compression. Le poids de la fondation sert pour contrebalancer les poussées et ainsi empêcher la rupture par basculement des refends.

4.5.2.2. Semestre de printemps 2007

Les résultats obtenus lors des vérifications sont moins significatifs que les précédents, mais on peut de toute manière extrapoler quelques principes d'ordre général. Au niveau de la maçonnerie en pierre naturelle, le décollement d'un élément en pierre massive ne signifie pas forcément son basculement. Dans les vérifications effectuées, il a été constaté que ceci est important pour pouvoir évaluer la vraie résistance de la maçonnerie. En cas contraire, tout élément est instable et sujet à ruine par basculement, ce qui semble être invraisemblable. La forme la plus adaptée pour reprendre les efforts horizontaux est celle de la maçonnerie appareillée, comme l'étude précédente l'avait démontré dans le cas des refends.

En ce qui concerne la conception en plan de la structure, il est nécessaire d'éviter toute torsion: le centre de masse et celui de cisaillement devraient idéalement correspondre. Il est donc nécessaire de rendre la structure la plus symétrique possible par rapport à son centre géométrique.

4.5.2.3. Essai expérimental de 2007²²

Lors de l'essai expérimental, il a été possible d'observer les deux modes de rupture principaux pour une maçonnerie de pierre naturelle appareillée: basculement et cisaillement. Une première phase de basculement, qui se traduit par une déformation élastique et donc une dissipation réduite d'énergie, a été observée jusqu'à un déplacement de 6 ‰. Des fissures apparaissent au niveau des joints à partir d'un déplacement de 2 ‰, mais les premières fissures dans les parpaings en molasse se produisent à des déformations supérieures au 6 ‰. Un mode de rupture par cisaillement se met en place et, grâce au glissement aux niveaux des joints et des parpaings, une grande quantité d'énergie est dissipée. Cette phase a continué de manière stable jusqu'à une déformation de 13 ‰. À ce stade une rotation des parpaings est survenue et a produit la ruine d'un bloc, ce qui a déterminé la fin de l'essai. Une capacité de déformation de 10 ‰, unie aux quantités d'énergie élevées dissipées par le mode de rupture en cisaillement, permettent de confirmer la ductilité de la maçonnerie en pierre de taille en appareillage isodome, hourdée au mortier de chaux [Devaux, M. 2008; Favez, P. 2007].

4.5.2.4. Semestre d'automne 2008

Les vérifications effectuées lors de ce projet ont pu profiter des expériences passées soit au niveau de la conception structurelle soit au niveau des procédés de calcul.

La distribution symétrique des murs de refends par rapport au centre du bâtiment a démontré son efficacité soit dans le cas d'une stabilisation par les murs de l'enveloppe soit par ceux du noyau distributif central. La correspondance entre murs porteurs et refends, surtout en ce qui concerne la variante 1, est une solution efficace du point de vue sismique pour des maçonneries en pierre naturelle.

Nous résumons, dans les tableaux qui suivent, les résultats obtenus, selon la variante de bâtiment, la zone de séisme, le type de sol et le nombre de niveaux, en dehors du sol, qui peuvent être construits.

Variantes sans modifications

Variante	Zone Z1		
	Sol A	Sol B	Sol C
Variante 1	6 niveaux	5 niveaux	6 niveaux
Variante 2a	6 niveaux	5 niveaux	6 niveaux
Variante 2b	6 niveaux	5 niveaux	6 niveaux

Variante 1 avec suppression du refend b et épaisseur des refends de 25 cm

Variante	Zone Z1					Zone Z2	
	Sol A	Sol B	Sol C	Sol D	Sol E	Sol A	Sol C
Variante 1	6 niveaux	5 niveaux	6 niveaux	6 niveaux	6 niveaux	6 niveaux	5 niveaux

22. Le résumé des résultats a comme sources le rapport du travail de Master en Génie Civil de Pascale Favez [Favez, P. 2007] et la thèse de doctorat de Mme la Docteur Mylène Devaux [Devaux, M. 2008].

Variante 2a et 2b avec épaisseur du refend de 55cm

Variante	Zone Z1			
	Sol A	Sol B	Sol C	Sol D
Variante 2a	6 niveaux	6 niveaux	6 niveaux	5 niveaux
Variante 2b	6 niveaux	6 niveaux	6 niveaux	6 niveaux

Tous les éléments non porteurs, donc qui ne subissent pas un effort normal dû aux charges verticales, sont instables lors de l'action du séisme et doivent être fixés. Le cas étudié est celui des blocs de façade du dernier étage de la variante 2A, considérés comme éléments non porteurs, ce qui est très conservateur parce que ces éléments portent les planchers du bâtiment. Selon une approche moins conservatrice, les éléments de façade des premiers trois niveaux ne nécessitent pas de fixation parce que l'effort normal en assure la stabilité.

Pour les blocs de pierre massive de 120x50x280 cm, une solution de fixation avec quatre cornières type LNP en acier de 80x40x120x6mm, avec chacune 4 boulons M12, a été vérifiée. Ce mode de fixation est efficace pour un immeuble type 2A de 5 niveaux jusqu'à la zone sismique Z2 et un sol de type C. Les précautions nécessaires sont de prévoir des trous oblongs dans le sens horizontal et une distance depuis le bord du bloc de 5 cm, au minimum, pour le scellement des goujons.

Les cloisons non porteuses doivent être fixées selon les solutions parasismiques habituelles.

4.5.2.5. Projet de Master 2010. L'essai expérimental

L'essai cyclique statique a montré un comportement du mur différent de celui attendu: en effet, le mur a présenté un seul mode de rupture, celui en balancement, et cela jusqu'à une déformation de 12,5 ‰ (ce qui correspond dans le cas de ce mur à 20 mm de déplacement à son sommet), sans présenter aucune forme de rupture par cisaillement, exceptée la rupture du joint d'assise inférieure entre la maçonnerie et la plaque de béton armé (réalisé en résine epoxy). Cette valeur a été atteinte avec une précontrainte verticale, simulant l'effort normal sur le mur, de 480 kN et une force horizontale appliquée au sommet du mur de 370 kN. L'essai a été arrêté à cette valeur de déformation à cause de la nécessité de modifier le bâti de charge pour pouvoir supporter des charges plus importantes.

En tout cas, cette valeur de déformation est bien supérieure à celle normalement considérée pour ce type de maçonnerie qui, selon l'Eurocode 8, est de 8 ‰.

Les essais de compression ont montré que le mortier bâtard, plus souple que la pierre, engendre une rupture à l'intérieur de l'élément en gneiss. La valeur moyenne, mesurée sur trois échantillons de même facture et du même âge, de la résistance à la compression de la maçonnerie est de 32,9 N/mm². Ce qui est en accord avec les estimations faites à l'aide du graphique de la recommandation SIA V178.

Les essais de cisaillement, réalisés sur deux échantillons de maçonnerie en gneiss et deux en molasse, hourdées à la chaux, ont permis de mieux comprendre le comportement observé dans le mur à échelle grandeur. Vu le nombre réduit d'échantillons testés, les résultats ne peuvent pas être généralisés. En tout cas, les mesures montrent une valeur de l'angle de frottement interne de 0,67, ce qui s'approche des valeurs usuelles; par contre, la valeur de la cohésion est de 0,88 MPa, ce qui est très élevé (la valeur obtenue pour les échantillons de molasse varie entre 0,01 et 0,15). Cette valeur élevée de la cohésion, produite probablement par les surfaces de contact très riches en aspérités, permet, en partie,

d'expliquer le comportement du mur comme celui d'un élément solidaire et, en conséquence, sa grande résistance au cisaillement. Malheureusement, le nombre d'échantillons restreints ne permet pas de généraliser les résultats obtenus (selon l'Eurocode, il est nécessaire de disposer de douze échantillons).

Le comportement du mur, et les valeurs mesurées, ont permis une comparaison avec les valeurs issues de différentes normes: la norme suisse SIA 266:2003, l'américaine FEMA 356 et les Eurocodes 6 et 8. L'évaluation de la rupture en balancement par ces méthodes simplifiées donne des résultats en accord avec ceux mesurés, mais celle de la rupture en cisaillement est fortement sous-estimée.

En synthèse, l'essai réalisé n'a pas encore été terminé et à cause de cela, aucun résultat général ne peut être déduit. Pour l'instant, le mode de rupture prépondérant est celui par balancement (*rocking*) qui, jusqu'à une déformation de 12,5 ‰, reste stable. En plus, les courbes hystérétiques montrent que le plateau plastique n'a pas encore été atteint, cela signifie que le comportement de la maçonnerie est, jusque là, élastique: peu d'énergie est dissipée par le mode de rupture en balancement, mais aucune perte de résistance n'a été mesurée. Le mur est donc intact.

Les essais de résistance au cisaillement montrent une forte cohésion de la maçonnerie, ce qui pourrait expliquer la prépondérance du mode de rupture par balancement.

Il est donc nécessaire de terminer l'essai afin de pouvoir mesurer et observer l'évolution du mode de rupture: surtout pour déterminer à quel moment le mode par cisaillement survient, sous quelle forme (rupture des joints ou fissures obliques dans les parpaings), si cette forme est stable et si elle permet de dissiper de l'énergie.

4.5.3. Synthèse des résultats

La première conclusion qu'il est possible d'énoncer, d'après les résultats issus des projets réalisés au sein du Laboratoire IMAC depuis 2006, est que la construction en pierre naturelle sous forme de maçonneries est résistante du point de vue sismique pour la réalisation d'immeubles d'habitation de taille moyenne en Suisse.

L'essai expérimental de 2010 a permis, pour le moment, non pas de produire des données généralisables, mais de valider les hypothèses quant à la capacité de déformation de la maçonnerie en pierre naturelle, qui avaient servi pour les vérifications de la résistance au séisme des structures analysées avec les projets de semestre de 2006, 2007 et 2008. L'essai a validé ces hypothèses pour une maçonnerie de gneiss hourdée au mortier bâtard, ce qui représente un cas défavorable du point de vue de la ductilité des composants.

L'essai expérimental de 2007 avait déjà confirmé ces hypothèses pour des grès de la Molasse hourdés à la chaux et, en plus, il avait permis d'observer un mode de rupture par cisaillement assez stable.

Des immeubles de petite taille, sur une hauteur de trois niveaux, appartenants à la classe d'ouvrage II (bâtiments publics et à forte fréquentation) peuvent être construits en Suisse en zone de séisme Z1 et sur des sols de classe C. Les planchers de ces immeubles, assurant le transfert des charges horizontales, peuvent être réalisés par des dalles en bois massif, type planches-clouées. Des éléments semblables en panneaux cloués peuvent être utilisés comme refends de stabilisation. Une fondation en maçonnerie de pierre naturelle est aussi envisageable.

Des immeubles d'habitation, comportant deux appartements par étage, peuvent être construits en Suisse et stabilisés à l'aide de maçonneries non armées en pierre naturelle de taille.

Si la structure de stabilisation est composée des murs périphériques ainsi que d'un mur de refend central, d'une épaisseur de 25 cm, ces immeubles peuvent atteindre une hauteur de cinq niveaux en zone de séisme Z2 sur un sol de type C ou dans la zone Z1 sur un sol de type B.

Pour des immeubles qui sont stabilisés uniquement par un noyau en maçonnerie de pierre naturelle d'une épaisseur de 55 cm, la hauteur est de six niveaux dans la zone de séisme Z1 sur un sol de type D.

Les structures horizontales, devant servir à la répartition des efforts, sont à réaliser par des dalles en béton armé ou par d'autres solutions constructives assurant une rigidité suffisante.

Les éventuels éléments porteurs en pierre naturelle de la façade, qui n'ont pas un rôle de stabilisation de l'immeuble, doivent être fixés, par le biais, par exemple, de goujons en acier inox scellés, seulement au dernier étage (cinquième ou sixième) afin d'en empêcher le déversement.

Nous pouvons donc affirmer que, dans le cas de la construction d'immeubles d'habitation de taille moyenne en Suisse, la résistance en cas de séisme n'est pas un obstacle à l'utilisation des maçonneries non armées en pierre naturelle pour la réalisation des structures porteuses et des refends.

4.6. Principes de conception pour la Suisse

4.6.1. Conception de la structure

Les études effectuées jusqu'ici ont démontré que la conception de la structure, autant en plan qu'en élévation, assure un bon comportement en cas de séisme, ceci aussi pour des bâtiments en maçonnerie de pierre naturelle. Cette observation est en accord avec la littérature.

Il est important de veiller à la correspondance entre la fonction porteuse d'un mur et celle de stabilisation. En effet, un mur porteur en maçonnerie est soumis à un effort vertical produit par le poids propre des éléments qu'il soutient: maçonneries et planchers. Cet effort normal est bénéfique pour la stabilité de la maçonnerie aux efforts horizontaux.

Pour les mêmes raisons qu'au point précédent, il s'avère que des maçonneries avec une masse constante sur toute leur hauteur sont plus adaptées que celles avec une section décroissante vers le haut. Cette affirmation semble être en contradiction avec les coutumes anciennes, mais il est nécessaire de considérer le fait que les maçonneries analysées dans le cadre de notre recherche possèdent des épaisseurs minimales. C'est-à-dire que leur épaisseur à la base correspond souvent à l'épaisseur minimale, au sommet, des maçonneries anciennes. Dans des cas particuliers, pour lesquels des maçonneries de forte épaisseur seraient requises à la base, une réduction de leur épaisseur dans les étages supérieurs peut être envisagée.

Les cloisons non porteuses en pierre naturelle sont à éviter à cause de leur poids élevé. Ceci est un désavantage du point de vue sismique surtout dans les niveaux les plus élevés du bâtiment parce que ce poids est mis en oscillation par les secousses.

4.6.2. Maçonneries en pierre naturelle

Du fait que le mode prépondérant de rupture est celui par cisaillement, par rapport à celui par basculement, le problème de la résistance du joint entre les blocs réacquiert de l'importance. En effet, il est important de veiller à la rugosité des surfaces des contacts, à la qualité des mortiers de pose et, dans les cas de zones à haute sensibilité sismique ou de sols de mauvaise qualité, à l'adoption de solutions techniques de liaison entre les pierre naturelles.

En ce qui concerne la mise en oeuvre, il est impératif que tous les joints, horizontaux et verticaux, soient remplis de mortier.

Pour le cas Suisse, la maçonnerie traditionnelle de pierre de taille non armée a démontré une bonne résistance en cas de séisme, jusqu'à la zone de séisme Z2 et des sols de type C. Ceci signifie que des solutions plus complexes au niveau de l'appareillage des pierres ou des liaisons sont nécessaires seulement pour un petit nombre d'ouvrage de la classe I. Dans le cas d'ouvrages de classe II, des solutions plus performantes devraient être probablement étudiées.

Les éléments porteurs isolés qui se trouvent aux étages les plus élevés d'un bâtiment doivent être reliés aux planchers afin d'éviter tout risque de basculement. Ceci est particulièrement nécessaire pour les éléments de l'enveloppe à cause du risque de déversement sur les espaces environnants l'édifice.

4.6.3. Planchers

Les planchers doivent distribuer de façon homogène les efforts sur l'ensemble des refends, pour cela une rigidité élevée est nécessaire. Comme il a été démontré lors des vérifications, des planchers en béton armé sont une solution valable de ce point de vue.

Des dalles en béton armé coulées sur place ou alors des planchers en béton armé préfabriqués avec joints coulés sur place sont à retenir.

Pour des bâtiments de hauteur jusqu'à trois niveaux, des planchers en bois massif type planches clouées garantissent aussi la rigidité demandée.

L'utilisation de planchers mixtes bois-béton dans le cas de bâtiment de hauteur moyenne reste encore à vérifier. Leur rigidité dépend en particulier des connexions entre les éléments en bois, de l'épaisseur du béton mis en oeuvre et de la qualité de la connexion entre bois et béton. Si l'on se réfère aux normes de construction parasismique italiennes, cette solution est validée pour autant qu'une épaisseur de béton armé d'au moins 5 cm soit mise en oeuvre et que la connexion avec la dalle en bois se fasse par des connecteurs qui assurent le transfert des charges par cisaillement [Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006:38].

La connexion entre le plancher et la maçonnerie est à soigner afin de rendre possible le transfert des efforts par le biais de ce voile horizontal. Dans le cas des dalles en béton armé coulé sur place, la rugosité de la surface de la maçonnerie doit être suffisante pour garantir ce transfert par frottement. Elle peut être augmentée par un traitement de surface adapté (bouchardé grossièrement, charrié, strié), par la découpe dans les éléments de pierre naturelle d'entailles, soit en positif soit en négatif, ou encore par des éléments de connexions, tels des goujons en acier inox ou des fers d'armature. Nous avons constaté, lors de l'essai expérimental de 2010, que la surface brute de cassure des gneiss produite par la

perforation et par les coins écarteurs présente, naturellement, des aspérités qui pourraient, dans le cas d'une dalle en béton armé, servir d'entailles pour la connexion. Pour les dalles en béton armé coulées sur des éléments préfabriqués la connexion se réalise soit par frottement, si l'appui est coulé, soit par le biais de connecteurs.

Pour des planchers en bois, le type de connexion dépend de la nature de la structure: c'est-à-dire qu'un plancher massif, en panneaux ou en planches-clouées, peut être lié à la maçonnerie par le biais de connecteurs, type goujons en acier inox, ou alors par des entailles pratiquées dans le bois qui se connectent à des "tenons" taillés dans la pierre naturelle (ou l'inverse). Un plancher réalisé, par contre, par un système d'ossature est lié à la maçonnerie soit à chaque tête de poutre, solution qui nécessite le recours à des goujons et qui risque d'être assez fragile, soit à travers une sablière continue en périphérie du plancher et qui est ensuite fixée ponctuellement à la maçonnerie à travers des goujons. Cette dernière solution permet non seulement une meilleure répartition des efforts, mais elle simplifie aussi la mise en oeuvre et le réglage de la planéité du plancher. Le simple frottement entre les deux structures ne permet pas un bon transfert des charges et les éléments en bois risquent l'écrasement par le poids propre de la maçonnerie en pierre naturelle.

Pour les planchers mixtes bois-béton valent les mêmes considérations que pour les planchers en bois, mais la connexion pourrait être assurée à travers l'armature de la couche supérieure si elle est insérée dans la maçonnerie. Cette solution s'apparente à celle utilisée dans la rénovation lors de l'augmentation de la rigidité des planchers en bois par ajout d'une couche de compensation en béton armé [Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006:303-307; Iacobelli, F. 2006:207-211; Tubi, N., Silva, M. P. 2003:314].

Une dernière variante est constituée par une connexion entre la maçonnerie en pierre naturelle et les planchers faite par l'intermédiaire d'un chaînage continu (Planche X et sous-chapitre III.2.4.8). Le plancher est donc fixé ponctuellement à cet élément à travers des connecteurs. Pour la liaison du chaînage à la maçonnerie, s'il est réalisé en béton armé coulé sur place, valent les mêmes principes que pour les dalles en béton armé. Dans le cas d'un chaînage préfabriqué, il est nécessaire de recourir à des connecteurs.

Selon la solution constructive adoptée pour l'isolation du mur, le type de connexion est à mettre en oeuvre de manière à éviter tout pont de froid, ceci est valable surtout lors de l'utilisation de connecteurs mécaniques métalliques.

4.6.4. Fondations

Les fondations servent, en statique, à la transmission des charges fixes et d'utilisation, auxquelles la structure est soumise, vers le terrain. Dans le cas d'une structure en maçonnerie, les fondations peuvent donc être conçues comme des structures soumises à des efforts de compression et donc être réalisées aussi en pierre naturelle. Elles sont formées par des assises de pierre de taille, liées au mortier, atteignant la profondeur dictée par le gel et, en coupe, elles assument un profil évasé vers le bas, selon un rapport minimal de 2 sur 3, qui est celui contenu dans la Recommandation SIA V178:1996 pour la diffusion de charges concentrées [SIA V178 1996:13]. Dans le cas d'efforts dynamiques, tels ceux du vent, ce type de fondation, qui possède une masse élevée est, en général, suffisant pour la stabilisation de maisons ou de petits immeubles. La réalisation d'un niveau en sous-sol, qui constitue

par sa structure aussi une fondation, peut être fait en maçonnerie de pierre naturelle, mais il faut veiller à une mise en oeuvre soignée surtout au niveau de l'étanchéité et des drainages. En tout cas, pour une affectation d'habitation, il est nécessaire de réaliser soit un radier, soit une dalle reposant sur des semelles, en béton armé, parce que ce matériau peut aisément reprendre les éventuels efforts de flexion engendrés par des tassements du terrain ou par des sollicitations horizontales.

Dans le cas du projet parasismique de la structure, les efforts dynamiques horizontaux sont élevés et doivent donc être considérés dans la conception de la structure. Dans ce cas de figure, les fondations ne sont plus simplement des structures soumises à des efforts de compression, mais aussi à des efforts de flexion engendrés par les forces horizontales cycliques des secousses sismiques. La maçonnerie formant la fondation doit donc pouvoir transmettre au terrain ces efforts, sans fissures ou cassures qui pourraient porter préjudice à sa résistance.

Dans le cas d'une maison ou d'un petit immeuble, une solution constituée par des fondations en pierre naturelle de taille pour la structure semble possible, comme démontré par le projet de semestre IMAC 2006 [Dauphin, R. 2006]. Il faut dimensionner la fondation afin que son poids propre soit suffisant à contrebalancer les efforts horizontaux. Ceci peut, parfois, représenter une grande quantité de pierre naturelle, et donc remettre en cause, selon les cas, le recours à cette solution. Un niveau en sous-sol, réalisé entièrement en pierre de taille, pourrait aussi améliorer le comportement de la structure de fondation et permettre une meilleure stabilisation, ainsi qu'une réduction de l'épaisseur de la maçonnerie.

Pour les immeubles d'habitation étudiés, comme par exemple celui du projet de semestre IMAC 2008 [Berger, C. 2008], dont la hauteur peut atteindre cinq à six niveaux, la réalisation d'un, ou de deux niveaux en sous-sol est une nécessité qui découle tout d'abord du programme, mais cet élément contribue également à la stabilisation de l'ensemble. Sa construction en béton armé semble, à l'heure actuelle, constituer un avantage autant au niveau de la résistance que de celui de la mise en oeuvre. Une réalisation entièrement en pierre naturelle peut être envisageable si la ressource est disponible et si les conditions géotechniques sont favorables, surtout en ce qui concerne l'absence de nappes phréatiques proches de la surface.

Pour les fondations en pierre naturelle, il est nécessaire d'utiliser des roches très résistantes soit au niveau mécanique soit aux agents atmosphériques. Elles doivent posséder une porosité connectée réduite, afin d'éviter tout phénomène de remontée capillaire. Les roches cristallines sont les mieux adaptées, suivies par les calcaires durs et quelques grès siliceux ou coquilliers. Il faut contrôler la présence de sels dans le terrain ou leur production par des activités dans les environs de la construction: si leur concentration est trop élevée, il est conseillé de renoncer à l'utilisation de la pierre naturelle. Des mortiers perméables à l'eau doivent toujours être mis en oeuvre afin de concentrer au niveau des joints les éventuelles infiltrations. Une couche étanche au dessus du niveau du terrain doit être prévue afin de réduire toute remontée capillaire à travers les murs.

Pour la fondation en béton armé, le point à soigner est celui de la connexion entre ce matériau et la maçonnerie en pierre de taille. Une couche étanche doit être prévue. La forme plus simple de connexion est celle basée sur une pose au mortier de la maçonnerie en pierre naturelle directement sur les fondations en béton. Pour ce faire, il est nécessaire de rendre la surface du béton rugueuse afin

de permettre un bon accrochage du mortier par piquage du béton durci ou par une autre forme de démolition de la surface lors du décoffrage. Dans ce cas de figure, la couche étanche ne peut pas être posée entre la maçonnerie et le béton, il faut donc prévoir de réaliser un joint injecté dans le béton armé pour la coupure de la capillarité. Le recours à un mortier de ciment, plus étanche, est à éviter à cause des sels alcalins qu'il contient et qui peuvent nuire à la durabilité de la pierre naturelle. Les mortiers à la chaux ou bâtards possèdent, en plus, une certaine élasticité qui ne peut qu'être bénéfique pour le comportement de la structure.

Pour des sollicitations sismiques plus élevées, le recours à un système de fixation mécanique peut se rendre nécessaire. Dans ce type de fixation, le système le plus simple est celui de goujons de connexion qui transmettent les efforts par cisaillement: ils doivent être toujours en acier inox ou dans un autre alliage inoxydable et scellés soit au mortier soit avec une résine, définie par le fabricant. Le désavantage principal de ces éléments, du point de vue de la mise en oeuvre, c'est qu'ils ne permettent que peu d'ajustements dans la pose, ce qui n'est pas toujours en accord avec les tolérances de la construction en maçonnerie. La réalisation de trous oblongs pourrait, partiellement, pallier à ce défaut tout en permettant une certaine déformation au niveau de ces éléments de connexion, ceci à condition que la résine utilisée pour le scellement ne soit pas trop rigide.

La dernière possibilité, qui ne nous semble pas nécessaire dans le cas des immeubles étudiés et des zones de séisme suisses, est de profiter de ce changement de matériau pour réaliser une isolation sismique de la base. Différentes solutions techniques existent aujourd'hui et elles sont toutes basées sur des éléments amortisseurs qui permettent de dissiper l'énergie du séisme.

4.6.5. Appareillage, liants et liaisons mécaniques des parpaings formant la maçonnerie

La résistance en cas de séisme d'une maçonnerie est influencée par son appareillage. Comme il a été noté plus haut, la résistance mécanique des parpaings détermine la résistance au cisaillement de la maçonnerie au même titre que le type de liant utilisé pour les hourder. L'hypothèse que les projets réalisés en collaboration avec le Laboratoire IMAC avaient comme objectif de valider était la possibilité d'utiliser des maçonneries non armées. À la lumière des résultats obtenus, surtout grâce aux essais expérimentaux de 2007 et 2010, la maçonnerie non armée de pierre naturelle avec appareillage isodome représente, au moins en Suisse, une solution constructive qui répond aux exigences actuelles en matière de construction parasismique. Sa simplicité de mise en oeuvre et donc son économie, ainsi que sa durabilité et facilité de réutilisation, sont des arguments suffisant pour la préférer à des solutions plus complexes, tels, par exemple, la maçonnerie armée. Il est évident que pour réaliser des maçonneries au-delà de la zone de séisme Z2, des solutions spécifiques doivent être développées. Dans le cadre de notre recherche, ces solutions sont énoncées sous la forme de propositions et de principes, sans que ces dernières aillent pu bénéficier d'essais et de validations expérimentales.

Une première forme d'amélioration des performances de la maçonnerie se situe au niveau de l'appareillage et de la forme des parpaings. En effet, les mortiers servent surtout à répartir les efforts plutôt qu'à lier les parpaings. Il est inutile de vouloir à tout prix améliorer cet effet adhésif, en utilisant, par exemple, des résines, parce que ceci pourrait avoir des effets nuisibles, dans la mesure où les efforts se transmettraient seulement par cisaillement entraînant des cassures diagonales, dangereuses pour la sécurité structurelle. Il est préférable d'augmenter, par contre, la capacité de

déformation de la maçonnerie. Ceci peut se traduire par une réduction du risque de glissement au niveau des joints d'assise. Nous avons constaté que, dans le cas de la maçonnerie en gneiss utilisée pour l'essai expérimental de 2010, les glissements des joints d'assise sont réduits grâce à la rugosité de la surface d'assise et des aspérités, marquées, qu'elle comporte. L'augmentation de la rugosité des surfaces des assises est donc une première forme d'amélioration du comportement de la maçonnerie au niveau de son appareillage. Une forme plus complexe serait d'appareiller les parpaings afin de produire des ruptures dans la continuité des joints horizontaux, tout en conservant leur forme de parallélépipèdes. Ceci nécessite donc de prévoir des éléments de tailles différentes afin d'éviter la pose en délit. La continuité des joints d'assise horizontaux peut être interrompue aussi par la modification de la forme du parpaing, par exemple en introduisant des côtés diagonaux. Il est évident que ce type d'éléments peut engendrer une certaine difficulté dans la production, surtout au niveau des chutes de découpe. Il faut aussi veiller à ce que les joints ne deviennent pas des surfaces de glissement, par exemple aux bords de la maçonnerie. Un autre détail à soigner est celui de l'angle: en effet, la forme du parpaing détermine des assemblages complexes dans les trois dimensions. La forme du parpaing doit toujours être choisie en fonction des techniques de production et du type de pierre naturelle. Cette solution qui augmente la cohésion du système de la maçonnerie est souhaitable si, et seulement si, la pierre naturelle utilisée possède des caractéristiques mécaniques telles que les efforts de cisaillement peuvent être repris sans engendrer des cassures dans la roche. Ce mode de découpe des éléments en pierre naturelle pourrait, mais cela demanderait des essais expérimentaux, permettre une mise en oeuvre selon un procédé à sec.

La deuxième forme d'augmentation de la cohésion de la maçonnerie concerne les liaisons entre les parpaings, mais sans changement de la nature du mortier. Elle se réalise en faisant recours à des connecteurs. C'est une technique très ancienne, déjà utilisée dans la construction égyptienne sous forme d'éléments de connexions soit en bois soit en plomb ou bronze et très répandue dans la construction grecque. Le matériau constitutif des connecteurs détermine les possibles risques liés à son altération et qui peuvent avoir des effets nuisibles sur la maçonnerie en pierre naturelle. Des connecteurs métalliques oxydables, par exemple, augmentent en volume lors de l'oxydation. Cette dilatation peut engendrer des efforts ponctuels élevés au niveau de la pierre et, en conséquence, sa fissuration et cassure. Il est de même pour les connecteurs en bois qui se dilatent selon la variation de l'hygrométrie. Le connecteur devrait être réalisé par des matériaux élastiques afin de permettre une certaine déformation de l'ensemble sans se casser et sans engendrer, si trop rigide, des contraintes seulement dans les parpaings de pierre naturelle. Une autre forme de connexion peut être réalisée par l'intermédiaire de goujons en acier inox. Ce système possède deux désavantages principaux: premièrement, il nécessite de percer les pierres et donc de les poser avec un degré de précision qui n'est souvent pas en accord avec le mode de construction de la maçonnerie et, deuxièmement, les goujons doivent être scellés à la résine, ce qui réduit la souplesse de l'ensemble et la possibilité de réutilisation des parpaings.

5.1. La législation suisse en matière d'énergie

La politique suisse en matière d'énergie est aujourd'hui ancrée dans la *Constitution*: l'Art. 89 statue que la Confédération et les Cantons s'emploient à promouvoir une: «consommation économe et rationnelle de l'énergie» [Cst Art. 89]. L'alinéa 4 du même article mentionne que les mesures qui concernent la consommation d'énergie dans les bâtiments sont: «au premier chef du ressort des cantons» [Cst Art. 89 al. 4].

Au niveau de la législation fédérale en matière d'énergie, actuellement, on dispose de deux textes qui en donnent les lignes principales. Le premier est la *Loi sur l'énergie*, du 26 juin 1998 (LEne). Cette loi a comme but l'application des principes énoncés dans l'article de la *Constitution*, dans les domaines de l'approvisionnement et de l'utilisation de l'énergie. Elle a été suivie par l'*Ordonnance sur l'énergie*, du 7 décembre 1998 (OEne).

Le deuxième texte est celui sur la réduction des émissions de CO₂ dues à l'utilisation de sources d'énergie fossiles: la *Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂*, du 8 octobre 1999 (Loi sur le CO₂). Cette loi fixe les objectifs de réduction des émissions de CO₂ pour 2010, en favorisant l'utilisation économe de l'énergie ainsi que le recours à des formes renouvelables d'énergie.

En matière de construction et de bâtiments, la Confédération s'est faite promotrice, par le biais de son *Office de l'énergie* (OFEN), du programme de recherche "Energie dans le bâtiment" qui, pour la période 2008-2011, a comme points clés, entre autres, de promouvoir les technologies d'utilisation de la chaleur ambiante et solaire, ainsi que les technologies et solutions globales possédant un rendement maximum et un minimum d'émissions²³. Les objectifs pour 2050 sont, au niveau des bâtiments, la renonciation aux combustibles fossiles pour la préparation de l'eau chaude sanitaire et la réduction de la moitié de la consommation énergétique. Selon le "Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération pour les années 2008 à 2011", la conception de bâtiments doit être optimisée en vue de l'établissement d'une "Société 2000 watts", tout en maintenant la diversité architecturale et en utilisant de manière passive l'énergie solaire, par le biais de concepts de refroidissement alternatifs pour les constructions à basse consommation d'énergie ainsi que d'isolations thermiques et de vitrages à haute performance [OFEN, 2007]. Les objectifs et les dispositifs suggérés par le principe de la "Société 2000 watts" semblent, à l'heure actuelle, être les seuls en Suisse qui visent non seulement des réponses technologiques aux préoccupations de la réduction de la consommation énergétique, mais aussi des solutions architecturales.

Les objectifs contenus dans les "Objectifs de performance énergétique SIA" de 2006 se concentrent sur la réduction de l'énergie primaire pour le chauffage, l'eau chaude et l'électricité. Pour les habitations, la valeur cible est de 440 MJ/m²a (840 W/personne), pour les bâtiments de bureaux de 480 MJ/m²a (75 W/personne) et pour ceux scolaires de 350 MJ/m²a (35 W/personne).

23. Voir à ce propos la page de l'Office fédéral de l'énergie <http://www.bfe.admin.ch/forschunggebaeude/02084/index.html?lang=fr>, consultée le 23.06.2010.

5.1.1. Points traités par cette recherche

L'hypothèse de fond, commune aux différents textes susmentionnés, est la réduction de la consommation de l'énergie dans le bâtiment, en particulier dans le chauffage, le refroidissement, la préparation de l'eau chaude sanitaire, et dans l'utilisation de l'électricité.

Dans le cadre de la présente recherche sont traités surtout les points qui concernent le chauffage et le refroidissement, ceux qui sont donc directement liés à la conception du bâtiment et à sa construction, en rapport avec l'état de la connaissance dans le domaine de la construction massive. Le principe de l'accumulation est néanmoins l'une des deux solutions possibles dans le projet de constructions à basse consommation énergétique, l'autre étant celui de l'isolation [Deplazes, A., éd. 2005]. Ce type de construction est, sous nos latitudes, peu traité dans le débat sur la réduction des dépenses énergétiques à cause de la quête continue de l'amélioration des performances de l'isolation qui se traduit, en général, par l'utilisation de structures légères fortement isolées²⁴. Comme préambule, on traitera aussi des possibles scénarios du futur, c'est-à-dire des effets du réchauffement climatique qui pourraient influencer directement la consommation énergétique et le confort dans le bâtiment.

Nous essayerons de remettre au centre des préoccupations l'Homme, et par conséquent la notion même de confort, ainsi qu'une approche globale dans la solution des problèmes, tâche propre au travail de l'architecte, qui devrait appliquer des connaissances de pointe afin d'établir des solutions simples et viables pour l'environnement et ses occupants [Hönger, C., Brunner, R., Menti, U.-P., Wieser, C. 2009:22]. Une démarche qui a été qualifiée de "méthode empathique" en opposition à celle "compensatoire" qui vise à compenser par des installations techniques les variations des conditions climatiques [*ibid*:44].

La littérature considérée provient d'aires géographiques variées et traite de type de constructions différents: dans chaque cas, nous avons relevé ce qui est d'ordre général, et donc applicable à tout cas de figure, et ce qui est particulier, donc en rapport à la zone climatique de l'étude et aux matériaux utilisés.

5.2. Le réchauffement climatique. Des contraintes pour demain

Pour traiter des influences que le réchauffement climatique aura sur le bâtiment, notamment en ce qui concerne le chauffage et le refroidissement, on se base essentiellement sur trois articles publiés, entre autres personnes, par des collaborateurs du *Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche* (EMPA). Leur importance dans le cadre de cette recherche réside dans le fait qu'ils traitent le cas de la Suisse et de son climat.

L'importance de l'étude des impacts des changements climatiques, qui seront visibles dans un futur proche (25 à 50 ans), est justifié dans le cas des bâtiments en Suisse parce que leur durée de vie moyenne est estimée entre 50 et 100 ans [SIA 260 2003:19]. Il est nécessaire, par conséquent, que les bâtiments projetés et construits aujourd'hui puissent répondre aux exigences actuelles, mais aussi, dans la mesure du possible, aux futures.

24. Ceci n'a pas toujours été le cas, parce qu'après la crise pétrolière des années 1970, une des mesures préconisées pour améliorer la performance énergétique des bâtiments fut celle d'une augmentation de l'inertie thermique [Hönger, C., Brunner, R., Menti, U.-P., Wieser, C. 2009:33].

Les articles de Christenson [Christenson, M. et al. 2006] et de Frank [Frank, Th. 2005] traitent de la variation de la demande en énergie des bâtiments suite aux changements climatiques futurs. Frank [Frank, Th. 2005] démontre, à travers des simulations effectués avec le logiciel HELIOS sur un bâtiment résidentiel et sur un administratif, les deux situés à Kloten, Canton de Zurich (climat représentatif du Plateau Suisse), que la prise en compte des changements climatiques produira une réduction dans la demande d'énergie pour le chauffage et une augmentation de la demande d'énergie pour le refroidissement, surtout dans le cas du bâtiment administratif. La période considérée s'étend jusqu'à 2100. L'auteur a utilisé quatre différents scénarios climatiques pour les calculs (données climatiques actuelles; augmentation de la température moyenne de 0,7°C; de 1,0°C et de 4,4°C). Les bâtiments choisis représentent un type général suisse, dont la taille est de 30x12x10 m avec structure lourde. Trois niveaux d'isolation thermique de l'enveloppe ont été utilisés dans les simulations. La température intérieure de chauffage choisie a été de 20°C et celle de refroidissement de 26°C. Les résultats montrent qu'il existe un risque de surchauffe estivale (8 à 29 jours, selon le scénario climatique) aussi dans le cas d'un bâtiment de logement bien isolé, s'il n'y a pas de ventilation nocturne. En ce qui concerne la demande en énergie de chauffage pour le bâtiment de logement, on observe une réduction variable entre 8-13 % et 33-44 %, par rapport à aujourd'hui, et ceci pour tous les niveaux d'isolation de l'enveloppe. Dans le cas des bâtiments administratifs, la demande en énergie de chauffage diminue de 9-14 % jusqu'à 40-58 %, mais l'énergie nécessaire au refroidissement augmente entre 223-457 % et 365-1'050 %. L'augmentation majeure est relevée pour les bâtiments administratifs très isolés, pour lesquels la demande d'énergie pour le refroidissement risque d'atteindre la valeur de celle pour le chauffage! Frank observe, dans les conclusions, qu'il faudrait considérer, dans des études successives, aussi la masse thermique et l'inertie thermique, couplées à la ventilation naturelle, afin de réduire l'énergie de refroidissement.

L'article de Christenson [Christenson, M. et al. 2006] a paru juste après celui de Frank. Cet article se concentre sur l'utilisation du système de calcul basé sur les "degrés-jour de chauffage" (HDD) et les "degrés-jour de refroidissement" (CDD), dans le but de comprendre l'influence que le réchauffement climatique aura sur ce modèle. Ce système de calcul est celui adopté dans les normes suisses publiées par la SIA. Quatre sites ont été analysés: Genève, Zurich, Lugano et Davos, qui représentent aussi quatre "climats type" pour la Suisse. Le réchauffement climatique se traduira, en Suisse, par une augmentation des températures minimales et une diminution des jours froids, couplés avec une augmentation des températures maximales et des jours chauds. L'analyse a été faite selon différents scénarios de réchauffement. Le calcul des HDD se base sur les formules des normes Suisses (SIA 381/3:1982, par exemple) et celui des CDD sur la définition de l'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE). Pour les HDD, une diminution tout au long du XXe siècle a été constatée. De cela, il est possible de prévoir une décroissance continue aussi pendant le XXIe siècle. Entre 1983 et 2003 une diminution de 10 % a été calculée pour des édifices avec faible isolation à Davos; 25 % pour ceux hautement isolés à Lugano. Une comparaison avec les données de calcul proposée par la SIA (Norme SIA 381/3) et celles de l'EMPA, en utilisant le "Design Reference Year" (DRY), démontrent une surestimation des HDD pendant les vingt dernières années. Pour les CDD, on a une claire croissance dans toutes les localités étudiées. Les données DRY montrent une sous-estimation des CDD pendant les vingt dernières années! Selon les prévisions, on

peut s'attendre en Suisse à une diminution des demandes en chauffage sur la période 1975-2085 de 13 à 87 %, selon les scénarios de réchauffement. En ce qui concerne la demande en refroidissement, on peut prévoir une augmentation, sur la période 1975-2085, de l'ordre de 2'100 % (sur la période 1901-2003, une augmentation qui varie entre 50 % et 170 % a été constatée), mais cela doit être encore approfondi. L'étude confirme la tendance vers une réduction du chauffage et une augmentation du refroidissement. Le danger est que la diminution de la consommation pour le chauffage en hiver soit dépassée par la demande croissante d'énergie électrique pour le refroidissement en été!

Ces données ont été confirmées par le rapport sur les effets des changements climatiques en Suisse en 2050 publié par l'*Organe consultatif sur les changements climatiques* et le *Forum pour le climat et les changements globaux* de l'Académie suisse des sciences naturelles [OcCC 2007]. Selon ce rapport, les températures augmenteront de 2°C pendant l'automne, l'hiver et le printemps et de presque 3°C pendant l'été. Au niveau de la construction et de l'énergie, ces changements auront comme conséquence principale le déplacement des besoins en énergie du chauffage hivernal vers le refroidissement estival, et ceci surtout pour les bâtiments de bureaux. Ce changement comporte un déplacement de la demande d'énergie des sources fossiles (chauffage) vers l'électricité (installations de climatisation) [OcCC 2007:8]. Des meilleures solutions passives sont à privilégier, couplées à une amélioration dans l'efficacité des installations techniques.

L'article de Artmann [Artmann, N. et al. 2007] analyse le potentiel de la ventilation naturelle nocturne comme source de refroidissement pour les bâtiments, dans les climats du Centre, de l'Est et du Nord de l'Europe. Ceci comme réponse possible à l'augmentation des besoins en énergie de refroidissement que les études sur les effets du réchauffement climatique ont validée. Une tendance qui est valable déjà aujourd'hui, pour les bâtiments commerciaux ou administratifs, même dans des climats modérés comme ceux de l'Europe Centrale. Le modèle développé ne considère pas un bâtiment spécifique, mais les différences de température entre jour et nuit. Cette démarche est valable pour la phase d'étude du projet.

La constatation est que l'augmentation attendue de la température moyenne nécessite de considérer, dès maintenant, l'influence que le refroidissement aura sur le bilan énergétique global. Les solutions passives sont donc à étudier afin de ne pas nuire à la politique de réduction de la demande énergétique des bâtiments. Les potentiels de réduction les plus élevés, pour la période estivale, sont pour les pays de l'Europe du Nord, mais aussi dans l'Europe Centrale il serait possible d'utiliser cette technique pour refroidir la plupart des bâtiments. La ventilation naturelle nocturne est aussi une bonne solution pour réduire les besoins en climatisation mécanique. Pour les phases successives du développement des projets, il faut impérativement prendre en compte les paramètres caractéristiques du bâtiment: c'est-à-dire les gains intérieurs et solaires, la masse thermique de l'édifice et le taux de renouvellement d'air.

5.2.1. Conclusions

Les trois articles susmentionnés, nous permettent déjà d'énoncer quelques principes de base pour la conception énergétique des bâtiment par rapport au climat:

- L'influence du réchauffement climatique sur le projet de nouveaux bâtiments ou de rénovation ne

peut plus être sous-estimée. Les variations climatiques des dernières décennies ont aujourd'hui déjà des conséquences sur le bilan énergétique du bâtiment [Christenson, M. et al. 2006].

- Le changement principal, dans des climats continentaux comme celui Suisse, sera la réduction des besoins en chauffage qui risque d'être contrebalancée, ou dépassée, par l'augmentation de ceux pour le refroidissement. Pour cela, il est indispensable de concevoir des solutions passives qui ne demandent pas d'investissements énergétiques supplémentaires.
- La ventilation naturelle nocturne est une solution efficace pour la réduction des risques de surchauffe estivale. Ce système doit être couplé à une masse d'accumulation suffisante pour le stockage du surplus de chaleur. Ceci comporte une augmentation de l'inertie thermique, ce qui aurait aussi des influences positives sur le confort intérieur (réduction des fluctuations de la température et possibilité de stockage des apports solaires) [Frank, Th. 2005; Pfafferott, J. et al. 2005].

5.3. Quelques définitions et principes physiques

5.3.1. Inertie thermique et comportement thermique dynamique

On se référera surtout à l'ouvrage publié par Claude-Alain Roulet [Roulet, C.-A. 2008] pour la définition de quelques principes de base à propos de l'inertie thermique.

En premier lieu, les caractéristiques des matériaux qui influencent leur inertie sont: la conductivité thermique λ [W/m K] qui exprime la facilité avec laquelle la chaleur traverse une épaisseur du matériau; la chaleur spécifique c [J/kg K] qui correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer un kilogramme de matériau de un degré, et la masse volumique ρ [kg/m³]. Ces valeurs servent pour calculer les principales caractéristiques dynamiques des matériaux de construction qui sont en relation avec l'inertie thermique. La capacité d'un matériau d'accumuler de la chaleur est exprimée par l'effusivité thermique: $b = \sqrt{\lambda \rho c}$ [W s^{1/2}/m²K]. Dans le cas d'une partie d'un bâtiment, la quantité de chaleur accumulée par un matériau lorsqu'on chauffe sa surface est proportionnelle à $b\sqrt{t}$, où "t" correspond au temps de chauffage.

Pour exploiter au mieux l'inertie thermique et ses effets bénéfiques pour la régulation de la température intérieure, il est nécessaire de connaître la vitesse avec laquelle la chaleur pénètre dans un élément de construction. Cette valeur est la diffusivité thermique: $a = \lambda / \rho c$ [m²/s]. De cette valeur dérive la profondeur de pénétration: $\delta = \sqrt{at}$, c'est-à-dire la profondeur à laquelle la chaleur a un effet après une période donnée. La valeur "t" est une période caractéristique qui, en général, est assumée comme égale à la durée d'une journée, donc 24 heures.

Dans le cas idéal de variations périodiques de la température extérieure sur une période de 24h, le rapport entre l'amplitude de la variation de la température de l'air extérieure et celle de la température superficielle intérieure, est défini comme amortissement v [-]. Le décalage temporel entre les valeurs extrêmes de la température de l'air extérieure et celles de la température superficielle intérieure, par exemple entre les maxima journalières de ces deux valeurs, est appelé déphasage η [h] [Zürcher, C., Frank, T. 2004:40]. Un déphasage de 12h est optimal en régime d'été parce qu'il permet de transférer la fraîcheur de la nuit vers l'intérieur, le long de la journée [Augenti, V., Stefanizzi, P. 2008].

Ces valeurs caractérisant les matériaux qui constituent le bâtiment permettent ensuite de calculer la capacité thermique d'un élément de construction (sol, parois, plafond) χ [J/m² K] afin d'obtenir la capacité thermique C [J/K] d'une pièce ou d'un bâtiment entier. Cette dernière valeur permet d'obtenir la constante de temps: $\tau=C/H$ [s], qui caractérise l'inertie thermique d'un espace. C'est en effet le temps nécessaire pour passer d'une situation stable à une autre, après une modification de la température intérieure due à un échange de chaleur.

5.3.2. *Température et rayonnement des surfaces*

La sensation de confort que l'on ressent lorsque nous nous trouvons dans un environnement construit est, d'une part, déterminée par la température de l'air ambiant et, d'autre part, par l'écart entre cette température et celle des surfaces qui délimitent cet environnement. Dans une pièce d'habitation, par exemple, les matériaux constituant les parois, le sol et le plafond influencent le confort intérieur. La température de l'air ambiant est une conséquence des caractéristiques des matériaux de construction qui sont exposés au sous-chapitre précédent. La température de surface dépend aussi de l'inertie thermique du matériau dont elle est faite, mais la sensation de "froid" ou de "chaud" ressentie au contact ou à proximité de cette surface résulte également de son rayonnement. Le rayonnement d'une surface constituée d'un matériau quelconque est l'émission d'ondes électromagnétiques par ce corps qui permettent le transfert de la lumière ou de la chaleur. Ces ondes sont soit émises directement par le corps soit réfléchies. Leur origine est variée, par exemple, le rayonnement solaire ou la radiation émise par le corps humain. La chaleur émise, sous forme de rayonnement infra-rouge, par le corps humain, lui est restituée selon un taux de réduction qui dépend de la capacité de réflexion du matériau dans ce spectre d'ondes électromagnétiques. Moindre est la réduction, moins l'on ressentira de sensation. Ceci peut être un avantage, à nos latitudes, pendant la saison froide, mais en été la sensation de fraîcheur ressentie à proximité d'un matériau peut être aussi agréable.

5.3.3. *Le matériau pierre naturelle*

La pierre naturelle est un matériau lourd, qui possède une chaleur spécifique élevée et qui est, dans la plupart des cas, un bon conducteur thermique. Elle possède donc une effusivité thermique élevée et, en conséquence, une bonne inertie thermique quand elle est mise en oeuvre correctement, c'est-à-dire que cette masse d'accumulation est accessible. La pierre naturelle permet donc de stabiliser la température intérieure d'un espace. C'est la raison pour laquelle, par exemple, elle a toujours été utilisée pour la construction des caves à vin ou d'autres entrepôts de denrées alimentaires.

La température de surface de la pierre naturelle est souvent inférieure à celle de l'air ambiant à cause de l'effusivité thermique élevée qui se traduit par le stockage de la chaleur à l'intérieur du matériau. De plus, la pierre naturelle absorbe les ondes électromagnétiques et c'est pour cela que l'on ressent, généralement, de la fraîcheur en s'approchant de ce matériau. Au contraire, si une surface de pierre naturelle est exposée à une source de radiation directe, elle se chauffera vite, ce qui produira non seulement une augmentation de sa température de surface, mais une parallèle sensation de chaleur dégagée: c'est le cas des façades des bâtiments anciens contre lesquelles on se pose dans une journée automnale ensoleillée. Les bonnes valeurs de déphasage atteignables avec ce matériau permettent de "décaler" la phase de restitution de la chaleur à des périodes plus fraîches de la journée, équilibrant

ainsi la sensation d'inconfort.

La conception de la construction ainsi que la manière de gérer les apports solaires directs et le système de chauffage influencent le comportement d'un tel matériau "dynamique". Il est nécessaire de connaître ses caractéristiques dès la phase de projet afin de pouvoir les utiliser pour la réduction de la consommation énergétique et l'augmentation du confort des habitants.

5.4. Pour un état de la connaissance sur les effets de l'inertie thermique sur la consommation d'énergie de chauffage et climatisation, et le confort intérieur des bâtiments massifs

5.4.1. Le confort thermique intérieur et les mesures constructives

L'objectif ultime de tout bâtiment devrait être de garantir à l'Homme non seulement l'abri, mais aussi le confort. Ce dernier dépend fortement du lieu et de l'époque dans laquelle on se situe. C'est-à-dire que notre rapport envers le confort de l'habitation a fortement changé. Certains changements, qui concernent les mesures prises pour améliorer la salubrité sont certainement des réussites, mais la recherche progressive d'un climat intérieur artificiel, complètement ou presque indépendant de l'extérieur, peut et doit être critiquée (voir le sous-chapitre III.5.7). Les mesures constructives adoptées depuis la crise pétrolière des années 1970 ont amené à une progressive augmentation des couches d'isolation afin de réduire les déperditions thermiques. Ceci signifie l'introduction d'une barrière entre l'intérieur et l'extérieur qui réduit ou empêche tout flux de chaleur²⁵ dans les deux directions. Les différentes politiques de réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments des pays européens, à partir des années 1980-1990, ont particulièrement insisté sur l'isolation des enveloppes. L'augmentation rapide des exigences se traduit, dans la construction, par une augmentation des épaisseurs des couches d'isolants. Une des conséquences principales de cette augmentation de l'épaisseur des couches qui constituent les murs de l'enveloppe a été le développement de structures constructives légères en ossature de bois. Cette solution permet d'intégrer l'épaisseur des isolations dans celle de la structure, ce qui réduit, en conséquence, la surface occupée par les murs porteurs. Nous pouvons constater cela surtout dans les pays de l'Europe centrale et septentrionale. Cette approche se concentre surtout sur le confort et la réduction des besoins en chauffage pendant l'hiver et sous-estime, en général, le problème de la climatisation estivale [Gargari, C. 2008].

Déjà à partir des années 1980, des spécialistes en matière de construction performante du point de vue énergétique avaient exprimé des réserves sur les solutions constructives légères hautement isolées. Surtout en ce qui concerne l'utilisation passive des gains solaires qui ne peuvent pas être accumulés par des matériaux ne possédant pas une masse suffisante²⁶. Klaus Aggen a soutenu, vers la moitié des années 1980, par une série d'articles, que la meilleure solution constructive, aussi du point de vue de la réduction de la consommation énergétique, est celle massive en briques pleines de terre cuite ("Vollziegeln") [Aggen, K. 1986]. Le point de vue de Aggen est d'étudier des solutions constructives qui visent à la réduction de la consommation énergétique tout en garantissant le meilleur confort

25. Chaleur, s.m. Phénomène physique (énergie cinétique de translation, rotation et vibration moléculaires dans une substance) qui se transmet (par conduction, convection ou radiation) et dont l'augmentation se traduit par l'élévation de température, des effets électriques, la dilatation, des changements d'état (fusion, sublimation, évaporation) [Le Nouveau Robert 1993].

26. Cela signifie que l'élément constructif, selon les épaisseurs de mise en oeuvre dans le bâtiment, ne possède pas une masse d'accumulation (inertie thermique) suffisante [Eicke-Nennig, W. 2007].

intérieur pour les habitants. Il souleva aussi la question de l'effective capacité isolante des matelas de fibres lorsqu'ils présentent une humidité supérieure à celle théorique de calcul et fabrication: c'est-à-dire le taux d'humidité qu'on retrouve souvent lors de la mise en oeuvre sur le chantier.

Les analyses faites par l'ingénieur suisse Paul Bossert [Bossert, P. 1982] sur des données recueillies à l'EMPA sur neuf maisonnettes prototypes, entre 1953 et 1958, mettent en évidence des points qui sont encore aujourd'hui d'actualité. Premièrement, la constatation que les bâtiments anciens, ceux du XIXe siècle, consomment moins, de deux à trois fois, que ceux construits récemment (années 1970, n.d.A.). Deuxièmement, Bossert affirme que les "Analyses des Besoins en Energie" (EVA) démontrent qu'il n'y a aucune relation directe entre l'addition des valeurs "k" des éléments qui composent un bâtiment et ses besoins en énergie (lire plus bas les conclusions aux articles récents). En ce qui concerne les mesures faites sur les maisonnettes, elles montrent d'abord que les murs en maçonnerie traditionnelle s'assèchent pendant l'hiver et absorbent l'humidité pendant l'été (ce qui est contraire aux calculs et aux enseignements traditionnels). Une variation de la valeur "k" le long de l'année a aussi été mesurée: en hiver la valeur descend, ceci pourrait être la conséquence de la perte d'humidité et de la réduction parallèle de la capacité thermique. Les gains passifs en chaleur permis par l'humidité sont d'environ 30 %. L'humidité dans le mur devient donc un facteur positif parce qu'elle a la capacité de stocker de la chaleur! Bossert extrapole de ces résultats le comportement des murs en maçonnerie de forte épaisseur (38-45-50 cm): ces murs sont secs et chauds, sur leur face intérieure, et froids et humides, sur la face extérieure. Pendant l'hiver, la faible radiation solaire est absorbée par l'humidité, ce qui réduit les pertes par radiation et convection. Ceci augmente légèrement la température du mur et réduit donc la nécessité de chauffage à l'intérieur. L'inertie combinée du mur et de l'humidité permet de déphaser à la nuit ces gains passifs.

Aujourd'hui, grâce aussi aux connaissances acquises et aux bâtiments réalisés, on est conscient du fait que pour garantir le meilleur confort possible, tout en réduisant la consommation, la notion d'inertie thermique, c'est-à-dire d'un "volant" thermique qui garantit une atténuation des oscillations de la température intérieure, est nécessaire (cette variation de la température intérieure en été correspond à 10-20 % de l'oscillation de celle extérieure [Gargari, C. 2008-02]). Ceci surtout dans des climats "continentaux" comme les nôtres, du fait des variations importantes entre la température du jour et celle de la nuit [Aste, N. et al. 2009].

L'atténuation des oscillations de température est importante pour plusieurs raisons:

- Elle garantit un confort accru le long de la journée;
- Elle permet une meilleure utilisation passive des gains solaires et des gains internes;
- Elle permet, si elle est couplée à la ventilation naturelle, l'utilisation d'un système passif de refroidissement nocturne [Zimmermann, M. 2003];
- Elle permet une utilisation des installations (chauffage et éventuelle climatisation) intermittente et sans pics, en augmentant ainsi leur durée de vie.

Il en découle que les solutions constructives les plus performantes, soit du point de vue thermique soit du point de vue énergétique, sont celles qui présentent une bonne valeur d'isolation thermique associée à une masse accessible suffisante. Accessible dans le sens où cette masse, constituée par des

éléments de constructions lourds, doit être libre de toute barrière (isolation) empêchant les échanges de chaleur (stockage et déstockage).

5.4.2. Influence de la masse dans le bilan énergétique

Plusieurs études récentes ont essayé de démontrer qu'un bâtiment présentant une inertie importante, par rapport à un correspondant léger, consomme moins d'énergie pour le chauffage et la climatisation.

Les résultats contenus dans l'étude faite par le bureau d'architecture anglais de Robert Adam et par le bureau d'ingénieur Atelier Ten sont le produit de simulations effectuées sur deux types de bâtiments de dimensions correspondantes. L'un est une construction en maçonnerie traditionnelle et l'autre possède deux façades complètement vitrées. Les simulations ont été réalisées selon deux types d'occupations des bâtiments: habitation et bureau. Les bâtiments vitrés ont un bilan énergétique annuel toujours supérieur aux traditionnels: de 6 à 11 % dans le cas du bâtiment de bureau et de 2 à 12 % dans le cas de l'habitation. Les différences dans les pourcentages dépendent du niveau d'isolation des fenêtres [Adam, R. 2008]. La consommation pour un bâtiment de bureau de deux étages est d'environ 80 kWh/m² par année et celle de l'habitation est d'environ 130 kWh/m².

Une recherche effectuée à la fin des années 1970 en Suisse, auprès de l'EMPA de Dübendorf, sur l'influence de l'inertie thermique sur la consommation en énergie de chauffage et sur le confort intérieur, avait déjà montré l'existence d'une relation directe entre la masse accessible qu'un bâtiment possède, la surface vitrée et sa consommation en énergie de chauffage [Stähli, U. 1979]. Les calculs étaient des estimations faites sur des "semaines caractéristiques" à la demi-saison et pendant l'hiver. Une construction lourde avec une surface de fenêtres élevée consomme, pendant une semaine de la demi-saison, jusqu'à 50 % moins d'énergie qu'une avec structure légère [*ibid*:26]. Ces gains diminuent avec la réduction des surfaces des ouvertures. Pendant une semaine type hivernale, les avantages d'une construction possédant de la masse existent seulement si des apports solaires directs sont possibles, mais ils sont plus faibles que ceux de la demi-saison, et ne dépassent pas les 19 %. En ce qui concerne le confort, ceci est supérieur dans une construction lourde par le fait que les variations de température sont amorties: c'est le cas lors d'une interruption du chauffage, pendant la nuit en hiver, ou, pendant l'été, lorsque de la radiation solaire directe pénètre à l'intérieur des pièces. Dans le premier cas, la température reste plus élevée que dans une construction légère et, dans le deuxième, l'"effet baraque" est réduit.

Le projet appelé BatAn, en cours de réalisation en France (2008-2010), a comme objectif de relever la consommation d'énergie des bâtiments anciens et de la mettre en relation avec le comportement énergétique de la construction, de celui des habitants ainsi qu'aux conditions climatiques locales. Ces valeurs sont ensuite confrontées avec celles issues des simulations informatiques, afin de valider ou pas ces modèles et d'en développer des nouveaux, mieux adaptés aux caractéristiques de la construction traditionnelle. Pour le moment, des résultats intermédiaires sont à disposition et nous nous basons sur ceux-ci pour les considérations qui suivent [BatAn 2007]. La construction traditionnelle est considérée dans ce cadre comme tout bâtiment construit avant le XXe siècle et sans recours à des matériaux industriels. Ceci afin de différencier ces bâtisses de celles qui ont été construites entre le début du XXe siècle et les années 1970, qui sont considérées actuellement comme

des constructions à haute consommation énergétique. L'étude se base sur un échantillon de dix maisons d'habitation, cinq immeubles de logement urbains et cinq maisons individuelles, réparties dans tout le territoire de la France, et sur un bâtiment témoin conforme aux normes énergétiques françaises de l'année 2000. La consommation pour le chauffage et pour la production de l'eau chaude sanitaire ont été relevées pendant une année. Il a été de même pour des valeurs tels la température extérieure et intérieure ainsi que les taux d'humidité. À l'intérieur de cet échantillon se trouvent cinq bâtiments en pierre naturelle.

Les mesures de la consommation énergétique ont montré que tous les bâtiments consomment moins de 230 kWh ep / m² an, et qu'en période hivernale la température interne moyenne est toujours supérieure à 18°C [BatAn 2007:24]. Ceci les place, selon le classement des performances énergétiques des bâtiments, allant de A à I, entre la catégorie C et la D²⁷. Les valeurs mesurées pour la maison témoin ont été de 110 kWh ep / m² an, pour la consommation d'énergie, et de 22°C pour la température moyenne intérieure. Elle atteint ainsi la catégorie C.

Les valeurs mesurées pendant l'été ont permis de constater que la différence entre la température extérieure et celle intérieure, dans les pièces de vie, atteint les 7°C dans les constructions les plus "lourdes", comme dans deux maisons en pierre naturelle. Ceci permet de maintenir un bon confort intérieur [ibid:30].

Les résultats de l'étude ont montré l'importance que l'implantation et l'adaptation au climat local assument dans le comportement énergétique d'une construction traditionnelle [ibid:33-37]. Il en est de même pour l'organisation intérieure des espaces, avec une distinction claire entre pièces de vie et zones de service, qui servent d'espaces tampons [ibid:38-40]. Le comportement des occupants a aussi une grande incidence sur le comportement thermique du bâtiment: il s'agit d'une occupation active qui nécessite de connaître et comprendre les caractéristiques de la construction et de développer des modes de vie qui soient en accord. C'est le cas, par exemple, du chauffage intermittent en hiver dans le cas d'une construction à forte inertie ou de l'obscurcissement des ouvertures pendant les journées estivales afin de réduire les risques de surchauffe [ibid:59-62].

En ce qui concerne les modes de construction, l'étude a montré un bon comportement thermique général des bâtiments, qui possèdent tous une structure lourde. Les mesures faites à la caméra infrarouge pour détecter les ponts thermiques ont relevé que les liaisons ponctuelles maçonnerie-plancher, sous la forme de poutre encadrée, réduisent fortement les déperditions par conduction par rapport à des solutions continues, dans le cas d'enveloppes non isolées. Une solution encore plus efficace est celle constituée par un plancher en bois avec un revêtement inférieur en plâtre: ceci produit une masse d'air peu ventilée qui réduit les déperditions thermiques par convection et, en conséquence, le pont thermique. L'étude a mis en évidence, encore une fois, la difficulté dans la caractérisation des matériaux des murs anciens du fait de leur hétérogénéité et de leur comportement thermique. Les enveloppes et leurs revêtements ne sont jamais étanches à la vapeur d'eau, mais aucun désordre n'a été constaté, ni aucun phénomène de condensation superficielle, ceci grâce à des températures superficielles intérieures toujours supérieures à celles de rosée, ainsi qu'à des matériaux aux caractéristiques hygrométriques appropriées. Une grande inertie des structures a été relevée par

27. La valeur minimale est de 107 et la maximale de 227 kWh ep / m² an. Pour les maisons en pierre ces valeurs varient entre 107 et 205 kWh ep / m² an, et les températures moyennes dans les séjours entre 18 et 19,7°C [BatAn 2007:25].

L'analyse des valeurs mesurées: un déphasage maximal de 8 heures est atteint par un bâtiment en pierre naturelle, ce qui produit un écart de température, en été, de 6°C entre les valeurs maximales intérieure et extérieure [BatAn 2007:49-50]. Cette inertie a une influence positive dans toutes les saisons: en été elle permet un bon confort intérieur; en hiver, un usage intermittent du chauffage et, comme à la mi-saison, l'exploitation passive du rayonnement solaire. Les ouvertures restent le point faible, du point de vue thermique, de toute construction traditionnelle, mais les infiltrations d'air constituent, par contre, un moyen efficace de ventilation hygiénique. Les doubles fenêtres et les vérandas, dans les cas étudiés, ont démontré leur efficacité du point de vue thermique [ibid:54]. Cette étude démontre de manière exemplaire comme l'approche contemporaine à la consommation d'énergie dans le bâtiment a été développée pour des constructions isolées "modernes", mais arrive difficilement à prendre en compte des systèmes complexes comme ceux constitués par les bâtiments traditionnels, leur environnement et leurs occupants. Elle démontre, une fois de plus, l'importance de l'inertie thermique pour le bon comportement énergétique et le confort des habitants.

5.4.3. Les études italiennes sur la construction massive en brique de terre cuite

Nous allons résumer ici de suite les résultats obtenus par une série de recherches effectuées en Italie sur la construction en maçonnerie de terre cuite. Ces recherches ont été soutenues par l'*Associazione Nazionale des Industries de Terres Cuites* (ANDIL Assolaterizi). Elles avaient comme objectif d'évaluer les caractéristiques de la construction en maçonnerie de terre cuite par rapport aux nouvelles solutions constructives des maisons légères à basse consommation énergétique. Cet engagement de la part des chercheurs et des industriels italiens de la terre cuite est une expression claire de la volonté de trouver des solutions au problème du développement durable qui soient en accord avec les traditions locales. Les maisons légères fortement isolées sont sûrement éloignées des traditions constructives italiennes et également du climat de plusieurs régions de ce pays et souvent, elles ont des besoins énergétiques supérieurs aux solutions traditionnelles [Augenti, V., Stefanizzi, P. 2008; Gargari, C. 2008; Medola, M. 2007; Stazi, F. et al. 2007].

Toutes les études concordent sur le fait que l'approche donnée aux échanges énergétiques dans le bâtiment, basée sur le comportement stationnaire, est trop simplifiée pour donner des résultats fiables et qui décrivent correctement la réalité des faits. Pour décrire et calculer le comportement réel des échanges de chaleur à travers une enveloppe, il est nécessaire de considérer un comportement dynamique. Ceci signifie nécessairement de prendre en compte l'inertie thermique des différents matériaux constituant l'enveloppe ainsi que l'ordre dans lequel les différentes couches sont disposées. Ce fait constitue une différence fondamentale avec la méthode stationnaire parce que, dans le calcul de la valeur "U" d'une enveloppe, la succession des couches n'a aucune influence [Campioli, A. et al. 2007]. Des simulations ont été effectuées sur quatre types de bâtiments (de un à seize niveaux) avec cinq types d'enveloppes présentant la même valeur "U" ($=0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$) dans le climat de Rome. Dans tous les cas simulés, les besoins en énergie de chauffage et de climatisation sont inférieurs pour la solution avec inertie de 10 à 30 % par rapport à une légère [ibid:99].

Dans une autre étude, Medola [Medola, M. 2007] revient sur la notion de confort intérieur et d'échanges avec l'environnement extérieur et naturel. Pour cela il évoque la nécessité d'une approche

dynamique au comportement thermique de l'enveloppe de la construction. L'inertie thermique devient un paramètre important pour l'utilisation de solutions passives, soit au niveau du chauffage soit au niveau du rafraîchissement. L'adaptation de l'enveloppe selon les différentes orientations est aussi une nécessité. Les simulations effectuées concernent un bâtiment à Bologne, selon deux différentes solutions constructives: enveloppe lourde avec valeur $U=0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ et enveloppe légère, $U=0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$. Les simulations effectuées en régime dynamique démontrent que, au niveau des approches et des méthodes de calcul, le modèle stationnaire donne des résultats satisfaisants seulement dans le cas des enveloppes légères fortement isolées. Pour une enveloppe lourde les besoins en chauffage sont surestimés par le modèle stationnaire et ceci jusqu'à 30 % par rapport au modèle dynamique [Medola, M. 2007: 172]. L'analyse des graphiques de la variation horaire de la température des surfaces intérieures montre que, dans le cas de murs possédant une bonne inertie, elle est constante le long de la journée, ce qui garantit un meilleur confort pour les habitants. Cette amélioration dans le confort est présente aussi en période estivale, pendant laquelle la solution lourde ne nécessite pratiquement pas de climatisation.

L'*Università Politecnica delle Marche* de Ancone a réalisé des recherches qui concernent le confort thermique et la réduction de la consommation énergétique pour des bâtiments en maçonnerie en Italie [Stazi, F. et al. 2007; Di Perna, C. et al. 2008]. La recherche de Stazi et al., se concentre sur le cas de l'amélioration des caractéristiques énergétiques des constructions existantes, en considérant le cas de la maison isolée de deux niveaux, en construction traditionnelle en maçonnerie ("la casa colonica mediterranea"), très répandue non seulement en Italie. L'objectif est de démontrer, par le biais de simulations et de mesures sur place, que ce type de construction, avec des solutions simples de rénovation énergétique, présente un comportement qui satisfait les nouvelles exigences en matière de consommation énergétique et garantit un bon confort intérieur. Les chercheurs analysent différents niveaux d'interventions sur l'existant, ainsi qu'une hypothèse de bâtiment léger de même volume avec une enveloppe super-isolée. Les résultats obtenus démontrent que le comportement hivernal de la solution légère super-isolée est meilleur que celui avec grande masse, mais que, si l'on considère toute l'année, le bâtiment avec masse présente le meilleur confort et aussi un bilan énergétique similaire (les climats analysés sont ceux de Palerme, Ancone et Cuneo). Ceci est surtout valable dans le cas d'une utilisation intermittente du système de chauffage et de climatisation. Une variante d'augmentation de la surface vitrée (à la base 20 % de la surface des façades) a permis d'obtenir des résultats selon lesquels la consommation énergétique augmente: cela est surtout la conséquence des surchauffes estivales. Dans ce cas la masse thermique disponible n'est pas en mesure de garantir le confort intérieur.

Le cas analysé par Di Perna et al., est constitué par une tranche d'un bâtiment scolaire, donc avec une occupation discontinue et des charges internes importantes. L'affectation comme bâtiment résidentiel a aussi été étudiée. Dans cette étude, l'objectif était de mieux comprendre le comportement thermique dynamique d'un bâtiment et l'influence de l'inertie thermique sur le confort des occupants. Cinq types de murs extérieurs ont été étudiés, présentant la même valeur de "conductivité thermique périodique" (une valeur de conductivité thermique corrigée par un facteur qui considère les matériaux constituant l'élément constructif et qui est utilisée dans les normes italiennes). Les simulations ont été effectuées sur la période d'une année, pour trois climats (Palerme, Ancone et Bolzano) et en présence ou absence

des charges internes. Dans le cas du bâtiment sans charges internes, la plus haute température des surfaces intérieures en hiver est donnée par une enveloppe légère très isolée, mais en été les différences ne sont pas sensibles. Ceci semblerait favorable pour la solution légère, mais dès que les charges internes sont introduites, surtout en été, le meilleur confort est assuré par les murs à haute inertie, qui présentent des valeurs "U" supérieures à la solution légère. Dans cette étude apparaissent aussi des considérations sur l'inertie du système de couverture. Ce paramètre est très important pour le confort estival et dans ce cas les solutions avec inertie élevée, et qui présentent les éléments de plus grande masse vers l'intérieur, sont ceux qui garantissent le meilleur confort (on note encore une fois de plus l'importance de la position des couches). Des vérifications ont été effectuées afin de prouver que l'inertie thermique des éléments intérieurs influence le confort dans une moindre mesure que celle de l'enveloppe [Di Perna, C. et al. 2008: 95], en désaccord avec les affirmations de Givoni qui considère comme solution optimale d'avoir des éléments massifs soit dans les parois extérieures soit dans les intérieures [Givoni, B. 1998]. L'augmentation de la surface vitrée est jugée comme défavorable, surtout dans le cas de structures légères. L'efficacité de la ventilation naturelle nocturne augmente avec l'augmentation de l'inertie des couches intérieures. L'étude introduit un troisième paramètre pour la caractérisation des parois, outre la valeur "U" et la capacité thermique: la capacité thermique surfacique périodique intérieure qui exprime la capacité réelle de l'élément de construction de stocker de la chaleur sur sa face intérieure. Une valeur qui influence surtout, comme mentionné plus haut, le confort estival.

Une étude sur les parois opaques a été effectuée par Augenti et Stefanizzi [Augenti, V., Stefanizzi, P. 2008] afin de confronter le type en brique isolante de 30 cm avec un mur multicouche (porteur et couche isolante) de même épaisseur et de même valeur "U" ($=0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$). Pour le cas du mur multicouche, le déplacement de la couche isolante a aussi été évalué. Selon l'étude, la meilleure solution est représentée par le mur homogène parce qu'elle présente la valeur minimale pour la "conductivité thermique périodique". En outre, cette solution présente une valeur maximale de déphasage, c'est-à-dire presque 12h, ce qui la rapproche du cas optimal. Pour ce qui est des parois multicouches, les meilleures solutions sont celles qui présentent la couche isolante à l'extérieur ou une moitié vers l'intérieur et une moitié vers l'extérieur. La paroi homogène possède le meilleur comportement du point de vue hygrométrique et pour le flux de chaleur en régime dynamique: le flux thermique atteint sa valeur minimale lors du maximum de température extérieure. Il est donc nécessaire, dans les saisons intermédiaires et pendant l'été, de considérer la valeur du déphasage, de l'amortissement et de la "conductivité thermique périodique" afin de choisir le type de paroi opaque la plus performante.

5.4.4. Les défaillances des constructions vitrées sans masse

Les bâtiments largement vitrés²⁸ sont des plus en plus répandus, surtout pour les immeubles administratifs. Souvent, ce type d'architecture a été couplé aux principes de l'utilisation passive des gains solaires, soit pour le chauffage soit pour la ventilation naturelle. Si ce principe est valable pour les réalisations les plus coûteuses (la phase d'étude et de simulation de ces solutions est longue et

28. On considère un bâtiment comme "largement vitré" quand la surface des vitrages est supérieure à un tiers de la surface de façade [BORH, éd. 2007].

difficile), la production courante qui s'inspire de ces exemples souffre d'un manque de maîtrise des phénomènes complexes qui sont à la base de la ventilation naturelle ou de l'utilisation passive des gains solaires [Eicke-Hennig, W. 2004]. Ceci se traduit par un comportement qui, dans la plupart des cas, est inverse à celui recherché: c'est-à-dire une nécessité accrue d'installations afin de garantir le confort intérieur. Ce sont surtout des installations de climatisation, pour pallier aux surchauffes estivales causées par les gains solaires directs (effet de serre) et par les gains internes (occupants et installations électriques), ainsi que la nécessité d'une utilisation prolongée des éclairages artificiels, à cause de la nécessité d'obscurcir fréquemment les vitrages pendant la journée. Il est clair que ces contraintes sont surtout valables dans le cas des immeubles de bureaux. L'étude menée par Werner Eicke-Hennig rapporte toute une série d'exemples mesurés qui démontrent cette inefficacité sur le plan énergétique. La solution évoquée par Hennig est de concevoir dans le futur des bâtiments stables du point de vue thermique qui possèdent donc, entre autre, une masse thermique intérieure proportionnelle aux surfaces vitrées. Ceci afin de réduire les risques de surchauffe, d'optimiser l'utilisation des gains directs et internes et la ventilation naturelle nocturne. L'auteur souligne l'importance d'une haute conductivité thermique pour les éléments lourds intérieurs qui auraient, par ce biais, une meilleure réponse aux variations de température: la température de surface ne risquerait pas d'être trop élevée, parce que la chaleur pourrait pénétrer plus vite vers l'intérieur. Ceci pourrait rendre attractive la pierre naturelle²⁹.

Une étude faite par la *Haute Cour des Comptes de Bavière* en 2007 [BORH, éd. 2007] montre aussi l'inefficacité des bâtiments administratifs largement vitrés du point de vue financier. Les coûts de construction (environ trois fois plus élevés, si on passe de 30 % de surface vitrée à 90 %), d'entretien (les vitrages sont lavés trois à quatre fois par année), de substitution (les installations électroniques qui contrôlent le fonctionnement, par exemple, des systèmes d'obscurcissement ont une durée de vie de 12 à 15 ans) et les charges d'exploitation, sont plus élevées (surtout pour la climatisation estivale) que celles des constructions semblables en maçonnerie.

5.4.5. Différences entre la réalité et les valeurs calculées

Les modèles utilisés pour décrire les phénomènes complexes du transfert de chaleur à travers les matériaux qui constituent l'enveloppe d'un bâtiment sont des simplifications de la réalité. Ils ont été développés et affinés le long du temps par le biais de mensurations effectuées soit sur des bâtiments existants soit dans des cellules prototypes. Les modèles stationnaires de calculs ont démontré d'être adaptés à un certain type de construction, c'est-à-dire aux modes constructifs pour lesquels ces modèles de calculs ont été développés. Comme il a déjà été noté, ce type de modèle ne réussit pas à décrire le comportement réel des enveloppes à grande inertie. Pour cela, des modèles de calculs basés sur un régime d'échanges dynamiques doivent être employés. Demeure dans ce cas aussi la question qui concerne leur fiabilité: depuis l'introduction sur le marché de ces logiciels de calcul, des chercheurs ont commencé à effectuer des mensurations pour leur calibrage. Lindberg et al., ont recueilli, entre 1998 et 2002, à Tampere en Finlande, les données météorologiques et thermiques de six cellules prototypes avec différentes compositions d'enveloppe, dont une de briques pleines de 43,5 cm d'épaisseur [Lindberg, R. et al. 2004]. Entre autres, la température était mesurée à différentes

29. À ce sujet voir aussi: Zimmermann, M. 2003.

profondeurs dans les murs afin de comprendre sa distribution le long de la journée. Des calculs statiques et dynamiques furent aussi effectués afin de déterminer la différence entre ces températures. En général, les températures calculées selon la méthode statique sont plus élevées de 40 % par rapport à la méthode dynamique. Ceci a une influence directe sur l'estimation des besoins en chauffage et refroidissement. La comparaison des valeurs calculées selon la méthode dynamique à l'intérieur du mur et celles mesurées ne présente pas des différences significatives. Un effet important et méconnu a été mis en évidence par ces mensurations: pour les deux murs de masse élevée (blocs de béton alvéolaire et briques pleines) pendant la journée du 29 mars 2001, même si la température extérieure était négative, le flux de chaleur était dirigé vers l'intérieur du mur! Ceci parce que la température de la surface extérieure du mur était supérieure à celle de l'air, grâce à l'inertie thermique et aux gains solaires directs (la température calculée par le modèle stationnaire était, par contre, en dessous de zéro!).

L'ingénieur français Olivier Sidler, directeur du bureau d'étude Enertech, a présenté lors du colloque de Montpellier de 2003 sur le thème de l'inertie thermique en climat méditerranéen, des résultats issus de ses campagnes de mesures. Ces dernières n'avaient pas été menées pour mesurer les impacts de l'inertie, mais l'analyse des données récoltées a permis de mettre en évidence l'influence de l'inertie de la construction par rapport au confort thermique hivernal et estival et à la consommation énergétique. Cette démarche pourrait donc servir de modèle pour des analyses des données existantes comportant l'ensoleillement, la température intérieure et extérieure et la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement. Les mesures ont été faites sur des bâtiments possédant des inerties variables et affectés comme habitation, bureaux et école. Ceci est important parce qu'il permet de confronter des cas d'utilisation qui présentent des charges internes et des taux d'occupation différents.

Les mesures de la température intérieure pendant l'hiver démontre l'effet de stabilisation fourni par l'inertie thermique de la construction, ceci soit dans des locaux chauffés soit dans des locaux non chauffés, tels des vérandas. À l'intérieur de ces dernières, il a été noté que les pics d'ensoleillement à midi produisent seulement une augmentation de quelques degrés à l'intérieur de la pièce, ceci à confirmation du rôle positif de l'inertie dans l'utilisation passive des gains solaires. Le même effet bénéfique a été mis en évidence à travers le comportement en mi-saison (15 mars) d'une pièce non chauffée, contiguë à une véranda, avec laquelle elle communique par le biais d'une fenêtre.

La température de cette pièce, après l'ouverture de la fenêtre, ne dépasse pas, pendant l'après-midi, les 23°C, et, à minuit, est encore de 21°C. Dans les jours qui suivent, malgré une réduction de l'ensoleillement, la température intérieure ne descend pas au dessous des 20°C [Sidler, O. 2003].

Les observations du comportement thermique pendant l'été mettent, elles aussi, en évidence le rôle de l'inertie dans la réduction des fluctuations de la température intérieure. Elles ont aussi démontré la nécessité d'un refroidissement nocturne des locaux à forte inertie, afin d'éviter tout risque de surchauffe pendant la journée. Il faut "décharger" la réserve de chaleur pour qu'elle puisse en absorber à nouveau. Ceci permet de réduire l'inconfort dans les bâtiment de bureaux, qui possèdent d'importantes charges internes, sans avoir recours à des installations de climatisation [ibid:11].

Dans un même type de bâtiment, mais qui présente une faible inertie, à défaut de masse permettant l'accumulation des gains internes, pendant l'été la température intérieure augmente de façon linéaire

jour après jour.

Au niveau des consommations d'énergie, des mesures précises n'ont pas été effectuées, mais, à la lumière des considérations sur la température intérieure, Sidler conclut que dans le cas des bâtiments à occupation continue, comme les logements, l'inertie est sûrement une source de réduction de la consommation énergétique, grâce à la meilleure gestion qu'elle permet des apports d'énergie solaire et internes. Dans le cas de bâtiments à occupation discontinue, comme par exemple les bureaux, en général, l'on considère que l'inertie produit une surconsommation à cause de l'énergie à fournir pour la remise en température des pièces. Sidler amène une considération, à ce propos, qui est opposée: en effet, si l'énergie accumulée par la construction, grâce aux apports internes et externes, est suffisamment élevée lors de la fin de l'occupation des locaux (supérieure dans le cas des bâtiments scolaire à celle de consigne de 19°C), sa réduction pendant la période d'inoccupation ne sera pas très significative, grâce à l'inertie, permettant ainsi de réduire la quantité d'énergie à restituer pour remettre "en température" les locaux. Cette réduction se fera, de plus, sur de l'énergie de chauffage, donc conventionnelle, grâce à des apports, gains internes et solaires, gratuits. Une réduction de la consommation d'énergie "payante" devrait donc être réalisée [Sidler, O. 2003:14].

L'étude susmentionnée BatAn [BatAn 2007] (voir le sous-chapitre III.5.4.2), concernant les bâtiments traditionnels en France, a aussi mis en évidence les importants écarts entre les mesures réelles et les valeurs simulées par des logiciels stationnaires, utilisés dans l'évaluation de la consommation énergétique, et cela autant pour des immeubles de logement que pour des maisons individuelles. En effet, ces bâtiments constituent des systèmes complexes qui ne peuvent pas être pris en compte par ces logiciels de simulation. De plus, les caractéristiques thermiques des structures, très hétérogènes, sont méconnues et d'estimation difficile. Ces écarts produisent une surestimation des besoins énergétiques de ces bâtiments et l'obligation, dans la rénovation, au recours à des solutions qui souvent peuvent avoir des répercussions négatives sur le comportement et la durabilité de la construction.

5.5. Confort hygrothermique

Le confort de l'habitant n'est pas simplement garanti par une bonne température intérieure. La teneur en vapeur d'eau de l'air ambiant est aussi un facteur déterminant. Cette valeur d'humidité relative doit être ni trop basse, un air sec étant source de différents malaises, ni trop haute, car favorable à la condensation de l'eau et à l'apparition de moisissures qui sont nocives pour la santé.

Les éléments de construction présentant une bonne inertie thermique et une bonne isolation permettent, en général, de garantir une température de surface intérieure suffisante pour éviter les dangers de condensation. En effet, l'accumulation de la chaleur dans la couche en contact avec l'air ambiant garantit que sa température soit toujours assez élevée. Le point de rosée est fonction de la température de surface et de la teneur en vapeur d'eau de l'air. Plus la température est basse, plus il y a risque de condensation même pour des teneurs en vapeur d'eau réduites.

5.6. Développements futurs

Comme affirmé par A. Campioli et al. [Campioli, A., Ferrari, S. et al. 2007] il est nécessaire, ou il le sera, de concevoir des bâtiments non seulement avec des besoins en énergie réduits, mais qui possèdent aussi une durée de vie accrue et des investissements énergétiques d'entretien réduits. Dans ce cas

de figure, la construction "lourde", qui possède une énergie grise supérieure aux solutions légères, présente, en général, l'avantage d'une durée de vie accrue (de l'ordre du siècle) et des coûts d'entretien réduits, vu la nature des matériaux mis en oeuvre. L'étude citée souligne l'avantage d'une construction légère dans les cas où une durée de vie de 25 ans au maximum serait prévue.

5.7. Quelques considérations critiques sur la notion de confort et la consommation énergétique

5.7.1. Le confort comme construction sociale

Dans son ouvrage "Comfort, Cleanliness and Convenience. The social organization of normality", publié en 2003, la sociologue anglaise Elizabeth Shove s'interroge, entre autres sujets, sur la valeur sociale de la notion de confort intérieur. Cette réflexion est une réaction aux politiques contemporaines en matière de sauvegarde de l'environnement et de réduction des consommations énergétiques, lesquelles, au niveau de la vie quotidienne et de l'habitation, visent surtout à l'efficacité maximales des appareils techniques garantissant le confort thermique. Un cas emblématique est celui de la diffusion des appareils de climatisation et de l'augmentation parallèle de la consommation électrique, liée à leur fonctionnement. Nous essayerons de résumer cette approche, en mettant en évidence les aspects qui peuvent influencer le projet des bâtiments.

5.7.2. Le confort comme forme de standardisation

Un premier constat concerne l'évolution de la notion de confort vers un standard. La normalisation des habitudes s'est développée vers une adoption de standards locaux, issus du monde occidental, par la majorité des habitants du monde. Ceci est valable aussi dans le cas spécifique du confort climatique intérieur: les paramètres sur lesquels se basent les exigences contemporaines sont ceux établis en Occident. Des standards qui s'appliquent à la température et aux taux d'humidité, mais qui se sont étendus aussi aux horaires de travail, par le biais de la diffusion de la journée de huit heures, entre 8-9h00 et 17-18h00, et par une acceptation généralisée de l'idée d'une "société des 24 heures" [Shove, E. 2003:62]. Ces modes de vie nécessitent des systèmes technologiques de régulation du climat et empêchent, dans une large mesure, les formes traditionnelle d'adaptation au climat (thème que nous allons développer par la suite). Cette dépendance croissante envers les techniques de chauffage et de climatisation a, comme effet direct, une consommation intensive de ressources, ce qui amène au fait paradoxal que «c'est extrêmement étrange qu'autant d'énergie et d'effort soient investit dans le contrôle de la nature afin de construire des conditions qui conviennent aux supposés besoins naturels du corps humain» [Shove, E. 2003:28].

5.7.3. La construction scientifique de la normalité

La notion de standard, qui a été abordée précédemment, permet, selon Elizabeth Shove, la transition des paramètres scientifiques vers la pratique et les conventions sociales.

L'évolution même de la signification du mot "confort" peut éclairer sur les retombées que la recherche et la définition du confort intérieur ont eu au niveau social et environnemental. Jusqu'au XIXe siècle, dans la langue française, ce mot correspond à un état d'âme, d'esprit, auxquels est reliée une idée de "ce qui donne la force; encouragement, consolation", donc de "réconfort". Après le siècle des Lumières, c'est la signification de "bien-être physique, matériel, aisance" qui s'affirme, sous l'influence de la

signification que le mot "comfort" a acquis à la fin du XVIIIe siècle en Angleterre³⁰. Cette nouvelle signification est à faire correspondre avec les recherches scientifiques, menées au XVIIIe siècle, autour de l'amélioration des conditions des habitations, qui se concentraient essentiellement sur le développement technique des installations sanitaires, de cuisson et de chauffage [Shove, E. 2003:27]. Ces recherches scientifiques continuèrent pendant le XIXe siècle et aboutirent, au début du XXe, à des connaissances et des appareils techniques en mesure d'assurer le contrôle du climat intérieur. La question qui se posa à cette époque fut celle de la définition des qualités du climat afin de garantir le confort des habitants. Deux approches distinctes oeuvrèrent pour atteindre un objectif similaire de normalisation du climat: d'un côté des approches qu'on pourrait définir d'anthropologiques et, de l'autre, celles purement physiologiques. Un avis extrême est celui publié par Huntington en 1915 dans son livre "Civilization and Climate", reporté par Elizabeth Shove, comme exemple d'occidentalisation du climat: «les Hommes des races européennes sont capables d'accomplir le maximum de travail et ont le meilleur état de santé» [ibid:27]. Ceci est possible, comme le titre du livre de Huntington l'indique, parce que les conditions climatiques européennes (déjà ceci est une forme de normalisation de conditions hétérogènes) sont favorables, et de cela une conclusion très dangereuse peut être tirée, c'est-à-dire, la nécessité de garantir ces conditions climatiques au plus grand nombre de personnes afin qu'elles puissent atteindre le même niveau de rendement et de santé que ceux des Européens. L'autre approche, scientifiquement plus rigoureuse, essaya, par des mesures et des expériences de laboratoire, de définir les paramètres nécessaires pour garantir le climat parfait. Ce dernier étant défini comme l'état physique de neutralité des échanges entre l'individu et son environnement: c'est-à-dire que la chaleur dégagée par le corps humain est égale à celle transférée à l'environnement [ibid:29]. Dans cette approche, l'individu est perçu comme un récepteur passif et la sensation de confort est directement dépendante des conditions climatiques de l'environnement. Les paramètres mesurables et reproductibles, cette dernière est une condition autant nécessaire que la première, furent définis dans les années 1920 comme étant la température, l'humidité et vitesse de l'air [ibid:30]. Ces paramètres, mesurés dans les laboratoires et reproductibles à l'aide des nouveaux équipements techniques, définirent un climat idéal qui ne correspondait à aucun des climats naturels. Ces paramètres formèrent la base pour les nouvelles normes réglant la pratique professionnelle et dont la diffusion partit des pays occidentaux. Les normes publiées par l'*American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)* sont un exemple qui influence, aujourd'hui encore, les standards internationaux en matière de climatisation (ceci aussi, un mot directement dépendant des recherches du XXe siècle).

Selon Elizabeth Shove, le résultat des deux démarches précédemment citées a été, d'une part, la reproduction d'environnements issus des laboratoires dans le monde réel [ibid:24] et, d'autre part, la réalisation de bâtiments qui répondent aux exigences établies par les normes, mais qui en même temps sont aussi les générateurs de ces besoins techniques: un bâtiment qui produit un environnement climatique idéal à travers des moyens techniques est lui-même le générateur de son besoin en équipements techniques afin de garantir le confort climatique attendu.

Cette démarche se heurte à des recherches parallèles faites sur le terrain qui avaient comme objectif de déterminer, par des mesures directes et par des sondages auprès des habitants, les définitions que les

30. Ces informations historiques et étymologiques proviennent du Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL): <http://www.cnrtl.fr>, consulté le 26.06.2009.

personnes donnent de la notion de "confort". Les résultats de ces recherches ont montré que la notion de confort est variable selon les régions, les cultures, les personnes et que, par exemple, la fourchette des températures estimées comme confortables varie entre 6 et 31°C [Shove, E. 2004:18]. Au contraire, la température intérieure moyenne dans les foyers britanniques est passée, pendant les dernières trente années, de 17 à 21°C [ibid:18]. Il en est de même pour celle des foyers suisses³¹.

5.7.4. L'adaptation au climat

Les recherches de terrain évoquées plus haut amènent à considérer le confort comme un "accomplissement" plutôt que comme un attribut, selon la démarche classique. De cela, le fait que les conditions intérieures soient considérées comme: «confortables quand elles offrent des moyens variables, flexibles et socialement et techniquement viables d'éviter l'inconfort» [Shove, E. 2003:36]. En effet, les Hommes s'adaptent au climat non seulement par le biais de régulations physiologiques, mais aussi par des stratégies de comportement. L'adaptation climatique devient simplement une partie de l'expérience quotidienne de l'habiter. Par exemple, dans les pays du Sud, l'habitude de la "siesta" pendant les heures les plus chaudes de la journée est une forme de comportement, devenu une habitude sociale, de se défendre de la chaleur sans investissements d'énergie. L'abolition de cette coutume par le gouvernement mexicain pour ses 1,6 millions de collaborateurs en avril 1999 a généré le besoin de climatiser les espaces de travail: celle-ci est une des formes d'application de l'idée de synchronisation des régimes socio-culturels sur une plage horaire qui provient des pays de l'Europe du Nord [ibid:62]. Ce contrôle du climat influence la vie sociale des personnes et l'acquisition de certaines notions de "normalité" par rapport aux paramètres définis. Un exemple de contre-tendance est celle de la campagne annuelle "Cool Biz" du Ministère japonais de l'environnement, commencée en 2005, qui invite les fonctionnaires à ne pas porter de costume-cravate pendant les mois d'été afin de pouvoir augmenter les températures intérieures dans les bureaux et réduire ainsi la consommation énergétique liée à la climatisation. La température estivale de climatisation a été fixée à 28°C ce qui permet, en 2005, une réduction estimée de la production de CO₂ de 460'000 tonnes, correspondant aux émissions d'un million de ménages pendant un mois³². Les résultats pour 2008 indiquent une réduction des émissions de CO₂ de 1'720'000 tonnes³³. Ces exemples montrent, d'une part, que le fait d'agir sur une norme sociale peut avoir des conséquences directes sur la sauvegarde de l'environnement et, d'autre part, comment des normes occidentales, qui ont été diffusées partout sur la Planète, produisent des changements dans les habitudes sociales qui vont à l'encontre des formes traditionnelles de comportement climatique.

31. Voir les valeurs de calculs utilisées dans l'estimation des besoins énergétiques des bâtiments, norme publiée par la *Société suisse des ingénieurs et des architectes*, SIA, selon laquelle la température intérieure d'un logement est fixée, en période hivernale, à 20°C.

32. Voir les résultats de la campagne "Cool Biz" de 2005 <http://www.env.go.jp/en/press/2005/1028a.html>, consulté le 29.06.2009

33. Voir l'article publié par PR Newswire <http://www.prnewswire.co.uk/cgi/news/release?id=259031>, consulté le 29.06.2009.

5.7.5. L'approche actuelle

L'approche actuelle de la définition du climat n'a pas vraiment évolué depuis les débuts du XXe siècle: les politiques actuelles en matière de développement durable, de sauvegarde de l'environnement et d'économie d'énergie, visent une amélioration de l'efficacité, surtout énergétique, des moyens techniques qui contrôlent ce climat. Nous nous trouvons à l'intérieur d'une forme écologique de consommation qui se base surtout sur les comportements individuels sans remettre en question les habitudes générales d'une société ou d'une culture [Hönger, C., Brunner, R., Menti, U.-P., Wieser, C. 2009; Shove, E. 2003:3].

Cette recherche de l'efficacité n'est pas en elle-même un gage de réduction des consommations énergétiques. En effet, dans la majorité des cas, les politiques énergétiques considèrent que l'énergie épargnée par le biais de l'utilisation d'un appareil plus efficace n'est pas utilisée. Ceci est en partie faux, comme démontré par le phénomène économique du "rebounding" (redressement), selon lequel le fait de disposer d'une partie restante d'une ressource produit, en général, une diminution du prix de revient de cette ressource, ce qui cause, à terme, une augmentation de la demande, permettant ainsi d'en consommer l'entier à disposition [Alcott, B. 2005]. Dans le cas des ménages, la réduction de la consommation énergétique amène aussi à une épargne d'argent, lequel est potentiellement disponible pour acquérir d'autres biens, consommant à nouveau de l'énergie. La seule garantie pour une vraie réduction des consommations énergétiques est donc un choix volontaire de ne pas utiliser la ressource épargnée, ce qui est possible seulement si un nouveau comportement est partagé par la société. À ce propos, le mouvement de la Décroissance prône pour la "simplicité volontaire", qui met en crise l'axiome, aujourd'hui partagé au niveau de la société, que plus correspond à mieux³⁴.

5.7.6. Des nouvelles stratégies pour le confort

Selon Elizabeth Shove, il serait nécessaire de revoir les agendas environnementales afin que leur contenu principal soit la redéfinition des "normes" et des "standards" de confort. En effet: «si l'on accepte que le confort est avant tout une construction sociale, quoique intégrée dans un contexte sociotechnique ou "système" de régulations, d'ingénierie, de structures matérielles et d'habitudes, il est possible de l'influencer pour favoriser l'émergence d'autres standards de confort, plus vigilants à l'égard de l'environnement» [Shove, E. 2004:20].

Ces nouvelles solutions, en accord avec des exigences climatiques et culturelles régionales, devraient permettre un contrôle climatique plus flexible en favorisant la diversification des expériences. Habiter pourrait ainsi être à nouveau en rapport avec les changements des journées et des saisons et les maisons cesseraient d'être des enveloppes étanches à leurs environnements.

Il est aussi nécessaire d'évoquer les conséquences, encore en partie inconnues, que ce mode de vie dans des environnements intérieurs "contrôlés" a sur la santé.

34. Voir à ce propos, par exemple, http://www.décroissance.ch/index.php/Simplicit%C3%A9_volontaire, consulté le 29.06.2009 ou les livres publiés par Serge Latouche se trouvant dans la bibliographie.

5.8. Le cas de la pierre naturelle

5.8.1. Calculs thermiques appliqués à des immeubles de logement en pierre naturelle massive

Nous avons réalisé des calculs du bilan thermique pour l'énergie de chauffage sur les deux types d'immeubles de logement en pierre naturelle massive proposés comme cas d'étude au début de ce chapitre (voir le sous-chapitre III.3).

5.8.1.1. Variantes et choix constructifs

Les deux variantes de disposition de la structure des immeubles déterminent des comportements différents du point de vue thermique et permettent aussi la vérification de diverses solutions constructives.

L'immeuble de type 1 comporte une structure périphérique porteuse ainsi qu'un mur de refend longitudinal et un noyau distributif central. Le niveau en sous-sol est considéré comme une cave non chauffée: les parois sont en béton armé avec isolation intérieure (valeur U de la paroi $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$). Le radier est isolé sur sa face supérieure et la dalle entre cette zone et la zone des logements est isolée sur sa face inférieure. La zone des logements est considérée comme une zone chauffée³⁵. Les solutions constructives vérifiées pour cette zone sont: murs périphériques en pierre naturelle de 55 cm d'épaisseur sans isolation; murs périphériques en pierre naturelle ou béton armé, épaisseur 30 cm, avec isolation intérieure de 17 cm (dalles sans coupure du pont froid, mais avec tête de dalle isolée), valeur U de la paroi $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; murs périphériques en pierre naturelle ou béton armé avec isolation extérieure crépie, valeur U de la paroi $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Les fenêtres se composent d'un cadre en bois et d'un vitrage double, avec couche à basse émissivité. Cette solution présente une valeur U plus élevée ($1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) par rapport à un vitrage triple, mais une meilleure transmission du rayonnement solaire, ce qui permet des gains solaires plus élevés. La toiture plate, isolée, possède une valeur U de $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La structure de l'immeuble de type 2 se compose d'un noyau central avec refends et d'une façade porteuse. Le sous-sol est une cave non chauffée avec les mêmes caractéristiques qu'au cas précédent. Pour la zone chauffée des logements deux variantes pour la construction ont été considérées: la première, variante 2 A, possède un noyau central en pierre naturelle ainsi que des façades en pierre naturelle sans isolation ou avec isolation intérieure (valeur U de $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$). La deuxième, variante 2 B, comporte soit une façade en structure légère avec forte isolation (valeur U de $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$) et un noyau en pierre naturelle, soit une structure entièrement légère (noyau et façade).

Pour chaque variante sans isolation, les trois familles principales de roches, calcaire, gneiss et grès, ont été considérées. Les valeurs U de ces trois murs, d'épaisseur 55 cm, sont: calcaire $2,89 \text{ W/m}^2\text{K}$; gneiss $3,06 \text{ W/m}^2\text{K}$; grès $2,58 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dans les solutions constructives comportant une couche d'isolation, la maçonnerie de pierre calcaire a été utilisée: la valeur moyenne de la conductibilité thermique de cette famille de roche se trouvant entre celle des gneiss et des grès, sauf dans le cas du crépi isolant extérieur pour lequel une maçonnerie de grès de la Molasse a été choisie (ce type de roche nécessitant

35. Cette simplification est en accord avec les observations faites par [Corrado, V., Mechri, H. E., Fabrizio, E. 2007] pour l'utilisation de la méthode EN ISO 13790 sur des immeubles de logements.

souvent une couche de protection contre les agents atmosphériques, le crépi isolant constitue une solution plausible au-delà des améliorations du comportement thermique).

5.8.1.2. Les modèles de calcul

Des vérifications thermiques ont été effectuées avec le logiciel Lesosai[®], version 6, qui permet en Suisse la vérification des performances thermiques d'un édifice en vue de la demande du permis de construire³⁶. Les vérifications ont été réalisées selon la Norme suisse SIA 380/1: 2009 et selon la norme EN ISO 13790 *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*. Cette dernière norme permet de considérer l'influence de la variation de la température interne et du réglage du système de chauffage³⁷, pour un calcul mensuel des besoins en énergie de chauffage. Le recours à des vérifications avec cette norme européenne semblent pertinentes parce qu'elle est considérée comme une référence dans la norme SIA 380/1:2009 et, par exemple, pour les calculs du bilan énergétique par le standard Minergie[®]³⁸.

5.8.1.3. Données climatiques

Les données climatiques de la base de données du logiciel Lesosai[®] version 6 ont été utilisées dans les calculs. Les stations de Berne, Lausanne, Lugano et Neuchâtel ont été choisies comme cas représentatifs des trois régions du Jura, du Plateau et du Sud des Alpes.

5.8.1.4. Résultats

Les résultats des bilans thermiques pour le chauffage sont ici de suite commentés. Les valeurs obtenues sont reportées dans des tableaux et des graphiques en annexe (voir Annexe A.7). Les valeurs sont données en MJ/m² et en kWh/m², cette dernière unité étant souvent utilisée dans le domaine de la physique du bâtiment³⁹. Elles sont divisées selon les trois variantes étudiées et, à l'intérieur de chacune, par type de pierre naturelle et de système constructif choisi.

Les valeurs limites de la consommation de chauffage, fixées par le norme SIA 380/1 2009, sont:

	Berne	Lausanne	Lugano	Neuchâtel
Variante 1	133 MJ/m ²	124 MJ/m ²	99 MJ/m ²	125 MJ/m ²
Variante 2	128 MJ/m ²	119 MJ/m ²	95 MJ/m ²	120 MJ/m ²

5.8.1.5. Résultats pour la variante 1

L'immeuble de type 1 sans isolation a été vérifié dans tous les lieux choisis et selon les deux modèles de calcul. Les résultats ne satisfont pas les exigences de la norme SIA 380/1:2009, même si une nette

36. Une licence du logiciel a été fournie pour les calculs liés à la recherche par l'entreprise E4TECH Sàrl de Lausanne, qui s'occupe actuellement du développement du logiciel. Pour des informations consulter le site internet: <http://www.lesosai.com> et <http://www.e4tech.com>.

37. Pour la Norme SIA 380/1, la température intérieure pour un immeuble de logement collectif est fixée à 20°C. Pour les vérifications selon EN ISO 13790, les températures intérieures considérées ont été de 20°C; de 19°C; de 18,5°C et de 18°C. En plus, une réduction de la température de chauffage pendant la nuit a été utilisée.

38. «La norme SIA 380/1 précise comment appliquer aux bâtiments l'algorithme du bilan énergétique défini dans la norme EN-ISO 13790. Ainsi, tout logiciel se référant à cette norme européenne devrait être en mesure de livrer des résultats comparables à ceux de la norme SIA 380/1 et servir par conséquent de justificatif pour MINERGIE.» Extrait de: *Le standard de construction MINERGIE. Info pour les professionnels*, téléchargé à l'adresse: http://minergie.ch/publications_minergie.html, le 10.02.2010.

39. 1 kWh = 3,6 MJ

différence entre les valeurs calculées selon la norme SIA et celle EN ISO 13790 existe.

Les résultats obtenus pour le même type d'immeuble, mais avec une isolation intérieure et une maçonnerie de pierre calcaire, calculés selon la norme SIA 380/1:2009 ne satisfont pas les valeurs limites fixées. Ceux obtenus selon la norme EN ISO 13790 sont, par contre, satisfaisants déjà pour une température intérieure minimale, pour la période de chauffage, de 20°C. La réduction de 1°C de cette température permet une réduction supplémentaire des besoins en énergie de chauffage variable entre 10 et 15 % (le gain maximal a été obtenu pour le cas de Lugano).

Le recours à une couche de crépi isolant de 6 cm d'épaisseur sur la face extérieure d'une maçonnerie de grès de la Molasse ne permet pas, selon la norme SIA 380/1:2009, d'atteindre la valeur limite. La vérification selon la norme EN ISO 13790 fournit des valeurs plus encourageantes, mais qui sont toujours en-dessus de la limite (entre 7 et 15 % pour une température intérieure minimale de 18°C) sauf pour l'immeuble de Lugano, pour lequel la valeur est atteinte avec une température intérieure de 18,5°C.

La solution d'appliquer une isolation périphérique a aussi été vérifiée, et les résultats satisfont les exigences dans tous les cas.

5.8.1.6. Résultats pour la variante 2 A

Le bilan des besoins en énergie pour le chauffage de l'immeuble de type 2 sans isolation thermique ne satisfait pas les limites fixées par la norme SIA 380/1:2009. Comme pour la variante précédente sans isolation thermique, les valeurs selon la norme EN ISO 13790 diffèrent de ceux SIA, mais elles restent toujours au-dessus des limites.

Selon la norme SIA 380/1:2009, même le recours à une isolation intérieure ne permet pas d'atteindre les objectifs. Les vérifications selon la norme EN ISO 13790 montrent, par contre, des résultats satisfaisants déjà pour une température intérieure minimale de 20°C, sauf dans le cas de l'immeuble à Neuchâtel pour lequel la consommation excède de 1,5 %. La diminution de la température intérieure à 19°C, comme référence pour la saison de chauffage, permet de réduire la consommation en énergie de 12 % à Berne, de 20 % à Lausanne, de 39 % à Lugano et de 10 % à Neuchâtel.

Dans ce cas aussi, le recours au crépi isolant d'une épaisseur de 6 cm n'est pas suffisant, selon la norme SIA 380/1:2009, pour améliorer les performances d'un immeuble en maçonnerie de grès de la Molasse. Selon la norme EN ISO 13790, la limite peut être atteinte par une température intérieure de 18°C à Lausanne, de 19°C à Lugano, mais pas dans les cas de Berne et Neuchâtel. Dans ces deux localités, même une réduction de la température à 18°C, comporte encore un dépassement des limites des besoins en énergie de chauffage de 5 à 7 %.

5.8.1.7. Résultats pour la variante 2 B

L'immeuble de type 2 avec une forte isolation des façades, construites en ossature de bois, et un noyau en maçonnerie de pierre naturelle satisfait les limites de la norme SIA 380/1:2009 pour les localités de Lausanne et Lugano, dans les cas de Berne et Neuchâtel un dépassement de 5 à 8 % persiste. Les résultats obtenus selon la norme EN ISO 13790 montrent que la limite peut être atteinte dans ces deux

lieux aussi, déjà avec une température intérieure de 20°C.

Le même immeuble, mais avec une structure entièrement légère, ne satisfait pas les limites de la norme SIA 380/1:2009 dans aucun des emplacements prévus. La norme EN ISO 13790 montre que déjà à une température intérieure de 20°C ces valeurs sont atteintes.

5.8.1.8. Commentaires des résultats. Les modèles de calculs

Les résultats obtenus montrent une grande différence entre le modèle de calcul SIA 380/1:2009 et celui EN ISO 13790. Les valeurs issues de ce dernier sont toujours inférieures à celles du premier, ceci est en partie dû à la prise en compte de la réduction de la température nocturne pendant la saison de chauffage et au calcul mensuel des bilans thermiques qui semble être plus sensible aux variations d'inertie des différentes solutions (ces observations sont en accord avec celles de [Corrado, V., Mechri, H. E., Fabrizio, E. 2007]). L'utilisation de cette méthode pour l'évaluation des besoins en chauffage des immeubles de logement est fiable pour des structures massives [Jokisalo, J., Kurnitski, J. 2007], mais la confrontation des résultats avec ceux de simulations dynamiques ou de mesures sur des bâtiments existants est une nécessité pour calibrer et valider la méthode. Malheureusement, dans le cadre de notre recherche ces confrontations n'ont pas pu être réalisées.

5.8.1.9. Commentaires des résultats. Les immeubles

Dans tous les cas analysés, le recours à une structure des façades en pierre naturelle sans isolation ne permet pas d'atteindre les valeurs limites fixées par la norme SIA 380/1:2009. Les différences entre les résultats des calculs selon la méthode SIA 380/1:2009 et selon EN ISO 13790 montrent que ce type de construction demande des analyses plus poussées ou des ajustements selon des valeurs mesurées. Ceci est en accord avec les observations faites sur les bâtiments anciens qui présentent, en général, des consommations d'énergie pour le chauffage inférieures à celles calculées [BatAn 2007] et avec des simulations dynamiques effectuées sur un bâtiment de deux niveaux en pierre naturelle au Canton du Tessin, qui avaient donné comme résultat une consommation pour le chauffage de 55 kWh/m² [Zerbi, S. 2006]. Ce sujet demande encore des recherches et des vérifications spécifiques plus approfondies.

Tous les résultats issus de la méthode EN ISO 13790 montrent l'évidence: c'est-à-dire l'influence positive de la réduction de la température intérieure pendant la saison de chauffage déjà à partir de 1°C. Ceci démontre que l'établissement de standards de confort influence le bilan énergétique des bâtiments. Le choix des formes de réduction de la consommation est par ce biais restreint, comme la comparaison entre les valeurs SIA 380/1:2009 et ceux EN ISO 13790 montre clairement: de 10 à 39 % par la diminution à 19°C de la température intérieure dans les différents contextes climatiques. Des réductions de l'ordre de 10 % sont en accord avec des sources récentes [Osanyintola, O. F., Simonson, C. J. 2006:1280].

Pour toutes les variantes, le recours à une isolation intérieure, et à une solution traditionnelle et prouvée pour la réduction des ponts thermiques entre les dalles et les murs, permet d'atteindre les limites fixées par la norme SIA 380/1:2009, si la méthode EN ISO 13790 est utilisée pour la vérification.

L'application d'une couche de crépi isolant à l'extérieur a été vérifiée et les résultats montrent qu'elle

ne permet pas d'atteindre les limites fixées par la norme SIA 380/1:2009. Le recours à la méthode EN ISO 13790 permet une amélioration des résultats surtout si elle est couplée à une réduction de la température intérieure: les limites sont atteintes seulement dans le cas du climat du Canton du Tessin, pour la variante 1, et aussi pour celui de Lausanne, pour la variante 2 A.

Cette solution d'isolation est de plus en plus utilisée dans les immeubles appartenant au patrimoine historique, parce qu'elle permet une nette amélioration des bilans énergétiques sans nuire à la conservation de l'aspect des constructions. Les résultats obtenus confirment cette solution et confortent également l'hypothèse selon laquelle, pour les bâtiments historiques, des notions différentes de confort intérieur doivent être appliquées, surtout en ce qui concerne les températures intérieures admissibles.

Les résultats obtenus pour la variante 2 B, qui montrent l'influence positive de la masse thermique intérieure sur les performances énergétiques d'un immeuble avec des façades fortement isolées, sont en accord avec les principes énoncés au sous-chapitre III.5.4.2. Ces résultats confirment le bien-fondé de l'utilisation de la pierre naturelle comme matériau structurel pour les noyaux de stabilisation de tels immeubles et de son influence positive sur le confort intérieur.

5.8.2. Solutions d'application et leur influence sur le confort thermique

Les différentes formes d'application de la pierre naturelle en Suisse sont traitées en rapport avec leur influence sur le confort intérieur et la réduction des besoins en énergie pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments, en accord avec ce qui a été exposé au sous-chapitre III.5.4. Ceci afin d'utiliser la pierre naturelle selon ses potentiels et ses caractéristiques propres. Nous essayons, dans les limites de la présente recherche, de mettre en relation chaque application non seulement avec la pierre naturelle, mais aussi avec les différents types de pierres naturelles présents en Suisse.

5.8.2.1. Maçonneries avec isolation thermique

La première forme d'application, qui est aussi la plus répandue dans le cas des bâtiments, est la façade porteuse qui assure en même temps la séparation thermique entre l'intérieur et l'extérieur. La maçonnerie en pierre naturelle doit non seulement assurer le cheminement des charges vers les fondations et contribuer à la stabilité du bâtiment, avec des éventuels refends, mais elle doit également garantir le confort intérieur des habitants, en hiver comme en été. Pour cela, il est possible de recourir soit à des maçonneries de très forte épaisseur soit à l'ajout de couches de matériaux isolants. La première solution garantit une très grande inertie thermique et, en conséquence, des valeurs de déphasage et d'amortissement qui se révèlent déterminants pour assurer un confort optimal d'été, surtout dans les climats du Sud. Les résultats obtenus par les simulations avec le logiciel Lesosai 6 ® (voir le sous-chapitre III.5.8.1) montrent que cette solution n'est pas vraiment applicable dans les climats suisses, mais, comme nous l'avons déjà mentionné, des vérifications et recherches supplémentaires sont nécessaires. Le recours à des matériaux isolants pose le problème de leur nature et de leur position à l'intérieur du mur. En effet, une isolation intérieure ou extérieure ne comporte pas les mêmes détails de construction, mais elle détermine aussi, du point de vue de la physique du bâtiment, des comportements différents. Si le problème des ponts thermiques engendrés par le recours à une isolation intérieure est connu depuis des années, cette solution constructive n'a pas, pour autant, disparu, parce que l'isolation extérieure, ou périphérique, selon sa mise en oeuvre, peut présenter des

problèmes au niveau de sa durée de vie, influençant le bilan énergétique global de la construction. Ces choix doivent toujours se rapporter à la situation climatique, au type de matériau utilisé, autant pour la pierre naturelle que pour l'isolant, et à l'affectation de la construction, surtout en ce qui concerne les périodes d'occupation. L'une des qualités principales des maçonneries en pierre naturelle est leur inertie thermique, il faut donc toujours veiller au fait que le recours à une isolation ne la réduise pas.

Des calculs du déphasage et de l'amortissement pour différents types de maçonneries en pierre naturelle ont été réalisés par le *Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment* (LESBAT) de la Haute École d'Ingénieur du Canton de Vaud. Les trois familles principales des calcaires, gneiss et grès, ont été analysées dans des maçonneries sans isolation, avec une isolation intérieure en laine minérale ou en fibre de bois, et avec un crépi isolant soit extérieur soit intérieur. Pour chaque variante les valeurs du déphasage, de l'amortissement, et la valeur U ont été calculées. Les données ont été recueillies dans des graphiques qui, rassemblés par type de roche et solution constructive, constituent un outil d'aide à la décision pour la solution constructive à adopter. En effet, il est possible d'établir à l'aide de ces graphiques la position, le type et l'épaisseur de l'isolant en fonction des trois paramètres susmentionnés. Cette forme d'outil a été préférée à celle du tableau, avec des valeurs de référence, parce qu'elle permet de mieux pouvoir apprécier les conséquences des choix, de les mettre en rapport avec les exigences de la construction et d'en permettre l'usage en dehors du climat suisse. Les tableaux complets se trouvent en annexe (Annexe A.8). La solution de l'isolation périphérique n'a pas été traitée parce que son comportement est désormais connu et elle peut être rapprochée, dans le cas présent, au comportement de la solution avec crépi isolant extérieur.

Les valeurs obtenues montrent, pour les trois familles de roches, que le déphasage de 12 h, normalement considéré comme idéal pour pouvoir profiter des gains solaires du jour pendant la nuit, est atteint à des épaisseurs, sans isolation, d'environ 60 cm. Ce sont des épaisseurs de maçonnerie souvent rencontrées dans les bâtiments anciens, ce qui démontre une attention de la part des constructeurs de l'époque aux avantages de l'inertie thermique. De plus, des valeurs d'amortissement de 10 à 15 [-] sont caractéristiques pour ces maçonneries, ce qui permet de profiter, dans l'ordre de grandeur d'un dixième à un quinzième, des variations de la température extérieure (ce qui est profitable en hiver parce que les pics de température pendant la journée sont encore perceptibles pendant la nuit). Le recours à des maçonneries plus épaisses serait profitable dans des climats plus chauds, parce que l'amortissement correspondant serait de l'ordre de 50, pour les calcaires et les grès, et de 25, pour les gneiss. Le déphasage serait aussi grand, ce qui est en tout cas favorable dans ces contextes climatiques.

La confrontation entre l'application d'une couche de crépi isolant soit à l'intérieur soit à l'extérieur de la paroi en pierre massive a démontré, une fois de plus, que, si la position n'influence pas la valeur U du mur, elle a des conséquences sur le comportement dynamique: en effet, les courbes des valeurs de l'amortissement et du déphasage pour les deux variantes ne correspondent pas. L'application à l'extérieur du crépi isolant permet d'atteindre des valeurs d'amortissement et de déphasage plus élevées (pour une épaisseur de 6 cm de crépi isolant l'amortissement est de 90 % supérieur et le déphasage de 7 %).

L'utilisation de matelas de fibres pour l'isolation (laine de roche ou fibres de bois) permet d'atteindre des valeurs U qui correspondent aux exigences actuelles. L'effet principal de ses couches est la forte

augmentation de la valeur de l'amortissement, même si elles sont placées à l'intérieur. Le recours à la fibre de bois, matériau plus dense, augmente nettement la valeur de l'amortissement et du déphasage: son utilisation doit donc être en accord avec les exigences fixées quant à l'utilisation passive des gains solaires à travers les parties opaques du bâtiment. En effet, pour une même épaisseur de 15 cm de la couche d'isolation, posée à l'intérieur d'une maçonnerie de calcaire de 40 cm d'épaisseur, l'amortissement dans le cas des fibres de bois vaut 210 % par rapport à la laine minérale (de 12 à 25) et le déphasage est supérieur de 47 % (13,3 contre 19,5 heures).

5.8.2.2. Accumulateur pour l'utilisation passive du rayonnements solaire et de la ventilation naturelle

La pierre naturelle possède une bonne chaleur spécifique, associée, en général, à des valeurs de conductivité thermique et de masse volumique élevées. Ces trois paramètres sont déterminants pour le comportement thermique dynamique du matériau [Roulet, C.-A. 2008:162]. La pierre naturelle peut donc être utilisée, comme d'autres matériaux lourds de construction, pour réaliser des "accumulateurs de chaleur" qui permettent de mieux utiliser les apports solaires passifs. En effet, la valeur élevée de la conductivité thermique des pierres naturelles, qui est considérée de façon négative au sujet de l'isolation des constructions, détermine des bonnes valeurs pour l'effusivité thermique, c'est-à-dire la capacité d'un matériau d'accumuler de la chaleur, et pour la diffusivité thermique, qui exprime la vitesse avec laquelle la chaleur pénètre dans le matériau (et inversement est restituée aux espaces environnants). Grâce à leur grande conductivité thermique, les gneiss sont des roches bien adaptées aux applications de ce type. Nous donnons, à titre d'exemple, quelques valeurs calculées pour les roches suisses et d'autres matériaux de construction, en accord avec les formules de [Roulet, C.-A. 2008; Zürcher, C., Frank, T. 2004].

Matériau	Conductivité thermique λ [W/mK]	Chaleur spécifique c [J/kgK]	Masse volumique ρ [kg/m ³]	Effusivité thermique "b" [W \sqrt{s} /m ² K]	Diffusivité thermique "a" [m ² /s]	Profondeur de pénétration à la période T (24h) δ [m]
Calcaire	2,0*	870*	2'400*	2'045	0,00000095	0,16
Gneiss	3,5*	870*	2'600*	2'810	0,0000015	0,21
Granite	2,8**	800**	2'700**	2'460	0,0000013	0,19
Grès	2,3*	860*	2'500*	2'220	0,0000011	0,17
Béton armé	2,3**	1'000**	2'300**	2'300	0,0000010	0,17
Bois massif	0,12**	1'610**	450**	295	0,00000016	0,07
Brique TC	0,44**	900**	1'100**	660	0,00000044	0,11
Brique Terre Crue	0,80**	1'000**	1'990**	1'260	0,00000040	0,11
Laine de roche	0,04**	1'030**	100*	64	0,00000040	0,10
Polystyrène expansé	0,038**	1'450**	20**	33	0,0000013	0,19
Terre crue comprimée	1,13**	1'000**	2'210**	1'580	0,00000051	0,12

* Valeurs moyennes selon différentes sources. ** [Zürcher, C., Frank, T. 2004]

Il est donc possible de transformer, par de simples choix architecturaux, des éléments en maçonnerie en des éléments "thermiques". De plus, il faut essayer d'utiliser ces mêmes éléments pour la statique du bâtiment, par exemple comme refends ou noyau de stabilisation. Une application simple est celle qui consiste en la réalisation du mur de séparation d'un jardin d'hiver ou d'une véranda à l'aide d'une maçonnerie de pierre naturelle d'une épaisseur suffisante pour garantir un déphasage optimal des gains solaires, donc de l'ordre de 12 heures (ce qui permet de profiter, en hiver, des gains solaires

journaliers pendant la nuit ou, en été, de refroidir la masse par ventilation naturelle nocturne et éviter ainsi la surchauffe des locaux pendant la journée). Ceci est atteint avec des épaisseurs de 40 à 50 cm pour les calcaires et les grès et de 50 à 60 cm pour les gneiss (voir Annexe A.8). Cette épaisseur peut se révéler excessive, surtout pour des murs qui ne sont pas exposés plein Sud, parce qu'à cause de la trop grande inertie, la masse ne peut pas se chauffer complètement pendant les journées hivernales: une épaisseur de 35 cm permet déjà d'atteindre un déphasage de 10 heures pour les calcaires et les grès et de 8 heures pour les gneiss. La surface du capteur exposée au rayonnement solaire doit de préférence avoir une couleur sombre, ce qui rend les gneiss des roches bien adaptées à cet usage ainsi que certains types de calcaires et de grès. Une solution pour l'utilisation de ces murs d'accumulation dans un logement est de coupler le mur de refend longitudinal à un couloir de distribution largement vitré, en reprenant donc le système de la coursive distributive fermée, mais en lui rajoutant la valeur d'accumulateur thermique. C'est le cas d'une maison individuelle, développée et construite à l'intérieur d'un programme d'enseignement d'architecture de l'Université de Utah, aux Etats-Unis. Le projet réalisé en 2003-2004, la Rosie Joe House, dans la Navajo Nation en Arizona, s'articule le long d'un mur en terre crue pisée de 45 cm d'épaisseur qui sert de masse d'accumulation pour accumuler la chaleur de la journée et la restituer pendant les froides nuits désertiques. Le système de double toiture facilite la ventilation naturelle de la masse et règle, par les avant-toits saillants, les apports solaires directs [Lotus 2009]. Des murs en pierre naturelle peuvent aussi servir pour la réalisation de murs capteurs, avec l'ajout d'un vitrage isolant sur leur surface extérieure; de "murs Trombe", avec, outre le recours au vitrage isolant, des ouvertures au pied et au sommet du mur permettant la circulation de l'air surchauffé; comme masse d'accumulation pour des murs comportant des isolations transparentes ou des cheminées solaires, comme démontré, par exemple, par les bâtiments de la Druk White Lotus School réalisés à partir de 2002 à Shey, dans le Ladakh (Inde). Le projet, réalisé par Arup et Arup Associates, de Londres, est construit avec des maçonneries en granit local couplées à des structures en ossature bois et à des doubles-vitrages isolants. La solution du mur Trombe a été choisie pour les immeuble de la résidence des étudiants afin de garantir le confort d'hiver et les cheminées solaires, constituées par des panneaux métalliques peints en noir, un vide d'air et une maçonnerie de pierre naturelle, permettent la ventilation forcée des latrines sèches⁴⁰. En général, la masse thermique des maçonneries est exploitée pour l'accumulation des gains solaires en hiver et pour la ventilation naturelle estivale [Carter, B., Galeazzi, F. 2007; Carter, B. 2003].

La masse des piliers en calcaire (précontraints et préfabriqués), associée à celle des dalles en béton armé préfabriqué laissé apparent, permet d'accumuler la chaleur dégagée par les installations dans les bureaux du nouveau Parlement de Londres, projeté par Michael Hopkins and Partners et terminé en 2000 [Gonzalo R., Habermann, K.J. 2008; Colin, D. 2001]. Cette chaleur est ensuite évacuée par le système de ventilation naturelle qui assure la climatisation des espaces de travail. Cette masse permet aussi de profiter de la lumière naturelle sans risques de surchauffe.

L'efficacité énergétique du recours à des maçonneries de pierre naturelle pour les murs de refends intérieurs, assurant en même temps la stabilité du bâtiment, a été validée par les calculs réalisés à l'aide du Logiciel Lesosai ® 6 (voir les sous-chapitres III.5.8.1.6-7). Cette amélioration du bilan

40. Pour d'autres informations sur le projet, voir, au-delà des sources bibliographiques citées, le site internet de l'organisation chargée du développement de l'école: <http://www.dwls.org/sustainability.html>, consulté le 17.02.2010.

énergétique est d'autant plus grande que l'isolation de l'enveloppe est performante et la masse de la structure porteuse réduite, comme pour les bâtiments à très basse consommation énergétique, réalisés, par exemple, selon le standard suisse Minergie P®. Dans ces réalisations, l'inertie nécessaire est obtenue grâce à la présence de noyaux distributifs et de dalles en béton armé. La pierre naturelle de taille offre en plus de la masse thermique, un effet de régulation de l'hygrométrie et aussi des textures de surfaces agréables à la vue, au toucher et également à l'odorat. Ces effets peuvent être contrôlés et variés selon le type de pierre naturelle choisie et son traitement de surface.

5.8.2.3. Régulateur de l'hygrométrie intérieure

Les roches qui présentent une porosité ouverte élevée, c'est-à-dire un réseau de pores capillaires en contact avec la surface extérieure, peuvent assumer la fonction de régulateurs de l'hygrométrie des espaces intérieurs, grâce à leur capacité d'accumuler et céder de la vapeur d'eau à l'air ambiant. Il est en tout cas nécessaire de veiller à ce que ces échanges, et les quantités d'eau, ne soient pas trop élevées parce que, selon le type de roche, ceci peut contribuer à leur altération: c'est le cas, par exemple, de leur application dans les salles de bains ou dans des cuisines peu ou pas ventilées. Dans ces locaux, il est préférable d'utiliser des matériaux comme les argiles qui peuvent échanger de façon cyclique, sans présenter des altérations importantes.

La régulation de l'hygrométrie intérieure ne garantit pas seulement un confort accru, surtout pour les personnes présentant des difficultés de respiration ou des allergies, mais elle peut contribuer à la réduction des dépenses pour le chauffage et la climatisation [Anger, R., Fontaine, L. 2009; Osanyintola, O. F., Simonson, C. J. 2006]. L'amélioration de l'hygrométrie intérieure est fondamentale, surtout dans les bâtiments qui comportent des systèmes de ventilation forcée, comme par exemple dans les immeubles construits selon le label Minergie® en Suisse ou dans les bâtiments de bureaux, parce qu'un risque d'assèchement de l'air ambiant subsiste. Cette capacité d'accumuler la vapeur d'eau est valable pour les matériaux hygroscopiques et aussi pour ceux poreux, utilisés dans la construction [Osanyintola, O. F., Simonson, C. J. 2006]. En ce qui concerne la réduction de l'énergie de chauffage et de climatisation, les gains sont réalisés de façon directe grâce à l'énergie échangée et cumulée par la vapeur d'eau en hiver et en été et, indirectement, par la possibilité de réduire (en hiver) ou augmenter (en été) la température intérieure sans que ceci influence la qualité de l'air perçue par les habitants [Osanyintola, O. F., Simonson, C. J. 2006]. En été, il serait d'ailleurs possible de réduire aussi le taux de ventilation pour les espaces intérieurs, si un système de ventilation mécanique est présent.

Au-delà de leur valeur architecturale, les projets de Francesco Venezia pour les communes du "Belice" revêtent, au sein de la présente recherche, une valeur d'exemplarité sur le thème de la réutilisation des pierres naturelles, comme forme durable d'usage de ce matériau. C'est la démonstration qu'une telle démarche est toujours possible, même dans notre situation contemporaine dans laquelle le rapport au passé semble toujours orienté vers la conservation plutôt que vers l'exploitation. Ces projets montrent que la meilleure forme de conservation et de valorisation pour ces matériaux de dépouille est leur intégration dans de nouvelles constructions: ceci leur garantit de retrouver une cohérence et une valeur propres, c'est-à-dire celles liées à leur fonction première d'éléments constructifs.

6.1. Francesco Venezia: "architetture di spolio" (architectures de dépouille)⁴¹

L'architecte italien Francesco Venezia (Lauro, 1944), qui vit et travaille à Naples, a réalisé dans les années 1980 une série de projets qui traitent, selon ses propres termes, du thème de l'architecture de dépouille. Ce sont, pour lui, «les opportunités les plus heureuses»⁴².

Derrière cette idée de "dépouille" se trouve une dimension cyclique de l'architecture et de la construction. En effet, dans les projets des années 1980 en Sicile, le matériau est presque toujours de la pierre naturelle, qui après son extraction de la carrière, rentre dans un cycle de "construction - destruction" qui est, idéalement, infini (sauf que certains types de pierres naturelles ont tendance à revenir à leur état naturel, ce qui termine ce cycle). En se référant aux expériences siciliennes, Francesco Venezia écrit dans les notes d'une conférence donnée à Toulouse en 1998: «Les vestiges d'un bâtiment ancien comme carrière d'un nouvel édifice» [Venezia, F. 2006:78]. Nous sommes donc en présence d'un architecte contemporain qui s'est confronté au thème qui a toujours été cher aux constructeurs du passé, c'est-à-dire celui de la réutilisation de matériaux issus d'anciennes bâtisses, afin de pouvoir épargner les difficultés liées à l'extraction et à la transformation de la matière première. Dans le cas de la pierre naturelle, on pourrait aujourd'hui également évoquer la réduction de l'exploitation des gisements et une réduction de l'"impact environnemental" par le biais de l'allongement de la durée de vie.

Les descriptifs des projets et certains des écrits de Francesco Venezia qui ont été analysés dans le cadre de cette recherche, montrent que cet intérêt pour l'architecture de dépouille permet de produire une architecture qui dépasse le temps déterminé par le simple usage du bâtiment - la réutilisation devient

41. Le mot «spolio» ne figure pas dans le vocabulaire de la langue italienne Zingarelli [Zingarelli 1994]. Nous trouvons par contre l'adjectif «spoglio», qui signifie "nu", mais aussi "exempt de" ou encore, comme substantif, "privation ou spoliation" ou même "dépouille" et donc cadavre ou proie. Le mot «spolio» utilisé par Francesco Venezia pourrait aussi dériver du substantif "spoliazione" qui signifie "spoliation" (déprédation et saccage). Il y a donc une certaine ambivalence dans le mot utilisé qui fait référence soit à une architecture construite à partir de "cadavres" soit à un saccage de l'existant. Il est possible de lire entre ces lignes une référence claire à la tradition de la construction des bâtiments en employant les matériaux de démolition de ceux qui les précèdent, comme par exemple dans la Rome des Papes où l'on utilisait largement les pierres des monuments d'époque impériale. Dans la langue française nous trouvons encore un autre indice: le mot "dépouille" signifie, en mécanique, «angle que forme avec la surface usinée la surface d'attaque de l'outil de coupe» [Le Robert 1995], en accord avec le fait que les éléments de l'architecture de dépouille sont des morceaux de matière qui ont déjà subi un processus de transformation depuis leur état naturel.

42. Voir à ce propos l'introduction au volume consacré à Francesco Venezia, écrite par lui-même, dans laquelle il explique le choix des différentes catégories avec lesquelles les projets sont rassemblés à l'intérieur du livre [Venezia, F. 2006:9].

donc un moyen d'introduire le passé dans le présent. Le remploi garantit au nouvel édifice une durée au-delà même de celle de la construction - et réalise ce passage entre carrière et bâtiment qui était si chère à Francesco Venezia, c'est-à-dire entre l'état naturel de la matière et un nouvel équilibre qui est régi par des principes abstraits - tels la «géométrie, les rythmes, les harmonies» [Venezia, F. 2006:90] - qui sont la base de l'architecture⁴³.

Francesco Venezia caractérise l'architecture de dépouille à travers deux mécanismes fondamentaux: le transport et l'inclusion. Dans le premier cas, les dépouilles sont transportées de leur emplacement original vers la nouvelle construction sous forme de restes ou de fragments démontés et reconstitués. Dans l'autre cas, la nouvelle construction est réalisée en incluant des parties qui sont déjà présentes sur place. Reste toujours le problème de l'intégration d'une partie dans l'entier, ce dernier n'étant pas celui d'origine, mais un nouvel ensemble qui acquiert du sens grâce à la dépouille, et qui en lui donne aussi. Les projets de Francesco Venezia dans le Belice témoignent de ce dialogue entre ancien et nouveau, et se chargent, dans ces lieux, d'une valeur symbolique que nous allons présenter maintenant.

Il est en effet nécessaire de préciser le contexte historique et géographique dans lequel ces projets ont vu le jour: il s'agit de la Sicile occidentale d'après le tremblement de terre de 1968. Ce sont dans les communes de Gibellina, Salaparuta et Salemi que se situent, peu après 1980, les projets siciliens de Francesco Venezia. Ces communes, qui se trouvent dans la zone appelée "Belice" (un triangle entre Palerme, Marsala et Agrigente) où les secousses du tremblement de terre du 14 et 15 janvier 1968, qui atteignirent la magnitude 6,1, ont fait 351 morts et un millier de blessés (depuis, ce séisme est connu sous le nom de "terremoto del Belice"). La destruction presque totale de certains villages, dont Gibellina et Salaparuta, engendra environ 98'000 sans-abris⁴⁴. Les différentes phases de la reconstruction furent très longues et, pour Gibellina et Salaparuta, amenèrent au déplacement et à la reconstruction intégrale des nouveaux villages. Les projets de Francesco Venezia pour Gibellina, Salaparuta et Salemi représentent soit des espaces publics - places et jardins à Salaparuta, un petit jardin public à Gibellina et un théâtre à ciel ouvert à Salemi - soit des équipements à caractère public - un musée pour Gibellina. Dans tous les cas, les projets se confrontent, d'une part, à une nouvelle situation urbaine générée par la reconstruction, qui se traduit souvent par un travail dans les vides laissés par la construction des nouveaux quartiers d'habitation et, d'autre part, aux "restes", aux dépouilles, qui sont les morceaux des bâtiments détruits par le séisme. Ces dépouilles suscitent un attrait ambivalent: rappel d'un drame, mais aussi mémoire et histoire des différentes personnes qui ont vécu dans ces lieux. Ce sont souvent le seul lien physique qui puisse lier les habitats à leur histoire, à cause de leur déplacement. Dans ce contexte, les projets de Francesco Venezia essaient de tisser des liens avec l'environnement proche des nouvelles agglomérations, tout en se référant au lointain (la campagne, les anciens emplacements des villages, le ciel) par l'établissement de vues et en utilisant les dépouilles pour introduire une dimension temporelle, historique, là où elle n'existe pas. Dans

43. «Et circonvenant de plus en plus mon esprit, je déterminais au plus haut point l'opération de transformer une carrière et une forêt, en édifice, en équilibres magnifiques!» [Valéry, P. 2002:104-105]. Francesco Venezia fait référence à ce passage dans un texte de 1981 qui accompagne le projet pour le musée de Gibellina [Venezia, F. 2006:66].

44. Voir à ce propos: <http://www.lastoriasiamonoi.rai.it/puntata.aspx?id=455>; http://www.lagazzettadelmezzogiorno.it/GdM_finestra_storia_1968_terremoto.php?IDCategoria=1247; http://www.terremotitalia.it/default2.asp?active_page_id=17, consultés le 28.02.2010.

l'espace chaotique des nouveaux quartiers, les jardins murés de Francesco Venezia constituent autant de recherches concernant le dimensionnement, le contrôle, les proportions de l'espace, où il essaie de "reconstruire", en reprenant une expression du philosophe James Hillmann, "l'âme des lieux" ⁴⁵. Ces variations autour du thème de l'hortus inclusus sont toujours accompagnés par la présence des dépouilles qui accentuent la symbolique de ces espaces. Ceux-ci tirent aussi leur origine, sous ces latitudes, dans la recherche de l'ombre et de la protection des vents. Des architectures de murs.

6.1.1. Hortus inclusus: projets pour les espaces publics

Entre 1983 et 1987 Francesco Venezia réalise dans la zone du Belice quatre projets pour des espaces publics à Gibellina, Salaparuta et Salemi. Le premier projet, dans l'ordre chronologique, est celui pour un petit théâtre à ciel ouvert à Salemi (1983-1986). Il occupe l'emplacement de l'ancien couvent du Carmine, détruit par le tremblement de terre, et il est construit aussi à l'aide de fragments de ce monument. Il se compose d'une *cavea*, des gradins et d'une scène en pente, tous contenus entre des murs: une ligne qui constitue le nouvel horizon du spectateur. Les matériaux utilisés sont des fragments de murs et d'ordres, le grès jaune de Caltanissetta, le travertin d'Alcamo.

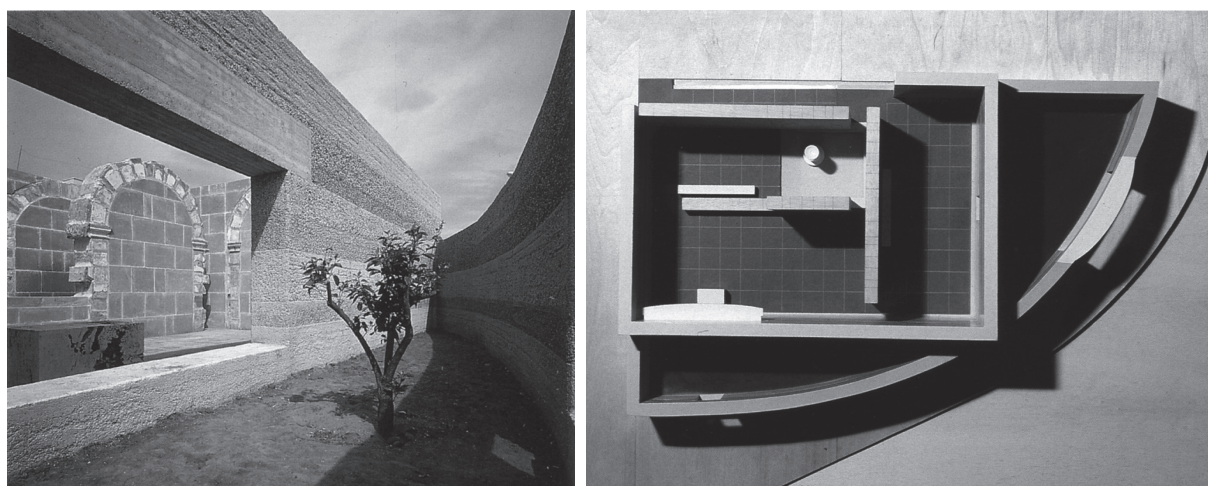


Fig. III.20-21. Francesco Venezia, jardin à Gibellina Nuova, 1984-1987 [Venezia, F. 2006]

Le deuxième projet est celui pour un petit jardin à Gibellina Nuova (1984-1987) dans lequel le thème de l'hortus inclusus est pleinement développé: un jardin avec des murs et des fenêtres qui apparaît telle une «maison sans toit»⁴⁶ [Venezia, F. 2006:87]. L'enclos est constitué par deux murs: le premier, de forme arrondie et qui épouse celle du trottoir, le deuxième, disposé selon une "spirale carrée" et qui contient l'espace de repos. Le mur externe, continu sur les trois côtés de la pièce interne, est construit en "congloméré de béton armé", c'est-à-dire avec un béton à la surface lavée, réalisé avec des agrégats grossiers. À l'intérieur de cette pièce interne, trois murs en maçonnerie de grès jaune de Caltanissetta,

45. «Il y a autre chose - nous sommes en train de faire une liste de choses qui renforcent l'âme d'un lieu ou ajoutent de l'âme à un lieu. Il y a l'acte de "créer des lieux clos", avec les murs ou des enceintes, peu importe s'il s'agit de jardins ou de quartiers. C'est la question de l'Hortus inclusus - peu importe si jardin ou ville entière.» [Hillman, J. 2006:43]. À lire également du même auteur: *L'anima dei luoghi. Conversazione con Carlo Truppi* [Hillman, J. 2004].

46. L'expression utilisée par Francesco Venezia est, en italien, "casa scoperchiata", littéralement "découverte" ou "à laquelle on a enlevé le couvercle". Cette expression est utilisée pour signifier l'arrachement de la toiture par des agents atmosphériques, comme les tempêtes, ou encore la perte de la toiture des maisons en ruine: toutes ces références sont pertinentes dans le cas de Gibellina. Francesco Venezia cite l'image de la maison non finie ou tombée en ruine dans le texte qui accompagne ce projet [Venezia, F. 2006:87].

mis en oeuvre selon un appareillage isodome, contiennent les dépouilles d'anciens arcs. La partie de repos est pavée avec des dalles en basalte, la "pietra lavica dell'Etna"; la fontaine (un cylindre), les deux assises et un bloc sont en travertin d'Alcamo. Les plantes du jardin trouvent demeure entre les interstices des deux murs et peuvent être vues à travers les fenêtres soit depuis l'intérieur soit depuis la rue.

Le projet pour une série de places et jardins à Salaparuta (1986) n'a pas été réalisé. Il occupait une zone étroite, vide, formée par la rencontre des tissus parcellaires de deux nouveaux quartiers de cette localité déplacée et reconstruite. Le projet prévoyait une suite de places et de jardins, la plupart des enclos, dans lesquels des éléments de récupération étaient presque systématiquement utilisés. Dans la cour centrale, les murs incluaient des gros monolithes provenant de monuments détruits; dans un corps allongé, les bancs remployaient les anciens gradins de l'escalier d'accès à l'église détruite; des arcs de dépouille étaient intégrés dans la suite de murs qui formaient l'enclos du jardin situé à l'une des extrémités, et, opposée à celui-ci, une place dont les gradins étaient formés par des blocs provenant des édifices détruits [Venezia, F. 2006:83]. Une place fut tout de même réalisée par Francesco Venezia à Salaparuta (1987-1992) dans une autre partie du village.

6.1.2. *Le musée de Gibellina (1981-1987)*

Le projet pour un nouveau musée à Gibellina Nuova est l'aboutissement de la recherche sur le *hortus inclusus* et l'architecture de dépouille.

Le projet de musée naît de la demande de transférer à Gibellina Nuova la façade du Palais Di Lorenzo, seul fragment resté de cet ancien édifice de Gibellina. Il s'agit d'une "dépouille par transport" qui nécessite le relevé de la façade, la numérotation des pierres et le démontage de ces dernières. C'est une phase qui ne diffère pas fondamentalement de celle d'une nouvelle réalisation en pierre naturelle, pendant laquelle le tailleur de pierre, sur la base du calepinage établi sur le papier, choisit entre les pierres dont il dispose, les travaille et les numérote en vue de la construction. Comme le dit Francesco Venezia, les pierres extraites et celles déjà transformées en éléments d'architecture sont moins différentes entre elles que le nouveau bloc l'est de la roche dans son état naturel.

La dépouille est intégrée dans le nouveau bâtiment en lui donnant la valeur d'une façade intérieure de cour-jardin afin de retrouver la bonne proportion urbaine qui permet de garder son sens originel tout en s'enrichissant de cette nouvelle valeur de fragment. En effet, le musée se trouve à la lisière vers la campagne, un contexte complètement différent de celui du Palazzo qui appartenait au tissu de Gibellina. Le bâtiment du musée prend la forme d'un volume long et étroit, dont la dépouille est la façade intérieure. Celui-ci abrite au rez-de-chaussée une salle d'exposition et à l'étage une galerie qui s'ouvre vers la cour-jardin, par les trois fenêtres du Palazzo, et vers la campagne environnante par des baies pratiquées dans le nouveau mur (une "galerie d'ombres"). Les trois autres côtés de la cour-jardin sont de simples murs qui forment l'enclos. Sur le côté long, en face de la façade ancienne, se trouve une rampe qui permet de passer du niveau de la cour à celui de la galerie à travers un passage suspendu en dehors du mur court. La galerie se termine dans une salle qui se trouve en dehors de la cour et qui abrite un banc permettant le repos à l'ombre et une vasque pour recueillir l'eau de pluie: le Reposoir. Ce volume est séparé structurellement du précédent. Se termine ainsi un parcours en spirale

carrée qui permet d'appréhender l'ancienne façade depuis son extérieur et son intérieur. Le projet prévoyait un jardin devant le musée, au même niveau de la fenêtre qui est la seule ouverture des murs de l'enclos et qui aurait permis de découvrir cet intérieur.

Les matériaux utilisés pour la construction sont doubles: le béton armé et la pierre naturelle. Le béton armé, lavé, est utilisé pour réaliser un squelette qui rigidifie l'ensemble des murs en pierre naturelle et qui assure donc la résistance de la structure en cas de séisme. La pierre naturelle provient de différents "gisements" que l'architecte a ainsi définis: «Trois carrières ont été utilisées pour la pierre: la première – la ruine du palais Di Lorenzo dans le vieux centre de Gibellina – a livré les blocs du fragment de la façade; la deuxième – dans les environs de Caltanissetta – a livré les plaques de grès fraîchement taillés; la troisième – la campagne des environs – a fourni les pierres de récupération pour le mur de l'aile: moellons, gros galets et la pierre que les paysans cassent, décortiquent et accumulent en bordure des champs pour les attribuer aux cultures»⁴⁷. La façade a donc été remontée telle quelle et intégrée dans la nouvelle maçonnerie en grès jaune de Caltanissetta, en appareillage isodome de parpaings de dimensions moyennes. Les assises de cette dernière ont reçu un traitement de surface alterné: face brute de sciage ou travaillée à la broche, directement en oeuvre. Sur la hauteur de l'étage au niveau de la cour, les trois murs de l'enclos sont appareillés en *opus listatum* où alternent des assises de parpaings bien équarris et une maçonnerie incertaine (*opus incertum*): cette dernière est mise en oeuvre à partir de moellons provenant de la découverte des petits gisements de grès des champs alentours. Dans le niveau supérieur, un appareillage isodome a été choisi comme pour les parties extérieures, réalisés avec du grès jaune de Caltanissetta en éléments de petit format.

Le bâtiment gît aujourd'hui, vide, dans le terrain qui aurait dû devenir un jardin, telle une ruine construite pour en abriter une autre. Ceci n'est pas la faute du bâtiment, mais plutôt de la décision de construire là où des personnes étaient encore obligées à vivre dans des logements d'urgence. Un jour, soit par transport soit par inclusion, cette dépouille deviendra à nouveau un édifice.

6.2. Réutilisation et recyclage

6.2.1. Ressources renouvelables et non-renouvelables

Les ressources renouvelables sont celles dont l'exploitation n'en réduit pas la disponibilité, c'est-à-dire qu'elles se reforment dans des délais temporels du même ordre de grandeur que ceux de leur utilisation. Les ressources non-renouvelables, par contre, s'épuisent à des vitesses différentes selon leur disponibilité et leur taux d'exploitation. La distinction entre ces deux catégories semble être claire, mais en réalité des nuances subsistent: par exemple, une utilisation intensive du bois des forêts sans une stratégie appropriée de plantation peut amener à l'épuisement de la ressource, même si elle est à la base renouvelable. D'autre part, des ressources non-renouvelables, mais très disponibles en nature et dont l'exploitation n'est pas intensive, comme dans le cas de la pierre naturelle à l'époque contemporaine, ne risquent pas un épuisement rapide [Sassi, P. 2006; Berge, B. 2000].

L'objectif dans la construction est de réduire l'utilisation des ressources qui risquent l'épuisement en

47. Traduction de l'auteur, original en italien: «Tre cave sono state utilizzate per la pietra: la prima – il rudere di palazzo Di Lorenzo nel vecchio centro di Gibellina – ha fornito i blocchi del frammento di facciata; la seconda – nella zona di Caltanissetta – ha fornito i lastroni di arenaria freschi di taglio; la terza – la campagna all'intorno – ha fornito le pietre di recupero per il muro d'ala: pietrame sciolto, grossi ciottoli e quella pietra che i contadini spaccano scortecciano e accumulano ai bordi dei campi per conquistarli alle colture» [Venezia, F. 1984].

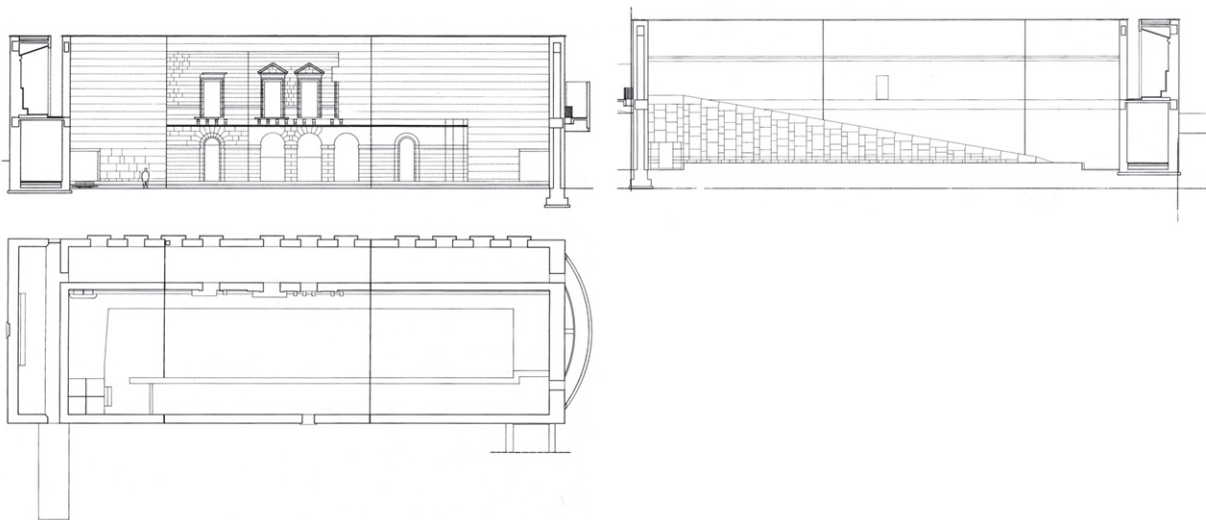


Fig. III.22-23. Francesco Venezia, musée à Gibellina Nuova, 1981-1987. Photo du chantier, avec les pierres du Palais Di Lorenzo prêtes à être mise en oeuvre [Venezia, F. 1988]. Coupes longitudinales et plan au niveau de la galerie [Venezia, F. 2006]

favorisant par contre celles qui sont très disponibles. L'augmentation de la durée de vie des matériaux utilisés, par le biais des critères de leur choix et de leur qualité, est aussi une forme efficace pour la réduction de l'utilisation des matières premières.

6.2.2. Réutilisation, recyclage et downcycling

Une solution efficace pour réduire l'utilisation de matières premières dans la construction est d'en favoriser avant tout la réutilisation; après le recyclage et, seulement en dernier, la transformation dans des matériaux moins purs (*downcycling*). En effet, le recyclage est d'autant plus efficace que le matériau se trouve à l'état pur, c'est-à-dire proche de son état de matière première. C'est le cas pour tout matériau de construction qui ne subit que peu de transformations entre son état de ressource et celui

de mise en oeuvre: la pierre naturelle, comme le bois ou même le fer, appartiennent à cette catégorie.

Le recours, pour la construction, à des éléments standardisés et constitués d'un seul matériau en assure une réutilisation et un recyclage aisé.

La réutilisation a l'avantage de demander très peu d'énergie, par rapport au recyclage, parce que l'élément même est réemployé tel quel; elle peut nécessiter, par contre, un important investissement en travail humain.

La dernière forme d'utilisation pour un matériau est sa transformation en énergie, ce qui se fait, dans la plupart des cas, par incinération.

6.2.3. Consommation d'énergie des matériaux de construction

L'énergie consommée par un matériau de construction se partage entre l'énergie nécessaire à sa production, appelée aussi énergie primaire, et celle consommée pendant les phases de construction, d'utilisation et de démolition [Berge, B. 2000].

L'énergie primaire constitue environ 80 % de l'énergie fournie à un matériau de construction [ibid]. Elle est la somme des énergies fournies pour l'extraction et la production; de l'énergie secondaire nécessaire à la production et de l'énergie investie dans le transport des matières premières ainsi que du produit. Il faut calculer dans cette énergie aussi celle de combustion, dans le cas où la matière aurait pu être utilisée comme ressource énergétique [ibid].

L'énergie consommée dans la construction est celle investie dans le transport des matériaux vers le chantier et celle consommée sur le chantier pour la construction et le séchage des matériaux mis en oeuvre. En effet, aujourd'hui, le temps de séchage naturel n'est plus respecté et on fait recours à des systèmes mécaniques. L'énergie investie est particulièrement élevée pour des matériaux à haut contenu d'eau lors de la mise en oeuvre, comme, par exemple, les bétons. L'énergie fournie pour la maintenance du bâtiment est celle des produits qui sont utilisés et celle, éventuelle, des matériaux qui sont remplacés. L'énergie de démolition constitue environ 10 % du total.

Si d'un point de vue économique, au moins dans le cas suisse, la main d'oeuvre est aujourd'hui une charge élevée, sa consommation énergétique reste très basse, environ 0,36 MJ/h [ibid]. Ceci est un facteur qui pourrait, dans le futur, favoriser un retour à des travaux nécessitant un investissement élevé en main d'oeuvre, comme, par exemple, le démontage à la place de la démolition.

En général, pour réduire la consommation énergétique des matériaux de construction, le recours à des ressources et à une production locales est une solution efficace. Ceci permet de réduire l'énergie de transport des matières premières, des produits intermédiaires et des produits finis. Il en est de même pour l'utilisation d'énergie produite localement de manière hautement efficiente.

L'augmentation de la durée de vie d'un matériau de construction est aussi une forme de réduction de sa consommation énergétique et ceci est autant plus efficace que le matériau est durable et requiert peu de maintenance. Il en est de même pour des éléments qui sont produits avec peu d'investissement énergétique: matériaux bruts, peu travaillés, matières premières peu transformées⁴⁸.

48. «L'Architecture, c'est, avec des matériaux bruts, établir des rapports émouvants» [Le Corbusier 1995:XIX].

6.2.4. Pollution

Il existe deux formes de pollution: la pollution énergétique et la pollution du matériau. La première est liée à la consommation en énergie primaire, aux types de ressources énergétiques utilisées et à l'énergie de transport.

La deuxième comprend les polluants dans l'air, l'eau et la terre liés au matériau, à sa production, son utilisation et sa dégradation.

6.2.5. Production locale

Le recours à des matériaux locaux, comme mentionné plus haut, est une solution efficace en vue d'une utilisation responsable des ressources dans la construction. Cela ne doit pas simplement se réduire au recours à des matières premières locales, mais aussi à une valorisation de la production et du recyclage locaux. Il serait inutile d'utiliser de la pierre des carrières communales qui est exportée pour être travaillée et réimportée sous-forme de produits finis. Il serait profitable soit d'utiliser le matériau dans l'état de transformation qui est possible d'obtenir localement, soit de favoriser une situation qui permettrait de garder sur place les procédés de production. Cela n'a pas seulement une influence positive sur le plan environnemental, mais permet aussi de garantir une économie régionale et la sauvegarde des savoir-faire. Cette quête de décentralisation serait profitable aux régions périphériques, mais nécessite le développement de nouvelles stratégies de gestion et de production, surtout en ce qui concerne les investissements publics et privés.

6.3. Le cas de la pierre naturelle

À la lumière de ce qui a été traité plus haut, il est possible de faire quelques considérations sur la pierre naturelle comme matériau de construction.

En premier lieu la roche est une ressource non-renouvelable, au moins dans des périodes significatives pour l'Homme, mais elle est largement disponible sur notre planète et, de plus, son exploitation a été très réduite pendant le siècle passé. Ceci est valable également pour la Suisse. De par sa disponibilité, une exploitation locale de petits gisements est possible. Ceci devrait être favorisé parce qu'elle réduit l'impact des carrières sur l'environnement. Ces mêmes pierres devraient être utilisées localement afin de pallier au problème du transport induit par le poids propre du matériau. La pierre naturelle est un matériau hautement réutilisable et durable, si ses dimensions sont en accord avec ses caractéristiques. Pour favoriser cela, une certaine standardisation est concevable. Les différentes formes de recyclage sont aussi aisées grâce au fait que la pierre naturelle de construction ne subit pas de vraies transformations au cours de sa production. La consommation énergétique d'une pierre naturelle locale est réduite parce que toute phase de transformation est éliminée. Le recours à des formes efficaces d'énergie pour la production d'électricité ou encore à des formes d'énergie mécanique est possible. En principe, aucune forme d'énergie thermique n'est nécessaire pour l'exploitation d'une carrière. La majorité des procédés de production nécessite une grande quantité de main d'oeuvre, ce qui aujourd'hui détermine, en partie, le coût élevé du matériau, mais qui contribue à réduire les investissements en énergie primaire. Ceci doit par contre être couplé à une stricte réglementation des conditions de travail afin de réduire les effets nocifs pour la santé des ouvriers. Ceci surtout à cause de la production de poussières, selon les roches également riches en quartz, et qui constituent, avec les

bruits émis par l'exploitation et le façonnage, les principales formes de pollution de la pierre naturelle. Le transport de la pierre naturelle, qui constitue la principale source d'investissement en énergie et de pollution, devrait se faire, normalement, sur des distances réduites ou alors avec des moyens efficaces, comme le chemin-de-fer ou le bateau. La pierre naturelle massive peut être transportée sans recours à des emballages, ce qui réduit la production de déchets de transport.

La maintenance réduite de la pierre naturelle, surtout si employée sous forme massive, contribue à sa faible consommation en énergie. La pierre est l'un des matériaux locaux par excellence, avec la terre et le bois, et son exploitation locale, par des équipes itinérantes pourrait constituer une bonne réponse sur le plan environnemental. En ce qui concerne la valorisation locale de la production, la dispersion des gisements exploités actuellement en Suisse ne facilite pas le travail de mise en commun de certains équipements. Il faut sûrement élaborer à ce niveau des stratégies régionales.

Dans les tableaux qui suivent, nous avons reporté les données, issues de différentes sources, concernant l'énergie nécessaire à la production des matériaux de construction et, en particulier, de la pierre naturelle sous différentes formes.

Produit final	Energie primaire: Berge, B. 2000 (MJ/kg)	Energie primaire: Sassi, P. 2008 (Kwh/t / KWh/m³)	Energie Primaire: Berge, B. 2009 (MJ/kg)	Energie Grise: Kasser, U., Pöll, M. 1999 (MJ/kg)
Granit, blocs	0,3	Pierre locale: 200/450	0,5	pierre locale comme revêtement 0,1
Marbre	0,3	-	pierres ornementales 1,5	-
Calcaire	0,3	-	0,5 (blocs)	-
Grès	0,3	-	0,5 (blocs)	-
Ardoise	< 0,3	200/540	< 0,5	-
Acier	21-25 (6-10 si 100% recyclé)	13'200-103'000	21-25 (6-10 si 100% recyclé)	11,5 (acier suisse)
Ciment Portland	4,0	2'200-2'860	3,6-4,0	0,68-0,85 (transporté, béton normal CEM I)
Terre (pour construction)	0,1	-	0,5	0,26 (briques séchage naturel)
Brique de terre cuite	2,0-3,5	175-1'120/300-2'016	2,0-3,0	2,39
Bois rond, séché à l'air	0,5	-	bois équarri 0,5 (16,5 y compris valeur comme combustible)	-
Bois rond, séché artificiellement	1,9	-	-	-
Bois en planches, séché à l'air	1,0	200/110	0,7 (16,7)	1,6
Bois en planches, séché artificiellement	3,8	-	3,0 (19,0)	3,1

	University of Tennessee – Center for Clean Products (Gross energy)		Natural Stone Council (Embodied energy)	
	Extraction (MJ/kg)	Transformation (MJ/kg)	Extraction (MJ/kg)	Transformation (MJ/kg)
Granit	1,340	4,568	4,853	17,936
Grès	0,229	-	0,432	-
Calcaire	0,293	0,672	1,477	4,958

Hammond, G., Jones, C. 2008		
Materials	Embodied Energy (MJ/kg)	Embodied Carbon (kgCO ₂ /kg)
Bricks – common	3	0,22
Cement Mortar (1:4 cement:sand mix)	1,12	0,177
Mortar (1:1:5 cement:lime:sand mix)	1,18	0,163
Concrete (1:1,5:3 cement:sand:aggregate)	1,11	0,159
Insulation – general	45	1,86
Insulation – mineral wool	16,6	1,2
Insulation – rockwool (cradle to site)	16,8	1,05
Plastic – polyurethane	72,1	34,67
Plastic – expanded polystyrene	88,6	2,5
Stone – general	1	0,056
Stone – granite	0,1 – 13,9	0,006 – 0,781
Stone – limestone	0,30	0,017
Stone – marble	2,00	0,112
Stone – marble tile (cradle to grave)	3,33	0,187
Stone – shale	0,03	0,002
Stone – slate	0,1 – 1,0	0,006 – 0,056
Stone – stone gravel	0,30	0,017
Timber – general	8,50	0,46
Timber – plywood	15	0,81
Timber – sawn hardwood	7,80	0,47

6.4. L'Inventaire de Cycle de Vie pour la pierre naturelle

6.4.1. Etat actuel

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour les matériaux de construction est une pratique de plus en plus diffusée. Il en est de même pour la pierre naturelle qui, dans ce domaine aussi, souffre d'un certain retard dans la réalisation de ces documents de la part des producteurs et des associations professionnelles, dont l'importance dans le processus de projet est grandissante. En effet, ces déclarations servent désormais à la certification des matériaux, au même titre que les autres données techniques et physiques.

Dans les dernières années et dans différents pays, des Analyses de Cycle de Vie pour différents types de produits en pierre naturelle (surtout les plaques minces de revêtement) ont été réalisées. Il faut sûrement citer les fiches du *Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction (CTMNC)*, en France, ou celles du *Center of Clean Products* de l'Université du Tennessee, aux Etats-Unis. En Suisse, nous disposons actuellement de deux sources d'information au sujet de la pierre naturelle: l'une est constituée par les "Données des écobilans dans la construction", publiée par la *Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics (KBOB)* [KBOB 2009], l'autre, plus spécifique, est formée par les documents de la base de données "Ecoinvent", gérée par les Hautes Ecoles suisses. Dans les deux sources, les informations sur la production d'éléments massifs est rare. C'est pourquoi nous avons réalisé des Inventaires de Cycle de Vie pour des éléments massifs à partir des méthodes et des données utilisées dans les documents "Ecoinvent" (Annexe A.9). Comme spécifié dans les fiches "Ecoinvent" pour les plaques en pierre naturelles [Ecoinvent 2007], les données ont été produites en recourant à un nombre élevé de valeurs assumées, à défaut d'une meilleure disponibilité de données publiques, et à cause de cela, elles ne doivent pas être utilisées pour des comparaisons avec d'autres matériaux [Ecoinvent 2007:17]. Nous nous limiterons à comparer deux types de produits issus de la pierre naturelle, c'est-à-dire les plaques minces (selon les

données "Ecoinvent") et les éléments massifs (selon les données que nous avons calculées sur la base des Inventaires de Cycle de Vie "Ecoinvent").

La *Fédération Allemande de la Pierre naturelle* (DNV) a récemment commandé une Analyse de Cycle de Vie pour comparer deux types de façade: la façade revêtue en pierre naturelle et celle fortement vitrée. L'objectif était de produire des valeurs qui, dans le cas de la pierre naturelle comme matériau de construction, manquent encore, afin de pouvoir les utiliser pour promouvoir l'usage de la pierre naturelle comme matériau écologique et durable. Les valeurs calculées pour l'énergie primaire, par mètre carré de façade, pour un cycle de vie de 100 ans ont montré qu'une façade en pierre naturelle nécessite, au total, environ un tiers de l'énergie par rapport à une solution vitrée. La façade en revêtement de pierre naturelle produit aussi, toujours pour 100 ans de durée de vie, des nuisances environnementales inférieures de 60 à 340 % que la solution vitrée. Les valeurs ont été calculées pour le potentiel de réchauffement global (GWP); le potentiel de déplétion ozonique (ODP); le potentiel d'acidification (AP); le potentiel d'eutrophisation (EP) et le potentiel de formation photochimique d'ozone (POCP) [Lachmann, H. 2010].

6.4.2. Limites du calcul de l'Inventaire de Cycle de Vie pour les éléments en pierre massive

Les principales limites du calcul de l'Inventaire de Cycle de Vie pour les éléments en pierre naturelle massive découlent du modèle contenu dans la base de données "Ecoinvent" pour les plaques minces sciées. À notre avis, ce modèle contient des approximations qui ne considèrent pas la réalité de la production des éléments en pierre naturelle et que nous allons ici de suite exposer. Ces points, issus de l'expérience directe faite dans les entreprises et dans les carrières, pourraient servir pour affiner les modèles de calculs utilisés. En ce qui concerne la présente recherche, nous nous sommes limités à modifier le modèle Ecoinvent sans intervenir sur ses composantes parce que ceci dépasse nos compétences.

La première approximation est, à notre avis, de considérer une valeur de l'énergie consommée pour la production des plaques minces sciées qui n'est pas fonction du nombre réel de découpes qui sont réalisées. Ceci limite la précision des données obtenues à la plaque de 50 x 50 x 3 cm, parce que toute modification de la taille de l'élément influence directement le nombre de découpes.

La deuxième approximation concerne la technique extractive qui, dans le cas du modèle "Ecoinvent", est supposée être celle du fil diamanté. Les observations faites sur les carrières suisses et leurs modes d'exploitation (voir le sous-chapitre II.2.3) montrent clairement que cette technique est loin d'être la plus répandue dans notre pays. Il faudrait donc considérer au moins la technique de découpe par perforation et explosif ainsi que celle par haveuse. Les techniques influencent non seulement la consommation d'énergie, mais aussi le type et la quantité d'émissions dans l'air.

Il faudrait donc pouvoir réaliser un modèle plus articulé, ce qui permettrait, notamment dans le cas de la production d'éléments massifs, de mieux prendre en compte l'optimisation entre mode d'exploitation et utilisation de la ressource extraite, autant du point de vue énergétique que de celui des émissions: des grands éléments sciés directement à la haveuse en carrière lors de l'extraction réduisent fortement l'investissement en énergie, mais aussi les émissions, par rapport à des plaques minces sciées.

6.4.3. Confrontation entre pierre naturelle en forme de plaques minces et éléments massifs

Nous avons décidé de confronter entre elles les données des Inventaires de Cycle de Vie pour les plaques minces et les éléments massifs pour les façades de bâtiment et, plus précisément, les valeurs concernant l'énergie investie et les poussières produites. Pour cela faire, nous avons utilisés les valeurs de la base de données "Ecoinvent", pour le cas des plaques minces, et en particulier celles concernant la plaque mince sciée ("Natural stone plate, cut, at regional storage") [Ecoinvent 2007:12] et les valeurs calculées pour le cas des éléments massifs en gneiss de dimensions 220x110x55 cm (Annexe A.9).

La confrontation entre les deux types de produits peut se faire de deux façons distinctes. La première considère les valeurs absolues, c'est-à-dire les valeurs contenues dans les Inventaires de Cycle de Vie respectifs, ces dernières étant toujours exprimées en fonction de l'unité de référence. Si l'unité de référence est la même, dans le cas présent un kilogramme, les données sont comparables. Nous démontrerons par la suite que cette méthode donne des résultats qui peuvent être contestés. En effet, dans le cas d'éléments de construction, il est nécessaire de pouvoir comparer des éléments qui assurent les mêmes fonctions en ayant des dimensions semblables. Dans le cas présent, l'élément en pierre massive est une partie de la structure porteuse du bâtiment, mais il assure aussi la finition intérieure et extérieure sur une surface de 2,42 m². La plaque mince, de son côté, est un simple élément de revêtement extérieur, d'une surface de 0,25 m². Il est donc nécessaire, pour comparer les deux éléments, de considérer, au moins, une structure porteuse pour le cas de la plaque mince ainsi que les ancrages nécessaires à sa mise en oeuvre.

6.4.3.1. Comparaison entre valeurs absolues

L'énergie investie est calculée comme étant la somme de l'énergie consommée pour l'extraction et la découpe de la pierre naturelle, en équivalent d'énergie thermique, et de l'équivalent en énergie thermique de la consommation en carburant diesel à l'intérieur de la carrière. Cette consommation en carburant est calculée selon le modèle "Ecoinvent", mais dans le cas de la production de l'élément massif nous avons considéré seulement la consommation de diesel pour l'extraction, donc surtout le transport des blocs extraits pour la découpe, sans ajouter, comme dans le cas de la plaque mince, la consommation issue du transport lors des différentes phases de découpe.

Plaque mince sciée: $(0,56 \text{ kWh/kg} * 3,6 \text{ MJ/kWh}) + 1,44 \text{ MJ/kg} = 3,4 \text{ MJ/kg}$ pierre naturelle
Element massif: $(0,56 \text{ kWh/kg} * 3,6 \text{ MJ/kWh}) + 1,08 \text{ MJ/kg} = 3,1 \text{ MJ/kg}$ pierre naturelle

La quantité de poussières produites lors de l'extraction et de la découpe des pierres naturelles est exprimée selon les trois classes de granulométrie proposés par "Ecoinvent" [Ecoinvent 2007:5-6]. Pour la plaque mince ceci correspond à la découpe d'une face et de deux côtés. Pour l'élément massif on a considéré le cas le plus défavorable, c'est-à-dire celui d'une découpe sur les six faces du bloc.

Plaque mince sciée:	poussières < 2,5µm:	5,60 E-04 kg/kg pierre naturelle
	poussières > 2,5 < 10 µm:	1,03 E-03 kg/kg pierre naturelle
	poussières > 10 µm:	2,80 E-04 kg/kg pierre naturelle
	TOTAL	1,87 E-03 kg/kg pierre naturelle
Elément massif:	poussières < 2,5µm:	1,75 E-04 kg/kg pierre naturelle
	poussières > 2,5 < 10 µm:	3,21 E-04 kg/kg pierre naturelle
	poussières > 10 µm:	8,80 E-05 kg/kg pierre naturelle
	TOTAL	5,84 E-04 kg/kg pierre naturelle

Selon ces résultats, l'élément massif demande un investissement d'énergie qui correspond au 90 % de celui nécessaire à la production d'une plaque mince et la production de l'élément massif dégage 31 % des poussières par rapport à celle d'une plaque mince. Ces résultats ne sont pas surprenants parce qu'il est aisé de comprendre que la production d'une plaque mince est un stade de production successif à celui d'un élément massif. Cela explique le pourquoi d'une consommation en énergie et d'une production de poussières supérieure. Pour les émissions de poussières dans l'air, la nette différence dans les valeurs est aussi explicable par la quantité de poussière produite par la découpe par kilogramme de pierre. Dans le cas de la plaque mince sciée, elle correspond à 0,037, et pour l'élément massif à 0,012. La surface de découpe par rapport à la taille de l'élément est grande dans le cas d'une petite plaque de revêtement et l'inverse est valable pour l'élément massif. Il faut aussi considérer que la découpe des six faces du bloc massif est le cas le plus défavorable, parce que ces éléments pourraient aussi être produits avec les deux faces brutes et les quatre côtés découpés, ceci surtout dans le cas de roches clivables. Dans ce cas de figure, la quantité de poussières produites est réduite au 7 % de celle dégagée par la découpe d'une plaque mince (voir Annexe A.9).

Grâce aux valeurs obtenues pour la consommation énergétique, il est possible de calculer les émissions de gaz à effet de serre pour la production d'une plaque mince sciée et d'un élément massif. Les valeurs contenues dans les "Données des écobilans dans la construction" sont utilisées pour ces calculs: en particulier, la valeur de l'émission de gaz à effet de serre du diesel pour engins de chantier et celle du "mix consommateur CH", pour l'énergie consommée provenant de sources variées [KBOB 2010].

Plaque mince sciée:	$2,016 \text{ MJ/kg} * 0,0428 \text{ kg}_{\text{gaz effet de serre}}/\text{MJ}$ $+ 1,44 \text{ MJ/kg} * 0,0828 \text{ kg}_{\text{gaz à effet de serre}}/\text{MJ}$ <hr/> $= 0,205 \text{ kg}_{\text{gaz effet de serre}}/\text{kg}_{\text{pierre naturelle}}$
Élément massif:	$2,016 \text{ MJ/kg} * 0,0428 \text{ kg}_{\text{gaz effet de serre}}/\text{MJ}$ $+ 1,08 \text{ MJ/kg} * 0,0828 \text{ kg}_{\text{gaz à effet de serre}}/\text{MJ}$ <hr/> $= 0,176 \text{ kg}_{\text{gaz effet de serre}}/\text{kg}_{\text{pierre naturelle}}$

Comme indiqué dans l'inventaire de cycle de vie pour la plaque mince sciée, contenu dans "Ecoinvent", il faut considérer également le transport des produits du lieu de production à celui de stockage et donc la quantité de gaz à effet de serre libérée. Dans le cas d'une plaque mince sciée, cette distance est assumée comme étant de 300 km, ce qui correspond à un entrepôt situé au centre de la Suisse. Pour les éléments massifs de construction, il nous semble difficile d'imaginer un stockage parce que ces éléments sont produits en carrière, où ils peuvent être éventuellement entreposés, et ensuite acheminés vers le chantier. Ces transports sont effectués, en Suisse, par camion. En considérant un camion de capacité de 20 t, le transport de la pierre naturelle produit:

$$0,0002 \text{ kg}_{\text{équivalent CO}_2}/\text{kg}_{\text{pierre naturelle}} * \text{km}^{49}.$$

Pour le transport des plaques minces vers l'entrepôt, la quantité de gaz à effet de serre émise est de $0,06 \text{ kg}_{\text{équivalent CO}_2}/\text{kg}_{\text{pierre naturelle}}$ qu'il faut donc ajouter à la valeur précédemment obtenue pour la plaque mince sciée.

L'élément massif produit donc, en absolu, moins de gaz à effet de serre que la plaque mince. Il est clair qu'une comparaison sur la quantité réelle de matériau mise en oeuvre produirait un résultat défavorable pour l'élément massif, mais, comme cela a déjà été soulevé auparavant, il faut toujours

49. Ces valeurs sont issues d'une formule de calcul fournie par le prof. Stéphane Citherlet du Laboratoire LESBAT de l'HES-IG VD d'Yverdon-les-Bains.

ajouter à la plaque mince les valeurs des émissions produites par la structure de support, celle porteuse et les matériaux de finition.

6.5. Projeter la durabilité d'une construction en pierre naturelle

Le projet de "durabilité" [Sassi, P. 2006] est une nécessité si l'on souhaite pouvoir transformer des problèmes purement techniques, c'est-à-dire les prescriptions en matière d'écobilans liés aux matériaux de construction, en contraintes pour le projet d'architecture. Il est donc nécessaire d'envisager l'utilisation de matériaux et de techniques de mises en oeuvre qui facilitent la réutilisation et la recyclabilité en fin de cycle de vie de l'ouvrage (*re-cycling vs. down-cycling*). L'autre manière d'appréhender la question est de projeter des ouvrages qui par leur type et par leur structure peuvent être transformés dans le temps. On atteint, dans ce cas, un idéal de "forme durable"⁵⁰ : «L'architecture est, de toutes les expressions de l'art, celle qui est la plus soumise aux conditions matérielles. Permanentes sont les conditions qu'impose la nature, passagères celles qu'impose l'homme. [...] C'est par la construction que l'architecte satisfait aux conditions tant permanentes que passagères. [...] L'édifice, c'est la charpente munie des éléments et des formes imposées par les conditions permanentes qui, le soumettant à la nature, le rattachent au passé et lui confèrent la durée.» [Perret, A. 2006:455-456].

Dans les deux cas, la pierre naturelle est un matériau approprié. Dans le cas de la réutilisation les exemples du passé nous démontrent cette aptitude. Il suffit de citer le réemploi des pierres des monuments romains par les bâtisseurs du Moyen-Âge. Ceci permet de réduire les impacts environnementaux liés à l'extraction et au transport de la matière première sur une durée de vie très étendue. Cette dernière dépend non seulement du type de roche et de sa résistance aux agents atmosphériques, mais aussi de la mise en oeuvre et de l'emplacement occupé par la pierre dans l'édifice. Toute pierre, si elle est bien utilisée et au bon endroit, est susceptible de durer pendant des siècles.

Plus proches de nous, dans le temps et dans l'espace géographique, deux reconstructions après déplacement d'immeubles en pierre de taille: la première est celle des Grands-Châtillons à Genthod, dans le canton de Genève, qui est une maison de maître en molasse appareillée, construite en 1781 au quartier des Eaux-Vives à Genève, et qui a été reconstruite, après avoir été démontée pierre à pierre, sur son emplacement actuel à Genthod en 1907 [Amsler C. 2001]. La Villa Richelieu à l'Avenue de l'Elysée n. 40 à Lausanne est un cas similaire: c'est un immeuble d'habitation de 1911 construit selon le plan et avec les pierres d'un immeuble édifié vers 1875 à l'Avenue de la Gare [INSA 5 1990:330].

6.5.1. Réutilisation

Pour se rapprocher de la période contemporaine, il est utile d'analyser deux exemples de construction dans lesquelles la réutilisation de la pierre naturelle n'est pas seulement une nécessité, mais devient thème architectural.

50. J'ai emprunté l'expression "forme durable" à un cours sur le développement durable et ses répercussions sur l'architecture donné par Marco Svimmersky, architecte, dans le cadre de l'Atelier du Prof. Luca Ortelli à l'EPFL de Lausanne. Elle synthétise, à notre avis, la possibilité de répondre aux exigences de "durabilité" par les moyens qui sont propres à la discipline architecturale. Je remercie Marco Svimmersky de m'avoir rendu conscient de cela.

6.5.1.1. Maison à l'Avenida da Boavista, Porto (1987-1993), de Eduardo Souto de Moura: des "objets trouvés"

Comme pour le projet sicilien de Francesco Venezia, dans le projet pour une maison à l'Avenida da Boavista, l'architecte portugais Eduardo Souto de Moura réemploie les pierres d'une vieille école conventuelle et d'une ruine appelée "La Belle au bois dormant" ("A Bela Adormecida") pour la construction du mur d'enceinte, qui est aussi, par endroits, la façade de la maison. À la différence du cas sicilien, Souto de Moura n'opère pas une reconstruction à l'identique du mur, mais plutôt un collage d'"objets trouvés". Le résultat final est un espèce de *lapidarium* constitué par des morceaux de corniches, de moulures, de liernes, qui donnent du relief à la surface de la maçonnerie. Le mur de la maison se rapproche donc des anciens murs moyen-âgeux construits à travers la dépouille des monuments antiques et permet de conserver les traces de ces constructions. Le recours à la technique du "collage" enlève, par contre, toute référence à un processus de pure conservation ou restauration en redonnant aux pierres leur simple valeur constructive, de matériau. Il faut noter que Souto de Moura utilise ces pierres, même si leur épaisseur est importante, comme éléments de revêtement pour un mur de béton armé.



Fig. III.24-25. Eduardo Souto de Moura, maison à l'Avenida da Boavista, Porto, 1987-1993: le mur d'enceinte avec les fragments archéologiques [Souto de Moura, E. 1994]. Dimitris Pikionis, Parc de l'Acropole, Athènes, 1954-1957: les repères archéologiques [Ferlenga, A.1999]

6.5.1.2. Dimitris Pikionis: le fragment piranésien et le travail archéologique

La fameuse série de gravures de Piranese contenues dans "Le antichità romane", qui représentent des plans de parties de la ville, sont comparables à des juxtapositions de fragments. Selon cette lecture, les oeuvres réalisées par Dimitris Pikionis [Ferlenga, A. 1999] pour l'aménagement du Parc de l'Acropole d'Athènes (1954-57) ainsi que certains murs de bâtiments qu'il construisit, en particulier ceux de la maison Garis, au Palaio Psychiko à Athènes (1960-64), peuvent être rapprochés de ce procédé. En effet, Pikionis réemploie des fragments de pierres qu'il trouve sur place et qui ont appartenu à tout genre d'ouvrage. En ce sens, ce sont des repères archéologiques qui témoignent non seulement des monuments, mais de toute construction grecque en pierre. Les fragments sont soit intégrés dans des maçonneries, dans lesquelles ils acquièrent une valeur presque décorative, soit ils constituent des parties d'aménagements du parc: des assises, des bancs, des marches, etc. Ces éléments de

réemploi ainsi que l'utilisation de types de roches locales aident à produire cet effet d'effacement des architectures de Pikionis, qui les affranchit de la dépendance temporelle à leur époque tout en les redonnant à leur environnement.

6.5.2. La forme durable

Dans la deuxième attitude adoptée vis-à-vis du problème du projet de "durabilité", c'est-à-dire celle de la "forme durable", outre une structure pérenne, il est nécessaire de concevoir la possibilité de remplacement de certaines parties de la construction qui seraient dépendantes des "besoins passagers". Si ces éléments sont souvent des équipements ou des cloisons intérieures nécessaires pour organiser les espaces, on peut aussi y ajouter les éléments de l'enveloppe garantissant l'isolation thermique. Ceci, d'une part, à la lumière de la durée de vie réduite des matériaux isolants (ou plutôt de la réduction dans le temps de leurs performances) et, d'autre part, vu les exigences très variables dans ce domaine qui risquent de rendre obsolète une construction dans un temps inférieur à sa durée de vie estimée. La structure, l'ossature, réacquiert donc une grande valeur et nécessite de solutions architecturales et constructives adaptées.

6.5.3. Solutions constructives garantissant la réutilisation et une meilleure durabilité

Afin de pouvoir garantir une longue durée de vie à la pierre naturelle, il est nécessaire de mettre en oeuvre non seulement un matériau "durable" du point de vue de sa résistance aux agents atmosphériques, mais aussi tous les dispositifs architecturaux qui visent à la protection de la pierre naturelle de ces atteintes nuisibles. Comme il est expliqué au sous-chapitre I.4.7, les roches présentent des degrés de résistance aux agents atmosphériques variables. Dans le cas d'une utilisation structurelle de la pierre naturelle, il est nécessaire qu'aucune forme de dégradations n'apparaisse, parce qu'elles auraient des conséquences directes sur la sécurité statique de l'ouvrage. La pierre massive, grâce aux fortes épaisseurs des éléments, peut, par contre, supporter l'apparition de différentes formes d'altérations. Il est clair que, si l'on veut privilégier le recours à des roches locales pour la réalisation de maçonneries, il n'est pas toujours possible de mettre en oeuvre des roches qui présentent une grande résistance aux agents atmosphériques: c'est le cas, par exemple, des grès de la Molasse qui sont largement utilisés dans le Plateau suisse pour leurs bonnes caractéristiques mécaniques. Dans ces cas de figure, l'architecture doit remédier aux défauts des matériaux à travers ses déclinaisons formelles.

La toiture, surtout à travers des saillies (avant-toits), permet de réduire fortement les problèmes de la pluie battante sur les façades. Les balcons peuvent assumer aussi, selon leurs dimensions, cette fonction protectrice.

Les corniches, éléments largement utilisés dans l'architecture savante pour articuler les façades horizontalement, peuvent aussi dévier la pluie. Traditionnellement ces éléments sont réalisés avec des roches résistantes aux agents atmosphériques. Des éventuels retraits dans la façade peuvent, par contre, faciliter la stagnation de l'eau de pluie et engendrer des altérations qui, à la longue, risquent de se transformer en dégradations.

Le soubassement est aussi un élément qui augmente la durabilité de la maçonnerie en pierre naturelle parce qu'il empêche les remontées capillaires de l'eau depuis le terrain à travers les fondations. Dans ce cas aussi, les roches utilisées sont généralement plus résistantes. Ceci également parce que l'eau de

pluie jaillit contre le sol et altère la pierre naturelle du soubassement. Cette protection est nécessaire parce qu'elle réduit le risque de propagation de sels à l'intérieur de la maçonnerie, ce qui représente toujours l'une des attaques les plus dangereuses pour tout type de roche. Pour des constructions placées dans des terrains où la présence de sels est connue ou dans lesquels il y a un apport de sels (par exemple, sels de déverglaçage le long de routes ou chemins, fertilisants agricoles, etc.) il est impératif de mettre en oeuvre des soubassements qui puissent protéger la maçonnerie de pierre naturelle soit en utilisant des roches très résistantes (comme les granits ou les gneiss) ou d'autres matériaux résistants aux attaques salines, soit en appliquant une couche de protection (sous la forme d'un crépi, par exemple).

Les solutions constructives adoptées pour la mise en oeuvre de la maçonnerie, en particulier la nature des joints horizontaux et verticaux, ainsi que les connexions entre la structure verticale et horizontale, déterminent la possibilité de démontage des différentes parties et, en conséquence, leur réemploi. Le recours à une maçonnerie de pierre naturelle non armée et hourdée au mortier bâtard ou de chaux facilite le démontage, ou la déconstruction, de celle-ci. Les parpaings peuvent être séparés sans produire des cassures ou des fissures, du fait que le mortier employé est moins résistant que la pierre naturelle. Dans le cas d'une utilisation de moyens mécaniques de connexion entre les pierres, ces derniers devraient être fixés de manière à permettre leur démontage. Le recours à des mortiers à base de résines est, en général, à proscrire parce qu'il produit des ensembles difficilement séparables. Les connexions entre la maçonnerie et les dalles ou planchers doivent également être développées en vue du démontage des différents éléments. Dans le cas des dalles en béton armé liées par simple frottement cette opération est simple, mais déjà leur fixation par le biais des fers d'armature peut engendrer des difficultés au moment de la démolition. Les connecteurs métalliques utilisés pour la fixation des planchers en bois massif permettent, en général, leur démontage, mais, selon le type de scellement adopté, peuvent rendre difficile leur séparation des éléments en pierre naturelle. En règle générale, il faut privilégier les fixations mécaniques qui ne nécessitent pas d'adhésifs.

7.1. Structures porteuses pour bâtiments

L'utilisation première de la pierre naturelle de taille sous forme massive, étudiée dans le cadre de cette recherche, est la construction de structures porteuses pour les bâtiments. Au début de ce chapitre, ceci a été restreint au cas des bâtiments de logement de taille moyenne. Cela signifie, surtout, une forme compacte, une surface limitée d'environ 220 m² par étage et une hauteur maximale de six niveaux. Pour ce type d'édifice, les maçonneries de pierre naturelle permettent d'assurer autant la fonction de structure porteuse que de stabilisation, aussi en cas de séisme (voir le sous-chapitre III.4.6). Pour cela deux différentes formes de structure peuvent être employées: la première prévoit une structure périphérique ainsi qu'un refend intérieur comme éléments porteurs et de stabilisation. Dans la deuxième, la stabilisation est assurée simplement par un noyau central de forme adaptée. La première solution s'apparente à celles traditionnellement mises en oeuvre dans les bâtiments de logement: la façade est porteuse ainsi qu'un ou plusieurs murs intérieurs et le reste des maçonneries a le rôle de cloisons. C'est un système efficace et éprouvé, mais la pierre naturelle risque soit de rester simplement visible à l'extérieur à cause de couches isolantes internes soit d'être omniprésente à l'intérieur du logement, ce qui ne constitue pas forcément un gage de qualité, selon le type de roche utilisé. La deuxième solution profite des bonnes caractéristiques de la maçonnerie en pierre naturelle pour limiter son utilisation à la construction du noyau central du bâtiment. La structure périphérique assure simplement la fonction porteuse et peut être réalisée soit en pierre naturelle massive soit avec d'autres matériaux de construction. Cette variante est applicable dans la construction de bâtiments de logement avec des standards énergétiques accrus (par exemple, en Suisse, Minergie® P) qui nécessitent de façades fortement isolées, dans la plupart des cas en construction légère, et d'une masse intérieure pour garantir, grâce à l'inertie thermique, le confort des habitants. Un noyau en maçonnerie de pierre naturelle garantit une bonne partie de cette masse et, en plus, permet d'introduire dans le logement la présence sensible de ce matériau, par exemple, sous la forme d'un mur qui structure la distribution de l'appartement ou qui se trouve dans une pièce de vie commune. Si la pierre naturelle de taille de cette maçonnerie est d'origine locale elle peut, couplée à d'autres éléments de la construction, amener à la certification écologique des matériaux de construction (en Suisse, par exemple, Minergie® Eco).

7.1.1. Structure périphérique avec murs de refend intérieurs

Ce type de structure permet l'utilisation de tous les types de maçonneries en pierre naturelle, toutefois il faut veiller, dans le cas d'un système basé sur des trilithes aux connexions entre les piliers et les architraves afin qu'elles puissent reprendre les efforts horizontaux. Le cas de trilithes de portée réduite est sûrement favorable. Les murs de refend intérieurs sont construits plutôt comme des murs continus ou des pans de murs reliés par un chaînage. Dans un bâtiment de logement de forme compacte, tel que celui utilisé comme cas d'étude pour ce chapitre, un seul mur de refend longitudinal est suffisant. L'épaisseur minimale des maçonneries est de 25 cm (voir le sous-chapitre III.4.6). La cage d'escalier et celle de l'ascenseur peuvent être construites à l'aide de maçonneries traditionnelles en briques de ciment ou de terre cuite. L'éventuel recours à une tour d'ascenseur en béton armé augmente la stabilité de l'ensemble, mais elle doit être disposée en correspondance du centre de masse afin de réduire les

risques liés à la torsion. Dans ce cas, le mur de refend peut s'avérer superflu. L'appareillage de toutes les maçonneries doit être exempt de coups de sabre et les chaînages d'angle doivent être continus.

7.1.2. Noyau de stabilisation

La forme géométrique du noyau doit être attentivement étudiée et développée afin de produire la capacité de stabilisation souhaitée. Le noyau doit se développer de manière symétrique autour du centre de masse du bâtiment. La maçonnerie de pierre naturelle de taille appareillée en mur continu est la meilleure solution. Les murs doivent avoir une longueur suffisante et se développer selon l'axe transversal et longitudinal. Les interruptions, sous forme d'ouvertures, doivent être réduites. Une autre forme constructive possible est celle constituée par un élément en maçonnerie clos sur les quatre côtés et situé autour du centre de masse: ce système est proche des structures *tube-in-tube*. Pour un immeuble de logement, il est difficile d'envisager plus de deux éléments de ce type: dans ce cas, il pourraient contenir, par exemple, les salles d'eau.

En général, le noyau contient la distribution verticale et, éventuellement, des locaux de services communs ou de l'appartement. La présence d'une tour d'ascenseur en béton armé peut augmenter la stabilité, mais une maçonnerie traditionnelle peut être utilisée pour sa construction (voir le sous-chapitre III.4.6). L'épaisseur de la maçonnerie est augmentée par rapport au cas précédent et elle est au minimum de 40 cm, pour un appareillage normal. Pour ces maçonneries l'appareillage est également à soigner au niveau des chaînages d'angle et des coups de sabre.

7.2. Enveloppes autoporteuses

Le cas de la construction de façades autoporteuses en pierre naturelle a été introduit dans le cadre de cette recherche parce qu'elle constitue un champ d'application à court terme pour ce matériau. En effet, à l'heure actuelle, la pierre naturelle est très utilisée comme matériau de revêtement, d'une part pour sa durabilité et, de l'autre, pour les possibilités expressives qu'elle permet d'atteindre. Comme dans le reste de la recherche, les raisons objectives de l'utilisation de ce matériau sous forme massive pour la construction de façades autoporteuses sont analysées en mettant en évidence les avantages et les problèmes auxquels le constructeur est confronté.

Les exemples utilisés pour illustrer certains des points qui suivent ont été choisis par leur caractère exemplaire, mais aussi par "goût" personnel et sans aucune prétention d'exhaustivité.

7.2.1. De la façade massive aux enveloppes multicouches. La solution autoporteuse

Le développement des structures porteuses en ossature, quel que soit le matériel avec lequel elles sont réalisées, a posé le problème de la "valeur" des murs entre les éléments porteurs isolés. Ce type de construction a donc posé aux architectes le problème de définir le statut de ces remplissages et de leur rapport à la structure. Dans le cas des revêtements, ce rapport est, techniquement, de dépendance parce que ces éléments nécessitent de la structure pour être portés. Dans le cas des façades rideau en verre, par exemple, ces dernières possèdent souvent une structure porteuse propre qui ne coïncide pas avec celle qui porte le bâtiment. Le cas des façades autoporteuses est différent parce que ces dernières ne nécessitent pas d'une structure porteuse à laquelle se connecter, si ce n'est ponctuellement pour en augmenter la stabilité. Il est clair que ce type de façade, indépendante de la structure porteuse, peut être réalisée aussi sur une structure porteuse murale en maçonnerie, mais dans ce cas une plus grande

dépendance entre les deux se réalise naturellement à cause, simplement, de la nécessité de faire coïncider les ouvertures. Dans le cas d'une ossature, la façade peut, par contre, être développée selon des principes de composition qui ne sont pas directement en rapport avec la structure et son rythme de pleins et de vides.

Une façade autoporteuse en pierre naturelle de taille peut être réalisée soit pour une structure porteuse murale soit pour une ossature. Si la structure est formée par un mur, la façade en pierre naturelle reprend la même trame de composition, tout en pouvant être travaillée au niveau de sa surface autant par des différences d'alignements verticaux que par le traitement de la pierre naturelle. Si la structure est une ossature, deux variantes de conception sont possibles: une composition de la façade en liaison avec la structure ou une façade indépendante. Pour la première solution, la structure de la façade prend surtout l'aspect d'une succession de trilithes; pour la deuxième, une maçonnerie peut aussi être utilisée. Le premier cas est bien représenté par une réalisation récente des architectes suisses Müller et Truniger: le nouveau siège de la Mairie de Jona, dans le Canton de Saint-Gall, construite entre 1994 et 1998. La façade autoporteuse est réalisée en grès arkosique, sauf pour le socle en gneiss de Vals, et se calque sur la structure en ossature de béton armé pour les quatre niveaux. Le cas de la façade indépendante pose, par contre, le problème de la définition des règles de composition et des rapports entretenus avec les pièces qui se trouvent à l'arrière. Ces rapports sont aussi d'ordre fonctionnel comme, par exemple, la qualité de la lumière naturelle ou la possibilité de ventilation naturelle. En effet, la liberté de composition peut, parfois, amener à une conception de la façade comme "écran" qui nie l'organisation du bâtiment. Une attitude de ce type a été reprochée à l'architecte anglais Edwin Lutyens par le critique Roderick Gradidge à propos de ses réalisations des années 1920 pour des bâtiments de bureaux à Londres [Gradidge, R. 1981:73-75]. C'est le cas, par exemple, de la Midland Bank à Londres (1924-1939) ou, toujours à Londres, de la Britannic House à Finsbury Circus (1920). La structure de ces édifices est une ossature en acier qui permet l'organisation rationnelle des bureaux et elle est l'oeuvre d'un bureau de constructeurs spécialisés dans ce domaine [Gradidge, R. 1981:74]. Edwin Lutyens dessina simplement les façades autoportuses en pierre de taille selon des principes de composition basés sur les ordres classiques. C'est un choix constructif qui ne peut pas être critiqué en soi, mais qui démontre ses limites par le fait qu'une série de pièces de fonction identique, les bureaux, ont des ouvertures différentes en taille, et cela au détriment de leur utilisation. Le cas du Centre des hautes études Musicales à Saint-Jacques de Compostelle (1999-2004), de l'architecte espagnol Antón García-Abril, dont la façade autoporteuse a été réalisée avec de gros blocs de granites, montre que dans le cas d'un programme de ce type, dans lequel les grands espaces des auditoriums priment, une composition abstraite peut répondre autant aux exigences fonctionnelles que de langage architectural. Dans tous les cas, la première règle à laquelle une façade autoporteuse est soumise est celle dictée par la statique, vu qu'elle doit être statiquement autosuffisante, même dans les compositions les plus abstraites.

L'abandon des structures monolithiques s'est accentuée, d'au moins en Occident, à partir des années 1970, après la première crise pétrolière. Ceci s'est traduit, principalement, dans l'interposition de couches de matériaux d'isolation, dont le rôle est celui de réduire les déperditions thermiques, entre celles porteuses et celles de parement. La conséquence principale de l'introduction de ces couches a été

le passage d'une structure monolithique de la façade à une enveloppe stratifiée, assurant des fonctions spécifiques (porteur, isolant, barrière vapeur, pare vent, revêtement intérieur et extérieur, etc.). Les nouvelles normes en matière de réduction des déperditions énergétiques amènent naturellement vers des solutions basées sur l'augmentation progressive de l'épaisseur des couches d'isolation et ceci à défaut des isolations sous-vide qui, pour le moment, ne se sont pas encore affirmées sur le marché à cause de leur prix élevé et de la difficulté dans leur mise en oeuvre. Cette augmentation de l'épaisseur de l'isolation se répercute de manière négative sur la construction des revêtements de la façade. En effet, si l'on exclu la solution de la couche de crépis appliquée directement sur une isolation périphérique, toute autre forme de revêtement de façade qui n'est pas autoporteuse nécessite d'une structure qui puisse en garantir la stabilité et la résistance. C'est le cas, par exemple, de la façade ventilée en pierre naturelle qui est traitée ci-dessous.

7.2.1.1. La façade ventilée à l'époque des isolations thermiques de forte épaisseur

La solution de la façade ventilée constituée par des plaques minces de pierre naturelle, soit ancrées directement à la structure porteuse soit soutenues par un système de rails métalliques, est très répandue depuis les années 1970, surtout dans le cas des bâtiments représentatifs. Le problème constructif principal est actuellement constitué par la distance entre les plaques et les ancrages: c'est-à-dire l'épaisseur de l'isolation et du vide d'air garantissant la ventilation, qui se traduit par un bras de levier élevé. Cette épaisseur atteint aujourd'hui facilement les 20 cm, ce qui produit de fortes sollicitations au niveau des ancrages ou de la structure métallique. Ceci implique le recours à des ancrages de grandes dimensions. Les coûts de cette solution constructive augmentent, et il en est de même pour le nombre de ponts de froid ponctuels (en moyenne chaque plaque comporte quatre ancrages). Pour pallier ce dernier défaut, des ancrages en deux parties avec coupure du pont thermique ont été mis sur le marché, mais leur complexité également au niveau de la mise en oeuvre les rendent peu concurrentiels⁵¹.

C'est pour ces raisons que la solution d'une façade en pierre naturelle autoporteuse pourrait, aussi en ce qui concerne son coût, représenter une alternative à la façade ventilée. En effet, sa stabilité est assurée par un nombre d'ancrages qui est, en général, inférieur à celui des plaques suspendues (le nombre d'ancrages diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la paroi) et elle est indépendante de l'épaisseur de l'isolation.

7.2.2. Le caractère des façades en pierre massive

Au-delà des problèmes techniques posés par la suspension des éléments minces en pierre naturelle, l'utilisation de la pierre massive permet d'atteindre une plus grande variété dans l'aspect. En effet, grâce à l'épaisseur des éléments, différents types de traitements de surfaces sont permis. Il en est de même pour les types de pierre naturelle. Si pour sa production, la plaque mince nécessite de types de pierres naturelles très dures, avec une structure homogène et des valeurs de résistance à la traction élevées, l'élément massif, par contre, peut être produit aussi à partir de roches tendres et de qualité inférieure. Ceci permet l'utilisation de ressources locales qui actuellement ne répondent plus aux

51. Ces réflexions découlent, entre autres, de l'intervention de l'ingénieur Rainer Krug, membre de la *Deutsche Naturstein Verband*, sur les ancrages des plaques de revêtement de façade en pierre naturelle lors de la Journée d'Etude du 22 avril 2009, organisée par la *Naturstein Verband der Schweiz*, qui a eu lieu à Zoug.

exigences des façades ventilées. Il ne faut pas oublier que le recours à des pierres massives augmente la durabilité des revêtements ainsi que le potentiel de réutilisation. Ces différents points sont développés dans les sous-chapitres qui suivent.

7.2.3. Les différentes formes de traitement de la surface

Les possibilités offertes par l'utilisation d'éléments de façade en pierre naturelle de forte épaisseur ont été exploitées par certains architectes afin de souligner le caractère des édifices. Ceci notamment avec l'emploi de pierres brutes qui, assemblées selon des appareillages simples, produisent des effets de surface évoquant la massivité. C'est le cas, par exemple, des blocs de granite noir de Göinge (nord Skåne)⁵², dont la surface irrégulière a été produite par simple cassure hydraulique, employés par l'architecte Peter Celsing pour le revêtement de la façade de la Riksbank, construite à Stockholm entre 1968 et 1974.

L'architecte espagnol Antón García-Abril a, par contre, utilisé des blocs de granite Mondariz de grandes dimensions (longueur libre, épaisseur 30 cm et hauteur d'assise de 175 cm), qui ne nécessitent pas d'ancrages [Detail 2006] et dont la face visible présente les cannelures produites par les perforations nécessaires pour la séparation des blocs en carrière. Les blocs sont simplement empilés les uns sur les autres comme revêtement de la façade du Centre des hautes études Musicales à Saint-Jacques de Compostelle (1999-2004).



Fig. III.26-27. Peter Celsing, Riksbank, Stockholm, 1968-1974: façade en granite noir de Göinge [Erup, L. 1984]. Antón García-Abril, Centre des hautes études Musicales, Santiago de Compostela, 1999-2004: façade en blocs massifs de granite Mondariz [Detail 2006]

52. Informations issues du site internet de la Riksbank: <http://www.riksbank.com/templates/Page.aspx?id=10417>, consulté le 06.01.2010.

7.2.4. L'intégration au lieu

La pierre naturelle locale est aussi un moyen de tisser des liens entre un nouvel édifice et son environnement proche, là où ce matériau forme le relief du terrain, où, depuis toujours, l'on puise pour la construction des bâtiments et des structures. Le contexte urbain des villes européennes, mais non seulement, est fortement marqué par la construction en pierre naturelle. C'est le cas du nouveau siège de la Mairie de Jona, construit entre 1994 et 1998, et projeté par les architectes Müller et Truniger, dont le caractère représentatif est souligné, d'une part, par un langage strict et une volumétrie simple, et, de l'autre, par l'utilisation d'une façade massive de 12 cm d'épaisseur en grès arkosique type Lehholz, une roche exploitée à proximité de la commune (env. 3,5 km). Cette solution, basée sur une façade autoporteuse avec ancrages traditionnels à raison d'un ancrage chaque mètre carré, a été choisie pour l'effet de masse dégagée, mais aussi parce que plus économique par rapport à une solution avec plaques suspendues, dont la réalisation avec un grès arkosique⁵³ aurait été impossible. Une approche semblable est celle qui a amené l'architecte espagnol Rafael Moneo à choisir un revêtement en calcaire fossilifère local (la "lumaquela", définie souvent comme un grès) pour la façade de l'agrandissement de la Mairie de Murcia (1991-1998). Cette façade, qui s'articule comme une superposition de loggias à l'échelle de la place et de la ville, se relie à la cathédrale, qui lui fait face, aussi à travers l'utilisation du même type de pierre naturelle. Moneo en assure ainsi «son intégration avec son environnement» [Moneo. R. 2000]. Pour les mêmes questions d'intégration au contexte bâti, mais aussi pour ses bonnes qualités de durabilité, l'architecte anglais Eric Parry a choisi d'utiliser le calcaire oolithique de Bath pour la façade autoporteuse de la nouvelle aile des logements pour les étudiants du Pembroke College à Cambridge (1993-1997), qui renoue ainsi avec l'aspect des anciens édifices du campus [Eric Parry architectes, éd. 2002].

7.2.5. Durabilité des façades massives

L'utilisation de la pierre sous forme massive pour la construction de façades autoportuses est une solution "durable" à plusieurs niveaux. Premièrement, ce type d'élément en pierre naturelle est plus résistant aux agents atmosphériques parce qu'une quantité plus grande de matière est mise en oeuvre. Deuxièmement, cette durée de vie accrue permet une réutilisation aisée des éléments en pierre. Troisièmement, le format et les techniques de production permettent l'utilisation de pratiquement tous les types de roches qui supportent une exposition à l'extérieur, et éventuellement d'une qualité inférieure à ceux pour la production de plaques minces. Ce dernier point peut avoir un rôle déterminant dans le coût financier d'une telle solution par rapport à une façade ventilée en plaques minces.

7.2.5.1. Une réserve de matière contre les altérations

Les principales formes d'altérations auxquelles la pierre naturelle est soumise sont causées par les agents atmosphériques, surtout par l'eau dans tous ses états physiques. L'intérêt principal lors de la mise en oeuvre d'une pierre naturelle est de réduire au maximum les risques de dégradation, c'est-à-dire des altérations qui peuvent porter préjudice à la stabilité de la construction et constituer donc un danger. La majorité des dégradations se traduit soit par une perte de cohérence dans la

53. Informations fournies par l'architecte Andreas E. Müller, le 2 juillet 2009.

structure de la roche soit par une perte de matière. C'est le cas, par exemple, du délitage d'un grès (perte de cohérence de la structure sédimentaire) et de sa désagrégation sableuse (perte de matière par érosion). Pour éviter le premier type de dégradation, il est nécessaire de choisir la bonne pierre et de la mettre en oeuvre selon les règles de l'art. En ce qui concerne la perte de matière, il est difficile, surtout pour certaines roches sédimentaires, de l'éviter, mais il est possible d'en réduire les conséquences par le type de mise en oeuvre, les précautions architecturales ainsi que par une "réserve" de matériau. Cette réserve est garantie par des éléments de plus grande épaisseur. Cette quantité accrue de roche a des effets bénéfiques contre les altérations engendrées par les variations de température grâce à l'augmentation de la masse d'accumulation. Ce type de dégradation est assez répandu pour les plaques des façades ventilées sous la forme, par exemple, de cassure au droit des ancrages par dilatation thermique (si tout déplacement est empêché) ou par le phénomène de déformation, par exemple des plaques de marbre, dû aussi aux variations hygrométriques.

7.2.5.2. Une réserve de pierre réutilisable

L'augmentation de la durée de vie engendrée par une durabilité accrue est l'un des paramètres qui permet de réutiliser les éléments d'une façade autoporteuse. Ceci est facilité aussi par le format des pierres qui en facilite l'utilisation aussi pour d'autres éléments constructifs, ce qui n'est pas le cas pour les plaques. Le système d'ancrage simple, généralement constitué par des fers scellés dans le mortier de pose ou par des ancrages métalliques, permet le démontage de la maçonnerie.

7.2.5.3. Une possibilité d'augmenter l'utilisation de la ressource

L'augmentation de l'épaisseur des éléments en pierre naturelle permet l'utilisation de roches qui normalement ne peuvent pas être utilisées pour la production, par sciage, de plaques minces. C'est le cas de la majorité des roches tendres qui ne supportent pas la découpe sur des épaisseurs réduites et ne possèdent pas les caractéristiques mécaniques pour résister aux efforts auxquels est soumis l'élément suspendu. Dans le cas suisse, par exemple, ce sont les grès du Plateau, surtout de la partie occidentale du pays. Dans le cas des pierres actuellement utilisées pour la production de plaques minces, comme c'est le cas, en Suisse, pour les calcaires et les gneiss, l'augmentation de l'épaisseur, couplée à la variété de traitements de surface, permettrait d'exploiter aussi les blocs qui ne répondent pas aux exigences d'homogénéité dans la structure qui est nécessaire pour garantir la production des plaques. Ceci n'aurait pas simplement comme conséquence une réduction du prix des éléments, mais constituerait aussi une forme d'augmentation de l'utilisation de la ressource.

7.2.6. *Stabilité des façades autoporteuses en pierre massive*

Lors de la construction d'une façade en pierre naturelle autoporteuse, il est nécessaire de considérer le problème de la stabilité d'un tel élément dans le plan du mur, mais surtout hors de son plan. En effet, l'épaisseur réduite de ce revêtement, par rapport à un mur porteur, en diminue fortement la stabilité géométrique et des ancrages ponctuels s'avèrent nécessaires.

7.2.6.1. Parallèles avec les façades en brique de parement

Des parallèles entre la mise en oeuvre d'une façade en brique de terre cuite de parement et une en pierre naturelle de taille sont possibles. En effet, on constate que l'épaisseur employée couramment

pour les éléments en pierre naturelle est proche de celle de la brique de terre cuite, c'est-à-dire de 12 cm au minimum. Il est clair que cette épaisseur ne permet pas de réaliser des murs stables en dehors de leur plan, surtout en cas de séisme. Des ancrages sont donc nécessaires: au minimum un ancrage par mètre carré est à mettre en oeuvre, disposé selon des rangées horizontales. Les ancrages sont scellés dans le mur porteur, traversent l'isolation, et sont ensuite fixés dans les joints horizontaux de l'appareillage. Aujourd'hui encore, on utilise des simples éléments en acier comme ancrages, mais des ancrages formés de deux parties, permettant la coupure du pont thermique, sont de plus en plus répandus à cause des exigences en matière de réduction des déperditions thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Ils restent en tout cas des éléments plus simples et économiques que ceux utilisés pour les façades ventilées.

Les formats des éléments utilisés pour la construction des façades autoporteuses sont très variables: du format "brique" jusqu'aux éléments de grandes dimensions et, avec des plus grandes épaisseurs, même des blocs grossièrement taillés.

7.2.6.2. La résistance aux séismes

La résistance aux séismes d'une maçonnerie est garantie par les dimensions de cette dernière, surtout l'épaisseur qui augmente la stabilité hors du plan, et par l'effort normal produit par le poids des éléments constructifs que la maçonnerie soutient. Ces deux facteurs sont fortement réduits dans le cas d'une façade autoporteuse, qui ne doit soutenir que son propre poids, lequel est diminué par la faible épaisseur des éléments mis en oeuvre. L'utilisation d'éléments en pierre naturelle permet d'augmenter le poids propre de chaque élément d'environ 80 %⁵⁴ par rapport à une solution en terre cuite, mais ceci n'est pas suffisant pour garantir la stabilité de la maçonnerie en dehors du plan de la façade. L'ancrage permet de pallier ce défaut, mais il peut engendrer d'autres types de risques dans les zones à forte sensibilité sismique, comme dans le cas des zones Z3 en Suisse. En effet, la masse importante constituée par l'enveloppe autoporteuse, lorsqu'elle est mise en mouvement par les forces du séisme peut, en étant ancrée aux parois porteuses, engendrer la ruine de la structure entière ou arracher les ancrages et ruiner elle-même: dans les deux cas, la façade est un élément potentiellement dangereux, qui nécessite donc un dimensionnement et une exécution soignés au niveau des fixations des ancrages et de l'appareillage des éléments en pierre naturelle. La suppression des ancrages, même pour des maçonneries de forte épaisseur, est à évaluer, ceci parce que la stabilité hors du plan de la façade n'est pas forcément assurée. Des revêtements de grande épaisseur peuvent même rendre encore plus difficile la stabilisation de l'ensemble du bâtiment.

La solution de la façade autoporteuse en pierre naturelle massive est sûrement valable en Suisse dans la zone Z1. À partir de la zone Z2, elle nécessite une étude plus approfondie.

7.3. Murs de soutènement et pierre naturelle massive

«Les maçonneries porteuses en pierre sont essentiellement mises en oeuvre dans le paysage en tant que murs de soutènement, de stabilisation de talus ou plus récemment, parfois, en tant que structure dans la construction.» [SIA 266/2 2008]

54. La masse volumique apparente d'une brique pleine de parement est d'environ 1'400 kg/m³, celle d'une pierre naturelle est, en moyenne, de 2'500 kg/m³ [Vittone, R. 1996].

7.3.1. Les murs de soutènement dans la ville de Lausanne

L'occasion de pouvoir traiter de l'utilisation de la pierre naturelle massive dans la construction de murs de soutènement s'est présentée grâce à une expérience d'enseignement, partagée avec Marie-Pierre Zufferey⁵⁵ et un groupe de 16 étudiants, pendant le semestre académique de printemps 2009 pour une Unité d'Enseignement Enac traitant de ces ouvrages dans la ville de Lausanne. En effet, cette ville est riche de ces témoignages de l'engagement des Hommes pour produire des terrains plats, là où, naturellement, c'est la pente qui prédomine. Ces murs urbains qui, au moins jusqu'à la moitié du XXe siècle, se présentent avec un aspect de pierre naturelle appareillée. Des structures souvent mixtes, dans lesquelles béton et pierre naturelle collaborent: le béton, souvent peu ou pas armé, forme une masse qui garantit une certaine cohésion générale à l'ouvrage, la pierre naturelle forme elle un parement résistant aux intempéries, et fait office de coffrage perdu reprenant aussi une partie des efforts de compression. Le béton armé est employé dans les exemples plus récents afin de permettre une reprise des efforts de flexion, ce qui autorise des plus grandes hauteurs libres avec un emploi réduit de matière: ce sont des murs de soutènement avec semelle et dans ce cas, la pierre naturelle est surtout un parement qui protège le béton et produit un aspect appareillé soigné. Les cas analysés et étudiés ont été en nombre de huit⁵⁶, auxquels s'ajoutent d'autres murs de la ville observés pendant les visites de terrain.

Les pierres naturelles utilisées à Lausanne pour la construction des murs de soutènement sont des roches dont la disponibilité à l'époque était grande et le coût réduit. Exception faite pour les murs les plus anciens, réalisés en grès de la Molasse de l'Aquitainien (la molasse grise ou verte de Lausanne), matériau local largement disponible, les autres murs, surtout ceux réalisés à partir du XIXe siècle, sont réalisés avec différents calcaires de la région du lac Léman. Ce sont surtout des calcaires spathiques comme les pierres de Meillerie, la pierre d'Arvel ou celle de Colombey, mais nous trouvons aussi du calcaire de Saint-Triphon et, surtout pour les couronnements des murs, du granite du Mont-Blanc (largement répandu à Lausanne depuis l'ouverture de la ligne de chemin de fer vers le Valais dans la deuxième moitié du XIXe siècle). En effet, le recours progressif à ces roches est dicté surtout par la nécessité d'utiliser des pierres résistantes aux agents atmosphériques ou d'un point de vue mécanique. Les calcaires durs combinent ces deux caractéristiques.

En ce qui concerne l'appareillage des pierres, les murs de soutènement de la ville de Lausanne présentent différentes solutions, qui peuvent être apparentées à deux grandes familles: la première est constituée par des appareillages en pierre de taille équarrie et concerne surtout la molasse, et les appareillages "écossais" les plus récents. La deuxième famille est constituée par des appareillages rustiques de parpaings de taille semblable, grossièrement équarris: ce sont surtout les murs en pierre de Meillerie ou en Arvel (ce derniers présentent un traitement de surface plus soigné). Pour ces murs, les joints de mortier étaient utilisés pour rectifier les assises et donner une apparence uniforme à l'ensemble de la maçonnerie. Une explication de ce fait est fournie par les roches et leur exploitation:

55. Marie-Pierre Zufferey, Docteur ès Sciences, architecte, collaboratrice scientifique au sein de la *Chaire de Représentation et d'Expression* de l'Institut d'Architecture, Faculté ENAC, de l'EPFL, dirigée par le Prof. Arduino Cantàfora.

56. Mur de soutènement de la Rue Pierre Viret; mur de la terrasse nord du Palais de Rumine; mur à la Rue de la Borde; mur du préau du collège de la Barre-Chemin des Ecoliers; murs à l'Avenue du Léman; mur du collège du Belvédère; mur de la terrasse de la Cathédrale-Escaliers du marché; mur de la Polyclinique-Rue César-Roux.

les molasses sont extraites par découpe en carrière, ce qui fournit naturellement des blocs de taille et d'aspect soigné; les calcaires spathiques étaient souvent exploités par perforation ou à l'explosif pour en extraire des blocs de taille et de forme variable, dont l'on obtenait les parpaings par cassure. Les dimensions des parpaings sont variables selon le type de roche et le type d'appareillage choisi. En général, les parpaings étaient de taille petite à moyenne, ce qui permettait leur mise en oeuvre à la main. Seulement les murs en molasse présentent des blocs de dimension moyenne à grande, mais souvent ces murs faisaient partie d'anciennes fortifications.

7.3.2. Formes d'application de la pierre naturelle massive pour les murs de soutènement

La pierre naturelle massive est aujourd'hui encore utilisée dans la construction de murs de soutènement: sous forme de petits blocs de forme variée, elle permet la réalisation de petits murs pour les aménagements paysagers; utilisée en moellons assemblés à sec, elle constitue depuis quelques années une bonne alternative au béton armé pour la réalisation des murs de soutènement dans les quartiers de villas et, sous forme de très gros blocs, elle forme des murs de stabilisation de talus dans les ouvrages d'art ou sur les chantiers. Les moellons, peu travaillés, sont, en général, livrés dans différentes longueurs avec une section de 30x30 cm; 40x40 cm et 50x50 cm (dimensions indicatives et très variables). En Suisse, ce type d'éléments est produit par presque toutes les carrières et il permet notamment d'utiliser toute qualité de pierre et de blocs extraits. Les murs ainsi réalisés sont du type "poids", parce qu'ils s'opposent à la poussée des terres essentiellement par leur poids propre; la liaison entre les pierres est assurée par frottement. Ce système dérive directement de celui utilisé pour l'aménagement des berges des fleuves et des lacs. L'avantage principal de cette technique constructive réside dans la vitesse de mise en oeuvre, les éléments sont simplement empilés les uns sur les autres, et par leur prix réduit, dérivant de la grossièreté de la finition et de la qualité inférieure de la pierre. Un système semblable, mais dont la résistance a été fortement augmentée par le recours à un mortier de pose, a été utilisé pour la réalisation des nouveaux murs des berges du Rhin à l'intérieur du village de Vals (ingénieur Jürg Conzett, 2008: Fig. III.31). Pour augmenter le frottement entre la pierre et le mortier, les blocs en gneiss de Vals ont été posés selon leur foliation, donc avec les surfaces rugueuses, brutes de cassure, comme assises de pose. Les côtés ont, par contre, été coupés pour obtenir un profil continu.



Fig. III.28-29. Mur de soutènement en gros blocs de gneiss dans une carrière remise en état de nature à Iragna, Canton du Tessin (Barbara Tirone 2009). Jürg Conzett, nouveaux murs des berges du fleuve Rhin à Vals, Canton des Grisons, 2008: blocs en gneiss de Vals avec faces sciées (Marco Svimmersky 2009)

7.3.2.1. Pourquoi la pierre naturelle pour les murs de soutènement?

Cette question pourrait être aussi formulée de la façon suivante: pourquoi utiliser des murs de soutènement stables par forme (murs poids, mur à semelle) et non pas par ancrages actifs? En effet, la tendance générale dans le domaine du génie civil pour la stabilisation des terrains est de recourir à l'utilisation de murs de faible épaisseur (moins de matière) stabilisés à l'aide d'ancrages. Cette technique est avantageuse lorsque des hauteurs importantes de talus doivent être stabilisées, mais pose le problème des ancrages, c'est-à-dire de leur longueur de pénétration dans le terrain. Ce fait constitue, surtout en milieu urbain, un problème: les ancrages doivent être inscrits au cadastre; des servitudes sur des parcelles voisines sont souvent nécessaires, surtout en cas de constructions mitoyennes et certains de ces éléments gisent dans le sous-sol après la démolition des bâtiments. La ville de Genève, par exemple, soumet à autorisation les moyens de stabilisation de fouilles et de terrains, s'ils sont jugés comme des éléments nuisibles pour le domaine public. Les ancrages présents sur les tracés des futurs ouvrages publics sont supprimés à la charge du propriétaire [RUDP Art. 56]. D'autre part, les murs de soutènement en béton armé subissent aussi les attaques du temps, ils se patinent avec la prolifération de lichens et mousses, et se salissent par l'écoulement des eaux. En général, ces murs ont un aspect "négligé". La perception de ce vieillissement est de toute autre nature lorsque la surface est réalisée en pierre naturelle, parce que ces murs subissent d'autres formes de colonisation et l'aspect final est, en général, celui d'un mur "habité" ou "végétal". D'un point de vue technique, les agents atmosphériques et biologiques peuvent constituer une source de dégradation pour le mur aussi au niveau de sa structure: la couche de béton peut éclater sous l'effet du gel-dégel et des racines des plantes, permettant ainsi que le phénomène de la carbonatation se déclenche. La pierre naturelle, si elle est bien choisie et mise en oeuvre, subit, en général, moins de dégradations, gardant ainsi un meilleur aspect et également un meilleur comportement statique.

Les murs de soutènement caractérisent fortement les contextes dans lesquels ils sont sis, autant en ville que dans les autres territoires en pente, où leur fonction peut être celle d'ouvrage d'art ou agricole. La Suisse est à ce sujet un terrain d'étude et d'application idéal; son territoire étant caractérisé par des reliefs marqués.

D'où la nécessité d'étudier de nouvelles formes d'utilisation des roches locales pour réaliser des murs répondant aussi aux exigences contemporaines de mise en oeuvre, de durabilité et d'économie. Les traditions constructives locales doivent donc être interrogées pour en comprendre l'essence et, si nécessaire, il faut être prêt à les faire évoluer vers des solutions contemporaines permettant une sensible amélioration des prestations⁵⁷.

Un renouveau de l'utilisation de la pierre naturelle dans la construction de murs de soutènement nous semble donc être possible et plausible dans différents cas, que nous allons illustrer par la suite, non seulement pour des raisons d'image, mais aussi pour des raisons constructives.

57. Voir à ce sujet l'étude faite dans le Canton des Grisons par le bureau d'ingénieurs Conzett, Bronzini, Gartmann [Conzett, J., Schmid, M. 2006].

7.3.2.2. Pierre structurelle

L'utilisation contemporaine de la seule pierre naturelle pour des murs de soutènement se limite, dans la plupart des cas, à des murs de faible hauteur (1 à 2 m): ce sont les murs pour les aménagements extérieurs, mentionnés plus haut. Des murs de hauteur plus conséquente sont utilisés pour les chantiers ou dans la stabilisation de talus, comme, par exemple, les murs qui servent à stabiliser des pentes reconstituées lors de la remise en état de nature d'un site d'exploitation, ou les aménagements des berges des fleuves et, dans quelques exemples, des lacs.

Le mur tout en pierre est un mur de type poids dont la résistance aux poussées des terres est produite, comme son nom l'indique, par son poids propre. Comme tout ouvrage en maçonnerie, il est un ensemble dont la résistance est garantie, d'une part, par le frottement des pierres les unes sur les autres (le poids des assises supérieures garantissant la stabilité par frottement de celles inférieures) et, d'autre part, par la cohésion assurée par le mortier, s'il est présent. Dans des ouvrages de soutènement le recours à un appareillage avec joints au mortier est essentiel, sauf dans des cas spéciaux où des blocs de très grandes dimensions sont utilisés. Afin de réduire la quantité de pierres, sans nuire au comportement statique du mur de soutènement, dans ce type d'ouvrages on réalise souvent un fruit soit sur la face apparente soit sur celle contre terre. Ce fruit permet d'affiner le profil du mur vers son sommet sans trop déplacer la position du centre de gravité. Lors de la réalisation d'un fruit sur la face contre terre, ceci peut prendre soit un profil rectiligne oblique soit une forme "en escalier". Cette dernière possède l'avantage de permettre de profiter du poids des terres sur les plateaux horizontaux des "marches" afin d'augmenter la stabilité au renversement. Sa réalisation peut être intégrée dans un partage par assises pour la mise en oeuvre de la maçonnerie.

Le drainage du mur est impératif pour garantir le bon comportement de l'ensemble. Les dégâts produits par l'eau sont les plus dangereux et leur réparation consiste souvent dans la reconstruction complète du mur. Ce drainage peut prendre la forme de tubes au pied de la fondation du mur ou alors de barbacanes, situées à différentes hauteurs dans l'appareillage. Cette dernière solution, moins utilisée aujourd'hui, est de réalisation simple, et permet de mettre en forme la descente des eaux et leur évacuation qui peut devenir, suivant les cas, un thème architectural à part entière.

Les dimensions des éléments en pierre naturelle sont à choisir en fonction du type de roche à utiliser ainsi que des conditions de mise en oeuvre. En effet, ces dernières peuvent souvent contraindre à l'utilisation de parpaings de petites dimensions lorsque des engins mécaniques ne peuvent pas accéder au chantier. Les éléments couramment produits, de longueur libre et de section 30x30, 40x40 et 50x50 cm, constituent une bonne base de départ. Il est toujours possible d'intervenir sur les traitements de surface, sur la mise en oeuvre ainsi que sur le type de joints de mortier. Vu les grandes épaisseurs auxquels on devra parfois faire recours, l'appareillage est à soigner: soit en parpaings, soit en boutisses et carreaux. Cette dernière solution nécessite l'utilisation de blocs de longueur définie, ce qui engendre des coûts supplémentaires par rapport à un mur réalisé avec une seule rangée de pierres de longueur libre.

Pour les murs de soutènement routier, il est nécessaire de bien concevoir le raccord entre la chaussée et le mur, ce point est le plus délicat et le moins durable du fait de la présence du sel de déglacage: la

corrosion saline étant nocive pour tout type de pierre naturelle.

7.3.2.3. Pierre collaborante

La pierre naturelle constitue la couche extérieure, durable, du mur et collabore dans la reprise des charges avec le béton. Ces murs peuvent être des murs poids ou alors des murs avec semelle en béton armé, pouvant reprendre ainsi les efforts de flexion. Dans le premier cas, le béton faiblement ou non armé constitue une partie de la masse qui garantit la stabilité du mur. Cette masse de béton peut reprendre des efforts de compression, comme la pierre, mais aucun effort de flexion. Elle permet également une meilleure cohésion des parpaings en pierre naturelle. En effet, si l'on veut atteindre un comportement statique dans lequel les deux matériaux collaborent, il est nécessaire d'utiliser la pierre naturelle comme coffrage pour le béton et assurer une bonne liaison mécanique entre les deux matériaux. Ceci peut être réalisé par le biais de pierres plus profondes ou par une finition de surface plus rugueuse pour la face contre terre des parpaings. La couche de pierre naturelle garantit, dans la plupart des cas, aussi la reprise des charges de compression: cette exigence doit donc être prise en compte lors de son choix. Cette technique constructive a été largement utilisée depuis la fin du XIXe jusqu'à la moitié du XXe siècle et les murs ainsi réalisés sont nombreux et souvent de grandes dimensions (citons, à titre d'exemple, celui construit aux alentours de 1900 à l'avenue Pierre-Viret à Lausanne et qui atteint, par secteurs, une hauteur de 10 m). Pour ce type de mur, la réalisation d'un fruit sur la face contre terre "en escalier" pourrait se justifier parce qu'il pourrait correspondre aux hauteurs des étapes de bétonnage, et de préalable mise en oeuvre des maçonneries en pierre naturelle.

Une utilisation contemporaine mériterait d'être étudiée, surtout par le fait de ne pas nécessiter le recours à l'armature en acier.

Dans le cas d'un mur avec semelle, il faut utiliser le béton armé afin que les efforts de flexion soient repris. Ce type de mur assure par sa forme le transfert des charges vers le terrain: l'armature en acier présente dans le mur vertical et dans la semelle horizontale permet que les charges soient transmises aussi par flexion. Ce mécanisme permet d'affiner le profil de l'élément et d'éliminer une grande quantité de matière. La pierre naturelle constitue la couche la plus externe qui non seulement augmente la résistance du mur face aux agents atmosphériques, tout en protégeant le béton armé, mais elle peut aussi être utilisée comme coffrage perdu et, en moindre mesure par rapport au cas précédent, pour reprendre des charges de compression.

Un bon drainage doit être prévu. Les solutions évoquées pour les murs en pierre massive sont valables aussi pour ce type de mur.

Le recours au béton armé pour les murs avec semelle nécessite de considérer les joints de dilatation que ce matériau exige. Des joints qui apparaîtront aussi dans le plan de l'appareillage en pierre naturelle.

Les dimensions des éléments en pierre naturelle sont à choisir en fonction du type de roche à utiliser ainsi que des conditions de mise en oeuvre. En tout cas, l'épaisseur des parpaings est en rapport avec leur fonction statique et à l'éventuelle stabilité qu'ils doivent garantir comme coffrage perdu. Le recours à des formats modulaires, et en accord avec les dimensions des blocs extraits, permet

une réduction du temps de mise en oeuvre et des coûts du matériau. Des épaisseurs de 20 à 30 cm permettent l'utilisation des éléments courants pour murs, entiers ou subdivisés. L'appareillage sera choisi en fonction de l'ouvrage, mais en général il sera constitué d'une seule rangée de parpaings hourdés au mortier.

7.3.2.4. Pierre de revêtement

Le recours à la pierre naturelle comme matériau de revêtement pour des murs de soutènement constitue une solution efficace lorsqu'une plus grande durabilité est requise et un aspect "pierre appareillée" est souhaité. Dans ces cas, une solution constructive à étudier est d'utiliser le procédé de la "pierre banchée": en utilisant la maçonnerie de pierre naturelle comme coffrage perdu pour couler le béton. Cela nécessite de recourir à des épaisseurs supérieures par rapport au cas d'un simple revêtement, mais cette épaisseur produit une plus grande durabilité, permet l'utilisation de différents types de pierres naturelles et d'autres finitions de surfaces, par rapport aux plaques minces (à titre d'exemple, des éléments éclatés ou travaillés à la pointe, ainsi que des bossages et des finitions profondes à la boucharde).

L'appareillage du revêtement répond à des exigences de résistance mécanique seulement dans le cas de la "pierre banchée". L'épaisseur sera en tout cas supérieure à 4 cm [SIA V178 1996:17]⁵⁸.

7.3.3. Murs de soutènement en ville

Comme il a été reporté plus haut, un renouveau de l'utilisation de la pierre naturelle dans la construction des murs de soutènement nous semble possible et plausible. Nous avons essayé de partager les possibles lieux d'intervention en deux catégories: la première est celle de la ville, dans laquelle le mur de soutènement acquiert une importance architecturale qui va au-delà de sa simple fonction statique; la deuxième est celle appelée du "paysage", mot par lequel nous voulons désigner toute zone en dehors de la ville, dans laquelle le mur de soutènement assume aussi une fonction de structuration du territoire. Dans les deux cas, et en ce qui concerne notre pays, les murs de soutènement sont des parties importantes de la définition du "paysage" en tant que patrimoine.

Nous traitons d'abord les murs de soutènement en ville, en essayant de donner quelques principes sur les systèmes à utiliser. Ensuite, nous présentons les murs pour l'aménagement du "paysage".

Les murs des villes ont été divisés en deux catégories qui, à notre avis, rassemblent les différents cas auxquels le concepteur est confronté. La première catégorie est celle des murs indépendants, c'est-à-dire de ces murs qui soutiennent de la terre, cette dernière formant une esplanade, un talus ou la chaussée d'une route. La deuxième est celle des murs de soutènement engagés dans d'autres constructions, dans la plupart des cas des bâtiments, mais aussi des piles de ponts ou des escaliers.

7.3.3.1. Murs indépendants

C'est le type de mur de soutènement le plus répandu, mais aujourd'hui sa construction se fait rare à cause du fait que la majorité des travaux d'aménagements du terrain des villes ont déjà été réalisés.

58. Une épaisseur variable entre 6 et 12 cm est prévue pour les parements des murs de soutènement massifs en béton par la norme SIA 266/2 [SIA 266/2:33].

Tous les types d'utilisation de la pierre naturelle décrits plus haut peuvent être mis en oeuvre pour ce type de mur. Le choix est déterminé, en premier lieu, par la disponibilité et la qualité de la pierre naturelle locale, mais aussi par les dimensions du mur et son emplacement. Pour des grandes hauteurs libres, un mur exclusivement en pierre naturelle pourrait nécessiter des quantités de matière trop grandes, de ce fait des murs en structure mixte pourraient être avantageux. De préférence il faut utiliser des roches présentant non seulement des bonnes caractéristiques mécaniques, mais aussi une bonne résistance aux agents atmosphériques et biologiques. Ces exigences portent le choix sur les roches dures, comme les gneiss, les granites, les calcaires et certaines types de grès de la Molasse de la Suisse orientale. La valorisation de roches locales, exploitées, par exemple, lors des travaux de terrassement, nécessite des études sur leur utilisation traditionnelle, sur leurs caractéristiques et le développement d'une mise en oeuvre en accord avec ces dernières.

Un soin particulier doit être porté au choix de la pierre, à ses dimensions et à son appareillage, mais aussi aux différentes solutions architecturales pouvant enrichir l'usage de l'élément, tels l'évacuation des eaux, la possibilité de s'asseoir, l'intégration d'escaliers, l'illumination ou la présence de végétaux.

7.3.3.2. Murs engagés dans des constructions

Ce type de mur s'apparente, d'un point de vue constructif, aux murs des niveaux enterrés d'un bâtiment. La structure devra donc être dimensionnée selon les charges des étages supérieurs et pour pouvoir transférer les efforts de séisme. Cette dernière exigence demande une étude attentive de la structure en maçonnerie de pierre naturelle parce que des efforts de flexion sont présents. Ces derniers peuvent difficilement être transmis par une maçonnerie traditionnelle: il faut donc faire recours à des armatures ou alors à des solutions mixtes en béton armé. Les types de murs utilisables sont ceux de type poids, mais avec armature, et ceux avec semelle.

Le mur engagé présente l'avantage de pouvoir reprendre les charges non seulement par un système de mur, mais aussi par des systèmes de cadres, si les liaisons par le biais des dalles sont possibles. L'optimisation de ces systèmes structuraux peut amener à un gain de matière et à l'utilisation de la pierre naturelle selon ses caractéristiques propres.

7.3.4. Murs dans le "paysage"

Le thème des murs de soutènement utilisés dans le paysage suisse à été brièvement introduit plus haut. Ce sont des ouvrages mineurs, souvent nécessaires à la réalisation des routes et des voies des chemins de fer, que les usagers de ces moyens de transport n'aperçoivent que rarement, mais qui ont façonné et qui façonnent le territoire. D'autres types de murs, souvent construits sans concepteurs, sont ceux qui permettent de réaliser des terrasses pour les cultures, dont les plus connus sont ceux des vignobles (par exemple, les fameux murs de Lavaux dans le Canton de Vaud, inscrits à l'inventaire de l'Unesco depuis 2007). Souvent des murs en pierre sèche, mais qui dernièrement ont été réalisés en béton armé, changent l'aspect unitaire de ces lieux. Un retour à l'utilisation de la pierre naturelle, mise en oeuvre selon des techniques différentes, permettrait de garantir au moins une unité dans les matériaux.

Le mur construit en milieu alpin ou à la campagne nécessite une bonne réflexion sur la disponibilité et qualité de la roche, mais aussi sur les conditions de mise en oeuvre sur le chantier. Ces dernières

influencent le choix des dimensions des parpaings selon la possibilité ou pas de faire recours à des engins de levage et de transport. La valorisation des matériaux extraits lors des travaux de terrassement, ainsi que l'éventuelle réutilisation de pierres présentes sur place, peuvent nécessiter des techniques de mise en oeuvre traditionnelles, dans lesquelles les investissements au niveau du travail humain sont plus élevés. En tout cas, ceci ne signifie pas forcément un coût final plus élevé, surtout si des ressources locales disponibles sont utilisées.

Les pierres naturelles locales les plus résistantes doivent être utilisées afin de garantir une durabilité accrue. De même que pour le cas des murs en milieu urbain, un soin particulier est à porter, dans le cas des murs routiers, aux éléments en pierre les plus exposés aux sels de déglacage.

De manière analogue au cas des murs engagés dans des immeubles en ville, il est possible de réaliser des constructions dans le paysage qui intègrent, en partie, des ouvrages de soutènement. Quelques maisons construites par l'architecte portugais Eduardo Souto de Moura montrent une voie d'intervention possible dans des contextes où la pierre constitue soit le substrat de l'édifice soit les ouvrages qui permettent l'exploitation du terrain par les activités humaines. Dans la maison construite à Moledo (1991-1998), au sud-ouest de Porto, dans une zone de montagne, l'architecte aménage la pente à l'aide de murs de soutènement en pierre naturelle afin de produire des terrasses, comme dans les environs les paysans ont produit des zones cultivables. La maison est construite derrière le mur amont qui est interrompu pour permettre l'insertion d'une façade vitrée. Cette utilisation du mur comme élément fondateur de la maison au sens strict du terme, c'est-à-dire comme élément de soutènement, est une constante dans les projets pour des maisons individuelles d'Eduardo Souto de Moura situés dans des terrains en pente. C'est une approche issue, d'une part, des conditions topographiques des sites, et, de l'autre, d'une observation attentive de la tradition constructive. Dans ces projets, la pierre naturelle, souvent mise en oeuvre selon un appareillage de type "opus incertum", permet d'intégrer le nouveau bâtiment dans son environnement.

Une approche semblable, entre tradition constructive locale et utilisation du mur comme infrastructure permettant l'aménagement du terrain, est celle qui a été adoptée par les architectes suisses Markus Wespi et Jérôme De Meuron pour la construction d'une maison de vacance à Brione sopra Minusio dans le Canton du Tessin (2005). Dans un territoire fortement construit, mais sans aucune règle urbanistique, la nouvelle construction s'affiche comme un ouvrage d'art, un mur de soutènement⁵⁹. La maçonnerie de pierres trouvées, surtout des gneiss, appareillée selon un *opus incertum* se rapprochant de la tradition de la pierre sèche, contribue aussi au caractère de la maison dont les espaces intérieurs sont contenus entre ces murs.

59. Cette idée est l'une des bases du projet et elle est clairement exprimée par les architectes dans leur texte d'intention (voir à ce propos le site internet du bureau à l'adresse <http://www.wespidemeuron.ch/wdm/projekte.php?id=41>, consulté le 08.01.2010).



Fig. III.30-31. Eduardo Souto de Moura, Maison à Moledo, 1991-1998 [Peretti, L., éd. 1999]. Markus Wespi et Jérôme de Meuron, Maison à Brione sopra Minusio, 2005 [Wirz, H., éd. 2008]

8.1. Bibliographie. Etude de cas: l'industrie de la pierre naturelle en France après la Seconde Guerre mondiale

- Abraham, P. 1943: "Défense et illustration de la maçonnerie", *Techniques et architecture*, n. 9-10 La maçonnerie (I), septembre-octobre 1943, pp. 229-238.
- Abraham, P. 1945: "Maçonnerie", *Techniques et architecture*, n. 1-2 Normalisation, janvier-février 1945, p. 29.
- Abraham, P. 1952: *Architecture préfabriquée. Deuxième édition*, ("Etudes de synthèse et de documentation. L'actualité technique"), Paris, Editeur Dunod, 140 p.
- Bonillo, J., éd. 2001: *Fernand Pouillon. Architecte méditerranéen*, Marseille, Editions Imbernon, 256 p.
- Bonnome, C. et Léonard, L. 1959: "L'industrialisation du bâtiment", in: Dubuisson, B. éd., *Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment. Tome II*, Paris, Librairie Aristide Quillet, 1959, pp. 1371-1423.
- Bruni, C. éd. 2008: *Il marmo ieri e oggi. Storia illustrata dell'industria più antica del mondo*, Carrara, Società Editrice Apuana, 212 p.
- Delemontey, Y. 2007: "Industrialiser la pierre", *AMC*, n. 172, septembre 2007, pp. 120-126.
- Demaret, J. 1943: "Les matériaux de construction", *Techniques et architecture*, n. 9-10 La maçonnerie (I), septembre-octobre 1943, pp. 241-252.
- Déribéré, M. 1943: "La production moderne de la pierre de taille", *Techniques et architecture*, n. 9-10 La maçonnerie (I), septembre-octobre 1943, pp. 269-270.
- Dubor, B., éd. 1987: *Fernand Pouillon. Architetto delle 200 colonne*, ("Documenti di architettura 23"), Milano, Electa, 142 p.
- Garnier, C. 1985: *A travers les arts. Précédé de Les ambiguïtés de Charles Garnier par François Loyer*, ("Les classiques français de l'histoire de l'Art"), Paris, Picard Editeur, 1985, 279 p. (édition originale de 1869).
- Germain, J., éd. 1950: *Les calcaires tendres prétaillés*, ("Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment. 70"), Paris, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 37 p.
- Hermant, A. 1943: "De l'influence de la masse sur l'habitabilité des constructions", *Techniques et architecture*, n. 9-10 La maçonnerie (I), septembre-octobre 1943, pp. 258-262.
- Lambertie, R. 1965: *L'industrie de la pierre et du marbre*, ("Que sais-je? n.977"), Paris, Presses Universitaires de France, 128 p.
- Loyer, F. 1987: *Paris XIXe siècle. L'immeuble et la rue*, Paris, Fernand Hazan, 478 p.
- Lucan, J. 2001: *Architecture en France (1940-2000). Histoire et théories*, ("Collection Architextes 11"), Paris, Editions du Moniteur, 375 p.
- Lucan, J., éd. 2003: *Fernand Pouillon. Architecte*, Paris, Editions de l'Arsenal-Picard, 198 p.
- Noël, P. 1949: *La pierre matériau du passé et de l'avenir*, Paris, Institut technique du bâtiment et des travaux publics, 112 p.
- Noël, P. 1951: "Equipement moderne d'une carrière de pierre de taille à ciel ouvert", *Bâtir. Revue technique de la fédération nationale du bâtiment et des activités annexes*, n. 17, novembre 1951, pp. 12-14.
- Noël, P. 1968: *Technologie de la pierre de taille. Dictionnaire des termes couramment employés dans l'extraction, l'emploi et la conservation de la pierre de taille*, Paris, Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics, 373 p.

- Pouillon, F. 1964: *Les pierres sauvages*, Paris, Editions du Seuil, 231 p.
- Pouillon, F. 1968: *Mémoires d'un architecte*, Paris, Editions du Seuil, 484 p.
- Schmidt, H. 1931: "Costruzione standardizzata", in: Schmidt, Hans, *Contributi all'architettura 1924-1964*, Milano, Franco Angeli Editore, 1974, pp. 131-132.
- Simon, E.H.L. 1962: *L'industrialisation de la construction*, Paris, Editions du Moniteur des Travaux Publics, 334 p.
- Vitale, F. 1943: "Maçonneries normalisées", *Techniques et architecture*, n. 9-10 La maçonnerie (I), septembre-octobre 1943, pp. 253-255.

8.2. Bibliographie. La pierre naturelle et la construction courante

- Alberti, L. B. 2004: *L'art d'édifier. Texte traduit du latin, présenté et annoté par Pierre Caye et Françoise Choay*, Paris, Editions du Seuil, 604 p. (la première édition latine du traité de Leon Battista Alberti, "De re aedificatoria", fut publiée à Florence par Nicolò di Lorenzo en 1485, et la première traduction italienne, "I dieci libri de l'architettura", parut à Venise chez Vincenzo Valgrisi en 1546)
- Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006: *Edifici in muratura in zona sismica. Nuove costruzioni – Consolidamento dell'esistente. La teoria e la tecnica*, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 391 p.
- Casamonti, M., Pavan, V. 2004: *Caves. Architectures du vin 1990-2005*, Arles, Actes Sud-Motta, 277 p.
- Claudel, J., Laroque, L. 1910: *Pratique de l'art de construire. Septième édition entièrement refondue*, Paris, Dunod et E. Pinat Editeurs, 1297 p.
- Dauphin, R. 2006: *Sécurité sismique d'un bâtiment en maçonnerie de pierres naturelles*, (Projet de semestre Master Enac), Lausanne, Imac-Epfl, 48 p. (document non publié).
- Del Fabro, O. 1948: *Massivbau. Konstruktion und Statik*, St. Gallen, Im Selbstverlag des Verfassers, 193 p.
- Dubuisson, B., éd. 1959: *Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment*, Tome II, Paris, Librairie Aristide Quillet, 1442 p.
- Ecole d'Avignon, éd. 2003: *Techniques et pratiques de la chaux. Deuxième édition*, Paris, Editions Eyrolles, 226 p.
- Fanelli, G., Gargiani, R. 2008: *Histoire de l'architecture moderne. Structure et revêtement*, ("Architecture"), Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 464 p. (édition originale italienne: *Storia dell'architettura contemporanea*, Bari-Roma, Laterza, 1998)
- Germain, J., éd. 1950: *Les calcaires tendres prétaillés*, ("Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment. 70"), Paris, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 37 p.
- Grandjean, A. 2010: *Capacité portante de ponts en arc en maçonnerie de pierre naturelle - Modèle d'évaluation intégrant le niveau d'endommagement*, ("Thèse n. 4596"), Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 318 p.
- Heyman, J. 1996: *Arches, Vaults and Buttresses: Masonry Structures and their Engineering*, Aldershot, Variorum, 418 p.
- Hill, P.R., David, J.C.E 1995: *Practical Stone Masonry*, London, Donhead Publishing, 276 p.
- Iacobelli, F. 2006: *Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica. IV edizione*, Roma, EPC Libri, 316 p.
- Laurent, J.-M. 2007: *Construction et restauration des bâtiments en pierre. Histoire, technique, pratique*, s.l., Editions Vial, 302 p.

- Monduit, L. 1980: *Traité théorique et pratique de la stéréotomie au point de vue de la coupe des pierres*, Dourdan, Editions H. Vial, 225 p. (édition originale 1889)
- Noël, P. 1968: *Technologie de la pierre de taille. Dictionnaire des termes couramment employés dans l'extraction, l'emploi et la conservation de la pierre de taille*, Paris, Société pour la diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics, 373 p.
- Pardey, J. 2004: *Jørn Utzon Logbook vol. III, Two houses in Mallorca*, Hellerup, Edition Bløndal, 74 p.
- Pavan, V., éd. 2001: *Le scrittura della pietra – Scriptures in stone*, Milano, Skira editore, 143 p.
- Pisani, M., éd. 2002: *Gilles Perraudin*, Melfi, Casa editrice Libria, 111 p.
- Sakarovitch, J. 1998: *Epures d'architecture. De la coupe des pierres à la géométrie descriptive XVIe-XIXe siècle*, ("Science networks, historical studies 21"), Basel, Birkhäuser, 427 p.
- Schneider, K.-J., Schubert, P., Wormuth, R. 1999: *Mauerwerksbau. Gestaltung, Baustoffe, Konstruktion, Berechnung, Ausführung. 6. Auflage*, Düsseldorf, Werner Verlag, 390 p.
- Schuler, M. et al. 2007: *Atlas des mutations spatiales de la Suisse*, Zurich, Éditions Neue Zürcher Zeitung, 416 p.
- Shadmon, A. 1996: *Stone. An introduction. Second Edition*, London, Intermediate Technology Publications, 172 p.
- Techniques et Architecture 1954: "Maisons préfabriquées présentées à l'Exposition de l'Habitation au XXIIIe Salon des Arts Ménagers", *Techniques et Architecture. Reconstruction*, 13e série, n. 7-8, pp. 103-113.
- Vittone, R. 2010: *Bâtir. Manuel de la construction*, 2e édition, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1015 p.
- Warth, O. 1903: *Die Konstruktionen in Stein. Siebente, verbesserte und erweiterte Auflage*, Leipzig, J.M. Gebhardt's Verlag, 459 p. et 102 tableaux.

8.3. Bibliographie. Maçonneries en pierre naturelle et séismes

- Berger, C. 2008: *Analyse parasismique d'un immeuble en pierre naturelle*, Lausanne, Imac-Enac-Epfl, 39 p. (Document non publié).
- Boscotrecase, L., Piccarreta, F. 2006: *Edifici in muratura in zona sismica. Nuove costruzioni – Consolidamento dell'esistente. La teoria e la tecnica*, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 391 p.
- Dauphin, R. 2006: *Sécurité sismique d'un bâtiment en maçonnerie de pierres naturelles*, Lausanne, Imac-Enac-Epfl, 48 p. (Document non publié).
- Devaux, M. 2008: *Seismic Vulnerability of Cultural Heritage Buildings in Switzerland*, (Thèse 4167), Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008, 430 p.
- Favez, P. 2007: *Détermination de la résistance sismique de maçonneries anciennes par essais expérimentaux. Essais statiques-cycliques sur un mur de pierres de taille en molasse provenant de la cathédrale de Lausanne*, Travail de Master en Génie Civil, Lausanne, Imac-Enac-Epfl, 2007, pp. 29 (Document non publié).
- Giardini, D. et al. 2004: *Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004*, Zürich, Swiss Seismological Service, 95 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://www.earthquake.ethz.ch/research/Swiss_Hazard/index, consulté le 23.08.2010)
- Iacobelli, F. 2006: *Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica. IV edizione*, Roma, EPC Libri, 316 p.

- Khaldoun, E. M. 2010: *Détermination du comportement sismique des maçonneries en pierres naturelles par essais expérimentaux. Essai statique cyclique*, Projet de Master en Génie Civil, Lausanne, Imac-Enac-Epfl, 2010, 40 p. (Document non publié).
- Lamoth, B. 2007: *Construction en pierres massives: Etude sismique*, Lausanne, Imac-Enac-Epfl, 111 p. (Document non publié).
- Lestuzzi, P. 2008: *Séismes et construction. Eléments pour non-spécialistes*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 124 p.
- Lestuzzi, P., Badoux, M. 2008: *Génie Parasismique. Conception et dimensionnement des bâtiments*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 327 p.
- Schneider, K.-J., Schubert, P., Wormuth, R. 1999: *Mauerwerksbau. Gestaltung, Baustoffe, Konstruktion, Berechnung, Ausführung. 6. Auflage*, Düsseldorf, Werner Verlag, 390 p. (1. Auflage 1984)
- Tubi, N., Silva, M. P. 2003: *Gli edifici in pietra. Recupero e costruzione. Murature, solai e coperture*, ("Architettura Sostenibile 8"), Napoli, Gruppo Editoriale Esselibri, 452 p.
- Zacek, M. 1996: *Construire parasismique. Risque sismique. Conception parasismique des bâtiments. Réglementation*, Marseille, Editions Parenthèses, 340 p.

8.4. Bibliographie. Confort et consommation énergétique

- Adam, R. 2008: "Put to the test: heavyweight vs lightweight construction", *Ecotech. Sustainable Architecture Today*, 17, May 2008, p. 14.
- Aggen, K. 1986: "Dicke Massivwände sind beste Energiesparer", *Arch+*, 84, März 1986, pp. 62-63.
- Alcott, B. 2005: "Jevons' paradox", *Ecological Economics*, n. 54, pp. 9-21. (article disponible dans le site internet de l'auteur, <http://www.blakealcott.org/publications.html>, consulté le 19.02.2010)
- Anger, R., Fontaine, L. 2009: *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*, s.l., Editions Belin, 2009, 223 p.
- Artmann, N., Manz, H., Heiselberg, P. 2007: "Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe", *Applied Energy*, 84, 2007, pp. 187-201.
- Aste, N. et al. 2009: "The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings", *Energy and Buildings*, 41, 2009, pp. 1181-1187.
- Augenti, V., Stefanizzi, P. 2008: "Considerazioni su soluzioni di involucro opaco in regime termico dinamico", *Costruire in laterizio*, 125, settembre ottobre 2008, pp. 50-53.
- BatAn 2007: *Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie. Rapport de synthèse*, s.l., Maisons Paysannes de France, 69 p. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.maisons-paysannes.org/economies-d-energie/batan.html>, consulté le 03.08.2010)
- BORH (Bayerischer Oberster Rechnungshof), éd. 2007: *Staatliche Gebäude mit hohem Glasanteil in der Fassade*, TNr. 19, Bayerischer Oberster Rechnungshof, 2007 (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.orh.bayern.de>, consulté le 23.08.2010)
- Bossert, P. 1982: "Wärmehaushalt und Mauerwerk. Neuigkeiten über Feuchte und Wärme im Fassadenmauerwerk", *Deutsche Bauzeitung*, 9, September 1982, pp. 58-62.
- Campioli, A. et al. 2007: "Variabile Tempo. Massa termica e risparmio energetico", *Costruire in laterizio*, 284, gennaio 2007, pp. 94-99.

- Campioli, A., Ferrari, S. et al. 2007: "Il comportamento energetico-ambientale di involucri in laterizio", *L'industria dei laterizi*, 107, settembre ottobre 2007, pp. 2-10.
- Carter, B. 2003: "Druk White School", *Architectural Design*, v. 73 n. 1, Januar/Februar 2003, pp. 21-25.
- Carter, B., Galeazzi, F. 2007: "La scuola Druk del Loto Bianco", *Casabella*, LXXI n.1, n. 750-751, dicembre 2006-gennaio 2007, pp. 152-159.
- Christenson, M., Manz, H., Gyalistras, D. 2006: "Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland", *Energy Conversion and Management*, 47, 2006, pp. 671-686.
- Colin, D. 2001: *Hopkins 2. The work of Michael Hopkins and Partners*, London, Phaidon Press Limited, 240 p.
- Corrado, V., Mechri, H. E., Fabrizio, E. 2007: "Building energy performance assessment through simplified models: application of the ISO 13790 quasy-steady state method", in: AA.VV., *Proceedings: Building Simulation 2007*, s.l., IBPSA, 2007, pp. 79-86. (les différentes contributions sont disponibles en format électronique à l'adresse: http://www.ibpsa.org/m_bs2007.asp, consulté le 11.02.2010)
- Deplazes, A., éd. 2005: *Constructing architecture. Materials, processes, structures. A handbook*, Bâle-Boston-Berlin, Birkhäuser Verlag AG, 508 p.
- Di Perna, C. et al. 2008: "Massa e confort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica", *L'industria dei laterizi*, 110, marzo aprile 2008, pp. 88-101.
- Eicke-Hennig, W. 2007: *Glasarchitektur – Lehren aus einem Grossversuch*, Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt, 2004. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.natursteinverband.de>, consulté le 20.08.2008)
- Frank, Th. 2005: "Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland", *Energy and Buildings*, 37, 2005, pp. 1175-1185.
- Gargari, C. 2008: "Costruzioni massive e comfort estivo", *L'industria dei laterizi*, 112, luglio agosto 2008, pp. 253-259.
- Gargari, C. 2008-02: "Soluzioni in laterizio in area mediterranea", *Costruire in laterizio*, 125, settembre ottobre 2008, pp. 54-60.
- Givoni, B. 1998: *Climate considerations in building and urban design*, New York, Van Nostrand Reinhold, 464 p.
- Gonzalo, R., Habermann, K.J. 2008: *Architecture et efficacité énergétique*, Bâle-Boston-Berlin, Birkhäuser Verlag AG, 221 p.
- Hönger, C., Brunner, R., Menti, U.-P., Wieser, C. 2009: *Das Klima als Entwurfsfaktor. Clima as a Design Factor*, Luzern, Quart Verlag, 2009, 111 p.
- Jokisalo, J., Kurnitski, J. 2007: "Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate", *Energy and Building*, n. 39, 2007, pp. 236-247.
- Latouche, S. 2004: *Survivre au développement. De la colonisation de l'imaginaire économique à la construction d'une société alternative*, s.l., Editions Mille et Une Nuits, 128 p.
- Latouche, S. 2007: *Petit traité de la décroissance sereine*, s.l., Editions Mille et Une Nuits, 176 p.
- Lindberg, R. et al. 2004: "Five-year data of measured weather, energy consumption, and time-dependent temperature variations within different exterior wall structures", *Energy and Buildings*, 36, 2004, pp. 495-501.

- Lotus 2009: "Design Build Bluff, Rosie Joe House, Navajo Nation, Arizona, 2003-2004", *Lotus international*, n. 140, décembre 2009, pp. 16-17.
- Medola, M. 2007: "Prestazioni termiche dell'involucro edilizio: soluzioni costruttive e metodi di valutazione", *L'industria dei laterizi*, 105, maggio-giugno 2007, pp. 167-175.
- Minergie 2010: *Le standard de construction MINERGIE. Info pour les professionnels*. (document électronique téléchargé à l'adresse: http://minergie.ch/publications_minergie.html, le 10.02.2010)
- OcCC 2007: *Les changements climatiques et la Suisse en 2050. Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie*, Bern, OcCC/ProClim, 172 p. (le rapport en langue française est disponible en ligne à l'adresse http://www.occc.ch/reports_f.html, consulté le 28.05.2010)
- OFEN 2007: *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération pour les années 2008 à 2011*, Berne, Office fédéral de l'énergie, 57 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/index.html?dossier_id=00798&lang=fr, consulté le 23.08.2010)
- Osanyintola, O. F., Simonson, C. J. 2006: "Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact", *Energy and Buildings*, n. 38, 2006, pp. 1270-1282.
- Padfield, T., Jensen, L. A. 2009: *Humidity buffer capacity of unfired brick and other building materials*. (document disponible à l'adresse: <http://www.conservationphysics.org/index.php>, consulté le 16.02.2010)
- Pfafferott, J. et al. 2005: "Thermal building behaviour in summer: long-term data evaluation using simplified models", *Energy and Buildings*, 37, 2005, pp. 844-852.
- Roulet, C.-A. 2008: *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments. 2e édition mise à jour et complétée*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 362 p.
- Shove, E. 2003: *Comfort, Cleanliness and Convenience. The social organization of normality*, ("New Technologies/New Cultures"), Oxford-New York, Berg, 2003, 221 p.
- Shove, E. 2004: "Redéfinir le confort: un défi pour la consommation durable", *La Revue Durable*, n.9, février-mars 2004, pp. 18-21.
- Sidler, O. 2003: *L'apport des campagnes de mesure*, texte de l'intervention au Colloque "L'inertie thermique en climat méditerranéen. Confort et consommations d'énergie", Montpellier, 15 Mai 2003, 15 p. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.enertech.fr/Besoins.html>, consulté le 23.08.2010)
- Stähli, U. 1979: *Influence de l'inertie thermique des constructions sur la consommation de combustible et sur le confort*, Wildeggen, Service de recherches et conseils techniques de l'industrie suisse du ciment, 46 p.
- Stazi, F. et al. 2007: "La casa del confort sostenibile", *L'industria dei laterizi*, 107, settembre-ottobre 2007, pp. 326-334.
- Zerbi, S. 2006: *La Via della Pietra. 2. Centre d'accueil et d'expérimentation pour l'exploitation de la pierre, Commune de Lodrino, Canton du Tessin, Rapport final du Projet de Master en architecture*, EPFL, Lausanne, 40 p.
- Zimmermann, M. 2003: *Handbuch der passiven Kühlung*, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 136 p.
- Zürcher, C., Frank, T. 2004: *Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis. 2. Auflage*, Zürich, vdf Hochschulverlag AG, 245 p.

8.5. Bibliographie. Durabilité et durée de vie des maçonneries en pierre naturelle

- Amsler C. 2001: *Maisons de campagne genevoises du XVIIIe siècle. Tome II*, Genève, Domus Antiqua Helvetica, 320 p.
- Berge, B. 2000: *The ecology of building materials*, Oxford, Architectural Press, 453 p.
- Berge, B. 2009: *The ecology of building materials. Second Edition*, Oxford, Architectural Press, 427 p.
- De Santoli, L. 2006: *Analisi del ciclo vita del sistema edificio-impianto*, Roma, Palombi & Partner, 158 p.
- Ecoinvent 2007: "Part XXII: Natural Stone Plate", in: Kellenberger, D., Althaus, H.-J., Jungbluth, N., Künniger, T., Lehmann, M., Thalmann, P. 2007: *Life Cycle Inventories of Buildings Products. Final report ecoinvent Data v.2.0 n.7*, Dübendorf, EMPA-Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 914 p. (version électronique disponible au membres Ecoinvent à l'adresse: <http://www.ecoinvent.org>, consulté le 28.10.2009)
- Ferlenga, A. 1999: *Dimitris Pikionis 1887-1968*, Milano, Electa, 350 p.
- Hammond, G., Jones, C. 2008: *Inventory of Carbon and Energy (ICE). Version 1.6a*, Bath, University of Bath, 64 p. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/>, consulté le 12.01.2010)
- Hillman, J. 2004: *L'anima dei luoghi. Conversazione con Carlo Truppi*, Milano, Rizzoli, 152 p.
- Hillman, J. 2006: *Le naturel, le littéral et le réel. Suivi de L'âme des lieux*, ("Ea-Information 232"), Lausanne, Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit, 47 p.
- INSA 5 1990: *Inventaire Suisse d'Architecture 1850-1920. Volume 5. Grenchen-Herisau-Lausanne-Liestal*, Berne, Société d'Histoire de l'Art en Suisse, 480 p.
- Kasser, U., Pöll, M. 1999: *Graue Energie von Baustoffen. 2. vollständig neu überarbeitete Auflage*, Zürich, Büro für Umweltchemie, 87 p.
- KBOB 2009: *Données des écobilans dans la construction 2009/1*, Berne, Office Fédérale de la Logistique, 13 p. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr>, consulté le 28.10.2009)
- KBOB 2010: *Données des écobilans dans la construction 2009/1. Etat de mars 2010*, Berne, Office Fédérale de la Logistique, 16 p. (document électronique disponible à l'adresse: <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr>, consulté le 22.07.2010)
- Lachmann, H. 2010: "Naturstein ist nachhaltiger als Glas", *Natursteineonline*. (document disponible à l'adresse: http://www.natursteineonline.com/zeitschrift/news/alles_aus_der_branche/naturstein_ist_nachhaltiger_als_glas.html, consulté le 5.08.2010)
- Le Corbusier 1995: *Vers une architecture*, Paris, Flammarion, 1995, 255 p. (première édition 1923)
- Matasci, C. 2006: *Life Cycle Assessment of 21 buildings: analysis of the different life phases and highlighting of the main causes of their impact on the environnement*, Mémoire de Master en sciences de l'environnement, Mémoire n.128, ETHZ-UNIGE, 177 p.
- Natural Stone Council 2008-02: *Material Fact Sheet: Granite*, 2 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://isse.utk.edu/ccp/projects/naturalstone/results_pubs.html, consulté le 28.10.2009)
- Natural Stone Council 2008-03: *Material Fact Sheet: Limestone*, 2 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://isse.utk.edu/ccp/projects/naturalstone/results_pubs.html, consulté le 28.10.2009)
- Natural Stone Council 2008: *Material Fact Sheet: Sandstone*, 2 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://isse.utk.edu/ccp/projects/naturalstone/results_pubs.html, consulté le 28.10.2009)

- Ortelli, L. 1984: "Architettura di muri. Il museo di Gibellina di Francesco Venezia", *Lotus International*, n. 42, Milano, Electa, pp. 121-125.
- Perret, A. 2006: "Contribution à une théorie de l'architecture", pp. 455-457 (première édition 1952), in Perret, A. 2006: *Auguste Perret. Antologie des écrits, conférences et entretiens*, Paris, Editions Le Moniteur, 479 p.
- Robert 1995: *Le nouveau Petit Robert. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue Française*, Paris, Dictionnaire Le Robert, 1995.
- Sassi, P. 2006: *Strategies for sustainable architecture*, Abingdon, Taylor and Francis, 306 p. [*Strategie per l'architettura sostenibile. I fondamenti di un nuovo approccio al progetto*, ("Manuali di progettazione sostenibile"), Milano, Edizioni Ambiente, 2008, 333 p.]
- University of Tennessee – Center for Clean Products 2008-02: *Granite dimensional stone quarrying and processing: a Life-Cycle Inventory*, 28 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://isse.utk.edu/ccp/projects/naturalstone/results_pubs.html, consulté le 28.10.2009)
- University of Tennessee – Center for Clean Products 2008-03: *Limestone quarrying and processing: a Life-Cycle Inventory*, 27 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://isse.utk.edu/ccp/projects/naturalstone/results_pubs.html, consulté le 28.10.2009)
- University of Tennessee – Center for Clean Products 2008: *Sandstone quarrying and processing: a Life-Cycle Inventory*, 27 p. (document électronique disponible à l'adresse: http://isse.utk.edu/ccp/projects/naturalstone/results_pubs.html, consulté le 28.10.2009)
- Valéry, P. 2002: *Eupalinos ou l'Architecte*, Paris, Gallimard, 2002, 191p. (première édition 1921)
- Venezia, F. 1984: "Note sulla costruzione", *Lotus International*, n. 42, Milano, Electa, p. 126.
- Venezia, F. 2006: *Francesco Venezia. Le idee e le occasioni*, ("Documenti di architettura 114"), Milano, Mondadori Electa, 2006, 329 p.
- Vittone, R. 1996: *Bâtir. Manuel de la construction*, Lausanne, PPUR, 950 p.
- Zingarelli 1995: *Lo Zingarelli 1995. Vocabolario della lingua italiana di Nicola Zingarelli, Dodicesima edizione*, Bologna, Zanichelli editore, 1994.

8.6. Bibliographie. Formes contemporaines d'utilisation de la pierre structurelle massive

- Conzett, J. 2006: "Retaining Walls", in: Mostafavi, M. 2006: *Structure as space. Engineering and architecture in the works of Jürg Conzett and his partners*, London, Architectural Association, pp. 260-265.
- Conzett, J., Schmid, M. 2006: "Von Clavadel nach Sertig. Ein Stützmauerkonzept", *Werk, bauen und wohnen*, n. 7-8, 2006, pp. 44-49.
- Detail 2006: "Musikakademie in Santiago de Compostela", *Detail*, n. 6, pp. 630-633.
- Dubosque, J. 1920: *Etudes théoriques et pratiques sur les murs de soutènement et les ponts et viaducs en maçonnerie. Sixième édition*, Paris-Liège, Librairie Polytechnique Ch. Béranger Editeur, 368 p.
- Eric Parry architectes, éd. 2002: *Eric Parry Architects. Volume 1*, London, Black Dog Publishing and Eric Parry Architects, 205 p.
- Ford, E. R. 1994: *Das Detail in der Architektur der Moderne. Zur Logik der Konstruktion bei Edwin Lutyens, Frank Lloyd Wright, Otto Wagner, Adolf Loos, Le Corbusier, Ludwig Mies van der Rohe, Rudolf Schindler, Walter Gropius, Marcel Breuer*, Basel, Birkhäuser Verlag, 247 p.

- Gradidge, R. 1981: *Edwin Lutyens. Architect Laureate*, London, George Allen & Unwin, 167 p.
- Moneo, R. 2000: "Ayuntamiento de Murcia", *El Croquis. Rafael Moneo 1995-2000*, n. 98, Madrid, El Croquis editorial, pp. 76-87.
- Pisani, M. 2005: "Centro di Alti Studi Musicali a Santiago de Compostela", *Industria delle Costruzioni*, n. 384 luglio-agosto, pp. 46-51.
- RUDP: *Règlement concernant l'utilisation du domaine public du 21 décembre 1988*, Etat de Genève. (document consultable à l'adresse: http://www.ge.ch/legislation/rsg/f/rsg_l1_10p12.html, consulté le 23.08.2010)
- Vittone, R. 1996: *Bâtir. Manuel de la construction*, Lausanne, PPUR, 950 p.
- Zerbi, S. 2007: "Del Muro. Due abitazioni nel Cantone Ticino degli Architetti Markus Wespi e Jérôme De Meuron", *architetturadipetra.it*. (consultable à l'adresse: <http://www.architetturadipetra.it/wp/?p=1013>, consulté le 19.02.2010)
- Zerbi, S. 2009: "Massive Natursteinfassaden-Chancen und Möglichkeiten", *Die Baustellen-Fachzeitschrift für Hoch-/Tief- und Spezialbau*, n. 7/8, pp. 36-38.
- Zimmermann, A., éd. 2009: *Constructing Landscape*, Basel, Birkhäuser, 533 p. (en particulier chapitre 3.5 Walls).

8.7. Normes

- SIA 260 2003: *Norme SIA 260:2003 Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses*, Zürich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 44 p.
- SIA 261 2003: *Norme SIA 261:2003 Actions sur les structures porteuses*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 114 p.
- SIA 266 2003: *Norme SIA 266:2003 Construction en maçonnerie*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 44 p.
- SIA 266/1 2003: *Norme SIA 266/1:2003 Construction en maçonnerie-dispositions complémentaires*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 12 p.
- SIA 266/2 2008: *Maçonnerie en pierre naturelle*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 60 p. (projet en consultation externe jusqu'au mois d'avril 2008)
- SIA V178 1996: *Recommandation SIA V178, Edition 1996, Maçonnerie en pierre naturelle*, Zurich, Société suisse des ingénieurs et des architectes, 49 p.

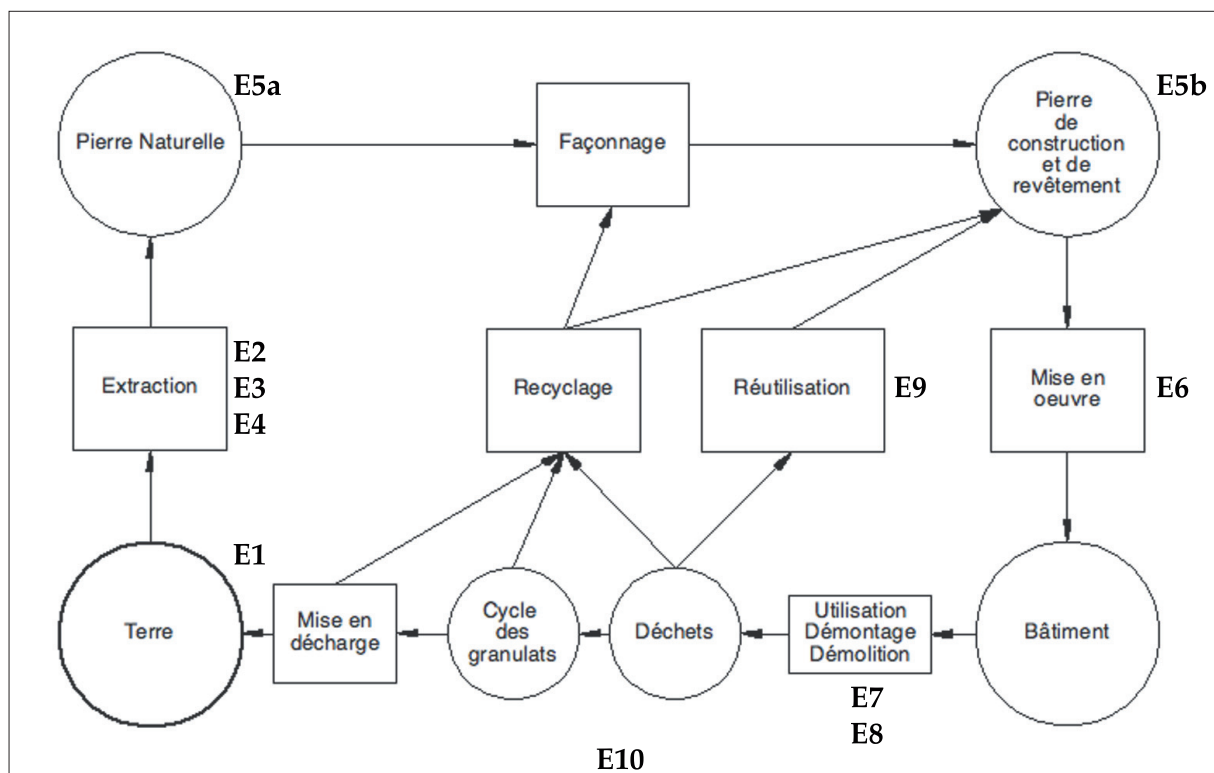
8.8. Lois et règlements

- Cst: *Constitution fédérale de la Confédération suisse du 18 avril 1999*, état au 7 mars 2010, Confédération Suisse.
- LEne: *Loi du 26 juin 1998 sur l'énergie*, état au 1er janvier 2009, Confédération Suisse.
- Loi sur le CO2: *Loi fédérale du 8 octobre 1999 sur la réduction des émissions de CO2*, état au 1er janvier 2010, Confédération Suisse.
- OEn: *Ordonnance du 7 décembre 1998 sur l'énergie*, état au 1er janvier 2010, Confédération Suisse.

CONCLUSION

VERS UN NOUVEL ÂGE DE LA PIERRE. POUR UNE NOUVELLE CONSTRUCTION EN PIERRE NATURELLE MASSIVE EN SUISSE

Si l'âge de la pierre est, dans le langage courant, souvent assimilé à la notion d'ancien, de vieux, de dépassé, nous entendons par ceci plutôt une attitude qui serait celle d'utiliser les ressources facilement et localement disponibles pour construire. Dans le cas de la Suisse, mais pas seulement dans ce pays, la ressource "pierre naturelle" remplit ces exigences, auxquelles s'ajoutent une énergie de production réduite et une longue durée de vie, qui permet une réutilisation aisée. Dans la présente recherche, nous avons démontré cela. Dans cette conclusion, qui se veut un vademecum à l'attention des autorités politiques, des associations professionnelles et du monde académique, nous voulons mettre en évidence les points qui, à notre avis, constituent un obstacle à une utilisation accrue de ce matériau dans la construction, selon les formes et les modalités proposés dans les chapitres précédents. Ces points critiques ne concernent ni un seul domaine de compétences ni une seule catégorie de décideurs. Pour cela, nous reprenons l'organigramme du cycle de la pierre naturelle comme matériau de construction dans lequel nous signalons les écueils selon un ordre qui part du gisement de roche, passe par la mise en œuvre du matériau, jusqu'à son réemploi.



Les écueils qui freinent le développement de l'utilisation de la pierre naturelle massive dans la construction: E1 LE cadastre du sous-sol et des ses ressources; E2 La législation en matière de carrières; E3 La "carrière urbaine"; E4 La réouverture des carrières de pierre naturelle de taille; E5a et b Une base de données pour la pierre naturelle de construction; E6 L'enseignement de la construction en pierre naturelle; E7 La mesure du comportement des bâtiments en pierre naturelle; E8 L'application des mesures de réduction de la consommation énergétique; E9 La réutilisation de la pierre naturelle de taille; E10 L'information et la divulgation.

E1 Le cadastre du sous-sol et de ses ressources

Les données sur le sous-sol de notre pays sont désormais disponibles auprès des géologues, mais, souvent, d'un accès difficile. La réalisation d'un cadastre en trois dimensions est donc réalisable et certains Cantons, entre autres celui de Vaud, se sont dotés de ce type d'outil. Ceci permet de mettre à disposition des autorités, des planificateurs ainsi que des concepteurs, dès les phases d'avant-projet, des informations fiables et précises sur la nature du sous-sol des constructions. Ces connaissances sont nécessaires pour pouvoir planifier et mettre en oeuvre une vraie valorisation de la ressource pierre naturelle chaque fois qu'il est possible, et surtout de pouvoir intégrer cette démarche assez en amont dans le projet. Cela est une condition indispensable pour pouvoir réaliser cette valorisation.

Le "Projet Deep-City. Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains", réalisé à la Faculté Enac de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, dans le cadre du Programme National de Recherche 54 "Développement durable de l'environnement construit", a permis de mettre en évidence l'importance de la connaissance et de la gestion du sous-sol dans ses trois dimensions. Actuellement, dans une phase de développement ultérieur du projet, ces indications de gestion sont en bonne voie d'être intégrées au niveau législatif dans la révision de la *Loi fédérale sur l'aménagement du territoire* (LAT). La valorisation des géomatériaux sera donc très probablement consacrée dans le droit fédéral, et, en conséquence, également de la pierre naturelle.

Dans un cadastre de ce type, la localisation des géotypes d'intérêt régional ou national devrait apparaître et également celle des anciennes carrières et de celles actuellement exploitées¹; l'emplacement des sondages géologiques déjà réalisés et disponibles pour évaluer la qualité de la roche et toute autre donnée géologique nécessaire dans le cadre de l'exploitation de la pierre naturelle y seraient aussi intégrés.

Une plate-forme, en ligne, avec des indications, mises à jour, pour l'accès aux différents cadastres cantonaux serait facilement réalisable. Celle-ci pourrait être contenue à l'intérieur d'une plus grande plate-forme pour la pierre naturelle suisse (voir E5).

E2 La législation en matière de carrières

L'actuelle législation suisse en matière de droit minier ou des carrières est peu homogène: d'une part, aucune loi fédérale existe, et, d'autre part, un certain nombre de cantons ne dispose pas de texte législatif. Ceci complique les différentes démarches des exploitants, ou des futurs exploitants, pour l'obtention des permis d'exploitation et, en même temps, ceci n'aide pas la planification de l'aménagement du territoire.

Les lois sur les carrières et la gestion des ressources, ainsi que la réalisation des *Plans directeurs*, sont des compétences cantonales, ce sont donc les Cantons qui doivent s'engager davantage dans la valorisation d'une ressource locale comme la pierre naturelle. L'activité d'extraction, et celle de façonnage, ne constituent pas simplement des ressources économiques régionales, mais également des opportunités de transformation du territoire, pour autant qu'elles soient coordonnées et réglées.

1. Les informations sur les gisements exploités et en exploitation sont déjà disponibles en ligne à travers le "Visualiseur de données géologiques" de l'Office Fédéral de Topographie, à l'adresse: <http://www.geologieviewer.ch>, consulté le 7 mars 2011. Ces informations proviennent de la *Schweizerische Geotechnische Kommission* et elles comportent aussi la localisation d'environ 5'000 constructions dont les pierre naturelles utilisées sont identifiées.

En effet, les sites des carrières de pierre naturelle de taille, une fois le cycle de production terminé, peuvent constituer des nouveaux terrains à bâtir ou à exploiter pour des autres fonctions, et non seulement, comme cela semble être le cas aujourd'hui, des atteintes au paysage.

Dans les futures lois sur les carrières, il faudra veiller à ce qu'une différenciation claire entre exploitation pour la production de granulats et extraction de pierre de taille soit faite. Les deux activités n'étant pas réalisées de la même manière, en particulier la première comporte des volumes extraits importants et une utilisation presque systématique des explosifs, leurs nuisances sont également diverses. Ceci permettrait de bien différencier au niveau de l'aménagement du territoire les différentes zones ainsi que les exigences à remplir en matière de protection de l'environnement et du paysage.

E3 La "carrière urbaine"

La constitution de cadastres du sous-sol, ainsi que d'une législation cantonale plus précise au sujet de l'exploitation des carrières, auront des effets positifs sur la valorisation de la pierre naturelle lors de l'excavation de fouilles, que nous avons appelé "carrière urbaine".

Les cadastres du sous-sol permettront de pallier le problème principal qui empêche souvent cette forme d'exploitation, c'est-à-dire la planification anticipée de cette phase d'extraction. En effet, les exemples étudiés pendant la recherche, montrent que, d'un point de vue technique et même économique, cette opération de valorisation est faisable, et que les éventuels retards sur le calendrier du chantier, si planifiés, ne constituent pas un problème insurmontable.

Les nouvelles lois devraient permettre de clarifier la différence entre une exploitation de carrière et cette forme d'excavation, qui, à notre avis, est à considérer comme une valorisation des matériaux d'excavation, et donc soumise au seul octroi du permis de construire. La nécessité du permis de construire découle directement de la *Loi fédérale sur l'aménagement du territoire*, qui dans sa nouvelle édition devrait considérer les ressources du sous-sol et leur valorisation (voir E1), permettant ainsi de revoir les plans d'aménagements afin d'y introduire une obligation de valoriser ces ressources, parmi lesquelles figure la "pierre naturelle". Cette valorisation devrait être partie intégrante des exigences à remplir pour l'obtention du permis de construire. Ceci stimulerait la réflexion des constructeurs sur les formes possibles de valorisation de ce géomatériau, ce qui amènerait à une multiplication des usages de la pierre naturelle.

E4 La réouverture des carrières de pierre naturelle de taille

La nouvelle législation sur les carrières devrait également permettre de différencier une nouvelle ouverture d'un site d'exploitation par rapport à une réouverture. Cette deuxième réduit fortement non seulement les incertitudes quant à la qualité du matériau, mais également la quantité de matériaux à évacuer (découverte) avant l'extraction de la pierre naturelle proprement dite. Le nombre de carrières fermées depuis moins d'un siècle est très élevé, plus de 600, ce qui permet d'envisager des réouvertures dans plusieurs parties du pays. La localisation de ces sites est connue² et ils devraient être considérés comme des carrières potentielles dans les plans d'aménagement du territoire, et pour

2. Voir note 1.

cela apparaît dans les cadastres cantonaux du sous-sol.

E5a et b Une base de données pour les pierres naturelles de construction

Les connaissances autant géologiques, pétrographiques que techniques sur les roches suisses sont, à nos jours, très complètes. Les données techniques sont, en plus, régulièrement remises à jour par les essais que les différents producteurs font réaliser par des laboratoires spécialisés. Malheureusement, tout ce matériel est dispersé et d'un accès souvent difficile autant pour les acteurs de la filière pierre naturelle que pour les constructeurs.

La constitution d'une base de données, accessible en ligne, est aujourd'hui facile à réaliser. Cette forme de mise à disposition des connaissances, nous semble la plus appropriée par son accès aisé et par la possibilité de mise à jour. Les informations minimales quelle devrait contenir, pour chaque type de roche, sont celles proposées pour les fiches de notre "Bibliothèque des pierre suisses"; c'est-à-dire, en plus des informations techniques, la localisation des carrières, les coordonnées des entreprises ainsi que d'autre informations sur l'emploi et la mise en oeuvre.

Cette base de données pourrait être gérée soit par un organe indépendant, par exemple, un organe fédéral comme les Archives Géologiques Suisses, soit par une Association de la filière de la pierre naturelle. En tout cas, une participation active des carriers, des tailleurs de pierre et des laboratoires spécialisés est indispensable afin que les informations les plus récentes soient disponibles.

Il serait ensuite possible d'ajouter, pour les différents types de roches, des images et des informations concernant des constructions dans lesquelles cette roche a été utilisée, ou de produits réalisés à partir de ces matériaux³.

Cette base de données pourrait aussi assumer la forme d'une plate-forme sur laquelle seraient disponibles également les renvois aux différents cadastres cantonaux (voir E1), aux textes législatifs, ainsi qu'aux associations professionnelles, et aux instituts de formation et recherche.

E6 L'enseignement de la construction en pierre naturelle

Même si tous les points évoqués plus haut sont résolus, l'utilisation de la pierre naturelle massive dans la construction ne pourra avoir lieu que si les constructeurs ont des bases pour son usage. Ceci signifie qu'il est nécessaire de réintroduire ce matériau non seulement dans la liste des matériaux de construction, mais également dans ceux qui sont enseignés. Les connaissances sont encore disponibles, surtout chez les gens du métier et les spécialistes, il faut, par contre, qu'elles redeviennent une partie du bagage culturel des nouveaux architectes et ingénieurs. Pour les premiers, il faut également prévoir une réintroduction d'une formation ciblée en géologie.

Comme cette recherche l'a montré, l'approche globale à la pierre naturelle est assez aisée parce qu'il s'agit d'un matériau "prêt à l'emploi". Ceci permet d'introduire une série de considérations sur le cycle de production et le cycle de vie qui pourront, par la suite, être appliquées à des matériaux plus complexes du point de vue de la production et de la mise en oeuvre. La pierre est donc un matériau pédagogique.

3. C'est le cas du projet Lithospedia, une base de donnée libre, qui se réalise actuellement sur initiative du Prof. Alfonso Acocella à l'Université de Ferrare, en parallèle au développement du blog [architetturadipietra.it](http://www.architetturadipietra.it). Pour des informations voir: <http://www.architetturadipietra.it/lithospedia/>, et <http://www.architetturadipietra.it>, consultés le 23.03.2011.

Pour que cet enseignement puisse être donné, et aussi pour que la recherche autour de ce matériau puisse continuer, il est nécessaire qu'au niveau des Hautes Ecoles, un, ou plusieurs centres de compétences voient le jour.

E7 La mesure du comportement des bâtiments en pierre naturelle

À la suite de plusieurs recherches réalisées dans différents pays européens sur la consommation énergétique des bâtiments en maçonnerie présentant une inertie thermique élevée, et aussi de quelques simulations effectuées dans le cadre de la présente recherche, nous sommes convaincus que la collecte de données résultantes de mesures *in situ* de la consommation réelle est une condition indispensable non seulement pour la construction de nouveaux édifices, mais également pour la rehabilitation du patrimoine construit. Ces données, une fois rendues publiques, permettront de démystifier la consommation énergétique des bâtiments massifs, et une discussion plus sereine autour du problème de la consommation énergétique et du confort à garantir pour les habitants.

E8 L'actuation des mesures de réduction de la consommation énergétique des bâtiments

Le confort n'étant pas une donnée complètement objective, il nous semble donc difficile, voir peu probable, qu'il puisse se traduire, comme c'est le cas actuellement, par des valeurs fixes, telles, par exemple, une température intérieure hivernale. Nous pensons que, dans le cadre de la politique de réduction de la consommation énergétique des bâtiments, une solution plus souple au point de vue de la mise en oeuvre serait celle de fixer uniquement des consommations maximales autant pour la période estivale que pour celle hivernale. La condition estivale est souvent négligée dans le cas de l'habitation, mais nous savons qu'elle sera, dans le futur proche, une source importante de consommation d'énergie.

En tout cas, la température intérieure pour les immeubles d'habitation, maisons individuelles comprises, devrait être réglementée sous la forme d'un éventail de températures, et dans ce cas également, il faudrait avoir des valeurs hivernales et estivales.

E9 La réutilisation de la pierre naturelle de taille

Pour une réelle approche de développement durable et de réduction de l'énergie consommée par le secteur de la construction, il est nécessaire de considérer, lors de l'évaluation de la qualité d'un bâtiment, son entier cycle de vie, et aussi pour toutes ses composantes. Ce type d'analyse est d'ores et déjà réalisé pour un nombre important de produits, et les connaissances sont disponibles également dans le secteur de la construction. Il est donc simplement nécessaire de les appliquer de manière transparente et claire aux nouvelles réalisations et de les intégrer lors de l'établissement d'éventuels nouveaux standards ou labels.

Dans le cas de la pierre naturelle de taille, l'analyse du cycle de vie devrait se réaliser à partir d'Inventaires de Cycle de Vie issus de mesures faites *in situ*. En effet, les données bibliographiques sont trop générales pour pouvoir décrire de manière satisfaisante la grande variété de méthodes d'exploitation et de façonnage de la pierre naturelle. Il faudrait, idéalement, que chaque carrier ou entreprise de taille, établisse son propre Inventaire de Cycle de Vie. La relative simplicité du cycle de production de ce matériau rend la tâche proportionnée par rapport aux avantages, également au

niveau de l'optimisation du travail au sein de l'entreprise même. La carrière et l'atelier de taille étant souvent situé dans le même lieu, ceci représente un cas idéal pour entreprendre des mesures. Ces Inventaires devraient ensuite être validés par des spécialistes qui, en Suisse, sont autant des privés que des chercheurs des Hautes Ecoles.

La longue durée de vie du matériau doit être considérée lors de l'analyse du cycle de vie. Ceci revient à admettre des périodes de calcul supérieures au siècle et, également, la possibilité que ce matériau soit réutilisé par la suite. Cette donnée est celle qui permet de pondérer l'investissement énergétique et les nuisances environnementales, qui, dans le cas de la pierre naturelle, seraient amorties sur une très longue période. Cette donnée démontre, même de manière intuitive, l'une des plus grandes qualités de ce matériau.

E10 L'information et la divulgation

Les différents acteurs de la filière de la pierre naturelle devraient investir davantage dans la divulgation de leurs différents métiers et savoirs-faire auprès du publique, autant des autorités que de la population. Cette filière existe en Suisse, mais elle est méconnue par la plupart des gens. Une meilleure connaissance est l'une des clés pour une augmentation de son utilisation dans le secteur de la construction et pour un renouvellement des femmes et hommes de métier. Cette divulgation devrait s'appuyer non seulement sur les qualités techniques indiscutables du matériau, mais également sur le rapport étroit qu'il entretient avec le territoire. En effet, il compose le substrat même sur lequel les cultures se sont bâties et se bâtissent. Sa valorisation rentre donc parfaitement dans le mouvement généralisé de redécouverte des cultures locales.

Cette information devrait être également faite auprès des architectes et ingénieurs déjà formés afin qu'ils puissent proposer davantage à leurs clients l'utilisation de ce matériau. Pour cela, un engagement des associations professionnelles, telle, par exemple, la SIA, est nécessaire.

La base de données sur les pierres naturelles suisses pour la construction constituerait sûrement un bon instrument d'information et divulgation, auquel il faut ajouter les différentes journées de formation et les revues spécialisées et grand-public.

En résumé, les écueils énoncés plus haut, même si en nombre de dix, ne constituent pas des obstacles insurmontables pour le développement de l'utilisation de la pierre naturelle massive dans la construction. En effet, il s'agit, dans la plupart des cas, du recueil de données déjà disponibles et de leur diffusion auprès des différents intervenants, autant les autorités que les professionnels de la construction. Pour les textes de lois, ce ne sont pas de transformations qui sont nécessaires, mais simplement des révisions permettant d'intégrer les différents aspects qui concernent la pierre naturelle. La révision, citée plus haut, de la *Loi fédérale sur l'aménagement du territoire* montre que ce type de démarche a déjà été entreprise dans notre pays.

Nous pouvons donc en conclure que l'utilisation de la pierre naturelle massive est réalisable dans notre pays, il est donc nécessaire que les autorités, les maîtres d'ouvrages et les ingénieurs et architectes commencent dès maintenant à en définir les modes. Cette recherche est un premier pas dans cette direction.

CURRICULUM VITAE

Stefano Zerbi - Av. de Montoie 20 - 1007 Lausanne T. 0041 (0)79 671 60 78
stefano.zerbi@bluewin.ch - stefano.zerbi@epfl.ch

Né le 11 juin 1981

Formation et diplômes

2007-2010: Doctorant, programme doctoral "Architecture et Sciences de la Ville", EPFL Lausanne
2006: Master of Arts MA en Architecture, EPFL Lausanne
2000-2006: Etudes d'architecture à la Section d'Architecture de l'EPFL Lausanne
2000: Maturité Scientifique avec anglais, Liceo Lugano 2, Savosa

Expérience académique

2009 - : Chargé de cours pour la Semaine Enac 08 – Relever de l'environnement construit, avec Luca Conti et Pierre-Yves Gilliérons, EPFL Lausanne
2009: Enseignant dans le cadre de l'Unité d'Enseignement Enac UEE 01 – Murs de soutènement, avec Dr. Marie-Pierre Zufferey, Prof. Olivier Bourdet et Prof. Aurèle Parriaux, EPFL Lausanne
2007: Chercheur, Laboratoire de Construction et Conservation, Section d'Architecture, EPFL Lausanne
2006 - : Assistant pour le cours "Théorie et critique du projet", BA1-2 et MA1-2-3, Atelier du Prof. Luca Ortelli, Section d'Architecture, EPFL Lausanne
2006 - : Suivi de différents projets de semestre et de Master en collaboration avec le Dr. Pierino Lestuzzi, Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction, EPFL Lausanne
2006-2007: Assistant pour le cours "Dessin", BA1-2, du Prof. Arduino Cantàfora, Section d'Architecture, EPFL Lausanne

Expérience professionnelle

2006 - : Architecte indépendant
2003-2004: Stages d'architecture dans les bureaux d'Andrea Bassi, architecte, Genève;
Alexis Pontvik, architecte, Stockholm et Studio d'Architettura Martinelli e Rossi, Mendrisio

Publications et conférences

2010: "La pierre naturelle: un matériau pour la construction durable", présenté lors du colloque: Ma pierre première. Construction en pierre naturelle et développement durable, Rodez (F), 25-27 novembre 2010

- 2010: "Lavorare di fornasaro col far matoni, quadrelli e coppi. Introduzione alle tecniche", Croci-Maspoli, Bernardino, éd., *I padroni del fumo. Contributi per la storia dell'emigrazione dei fornaciai malcantonesi*, Curio, Museo del Malcantone, 2010, pp. 93-125
- "La pietra 'pretagliata' e la ricostruzione in Francia dopo la Seconda Guerra Mondiale", www.architetturadi Pietra.it
- Conti, L., Svimmersky, M., Zerbi, S., "Verso un'oggettività della bellezza. L'insegnamento dei Grigioni", *EURAU'10. 5a Edizione Giornate Europee della Ricerca Architettonica e Urbana*, Napoli
- 2009: "Massive Natursteinfassaden-Chancen und Möglichkeiten", *die baustellen-Fachzeitschrift für Hoch-/Tief- und Spezialbau*, n. 7/8, pp. 36-38
- "Fassaden aus Massiv-Baustein. Chancen und Möglichkeiten", présenté lors de: Fachtagung NVS Naturstein-Fassaden, Zug, 22 April 2009
- "La construction en pierre massive pourrait revoir le jour", *La Revue Durable*, n. 34, pp. 42-44
- "Jürg Conzett, Pùnt da Saransuns, Viamala, Cantone dei Grigioni, Svizzera (1997-99)", www.architetturadi Pietra.it
- "Costruzione in pietra massiccia in Svizzera", www.architetturadi Pietra.it
- 2008: "Construction en pierre massive en Suisse. Le cas des Tre Valli au Canton du Tessin", *Abstract Volume. 6th Swiss Geoscience Meeting 2008*, Swiss Academy of Sciences, pp. 238-239
- "Elementi modulari in pietra precompressa. I prodotti della ditta Ongaro & Co SA di Cresciano, Cantone Ticino, Svizzera", www.architetturadi Pietra.it
- 2007: "Gilles Perraudin, Cantina per il Monastero di Solan, la Bastide d'Engras, Gard, Francia, 2003-2007", www.architetturadi Pietra.it
- "L'Hôtel de Ville di Arles. La volta del vestibolo dell'architetto Jules Hardouin-Mansart, 1673-1676", www.architetturadi Pietra.it
- "Del muro. Due abitazioni nel Cantone Ticino degli architetti Markus Wespi e Jérôme De Meuron", www.architetturadi Pietra.it
- "La Via della Pietra", www.architetturadi Pietra.it
- 2006: *I fornaciai Malcantonesi nel Nord Italia tra XVIII e XX secolo*, ("Quaderni del Museo del Malcantone 2"), Curio, Museo del Malcantone

CONSTRUCTION EN PIERRE MASSIVE EN SUISSE

ANNEXES

Stefano Zerbi

Annexe 1 - Pierres suisses pour la construction massive

Annexe 2 - Analyse des données recueillies lors des visites de carrières

Annexe 3 - Liste des carrières suisses de pierre naturelle de taille

Annexe 4 - Lois et règlements suisses concernant la carrière

Annexe 5 - Tracé d'un linteau en pierre naturelle

Annexe 6 - Comportement parasismique des maçonneries en pierre

Annexe 7 - Calculs thermiques sur des bâtiments en pierre massive

Annexe 8 - Inertie thermique des façades en pierre naturelle

Annexe 9 - Inventaires de Cycle de Vie pour la pierre naturelle massive

Annexe 10 - Habitations individuelles en pierre naturelle massive

Annexe 11 - Petit glossaire

PIERRES SUISSES POUR LA CONSTRUCTION MASSIVE

Ce recueil de fiches est le résultat d'un travail de terrain qui a été réalisé pendant les années 2007 à 2010, dans le cadre du travail de recherche "Construction en pierre massive en Suisse", soutenu par le Fond National Suisse de la Recherche Scientifique (FNS) et réalisé au sein du Laboratoire de Construction et Conservation de l'Institut d'Architecture, Faculté ENAC, de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Les pierres naturelles choisies sont celles, actuellement exploitées, dont l'utilisation sous forme massive dans la construction est envisageable autant pour les caractéristiques techniques que pour les quantités de matière première disponibles. C'est pour cela que certains gisements, peu exploités à l'heure actuelle, n'y figurent pas.

Chaque fiche contient des données techniques et des informations concernant les dimensions des blocs bruts et des modes d'exploitation.

Une échelle en centimètres est reportée sur chaque échantillons de pierre naturelle.

Les images des carrières permettent d'en apprécier l'insertion dans le territoire et les caractéristiques géologiques.








Nous remercions toutes et tous ceux qui ont contribué au recueil de ces informations, en premier lieu les différentes entreprises du secteur de la pierre naturelle et en particulier: Abraham Conrad; Andreas Müller; Arturo Pollini; Chiara Ongaro; Claudio Giannini; Daniel Kiener; Daniel Stoffer; Domenico Parrò; Edgardo Polti; Elio Sangiorgio; Emilio Stecher; Flavio Giannini; Giuseppe Ongaro; Guy Genilloud; Hans-Jakob Bärlocher; Hans-Jakob Kuster; Jacques Rossier; Kurt Hermann; Leander Egger; Lino Polti; Luca Dotti; Marilena Polti; Mauro Bettazza; Pia Truffer; Romain Pillonel; Simon Thomann; Thierry Renaud; Titus Toscano et Tiziano Sangiorgio.

Nous remercions également, pour les renseignements, Conrad Zehnder; Daniel Lachat; Pierre Lachat; Rainer Kündig, et, pour les visites de carrières, Andreas Queisser et Olivier Fawer.

FICHES

1. ANDEER
2. BERNER SANDSTEIN
3. BOLLINGER-LEHHOLZ SANDSTEIN
4. BOLLINGER-UZNABERGER SANDSTEIN
5. BUCHBERGER SANDSTEIN
6. CALANCA
7. CRESCIANO
8. GRES DE LA MOLIERE
9. GRES DE MASSONNENS
10. GRES DE VILLARLOD
11. GUBER
12. GUNTLIWEIDER SANDSTEIN
13. IRAGNA
14. LEGIUNA
15. LIESBERGER KALKSTEIN
16. LODRINO
17. MÄGENWILER MUSCHELKALK
18. MAGGIA
19. ONSERNONE
20. ROC DE CERNIA
21. ROOTER SANDSTEIN
22. RORSCHACHER SANDSTEIN
23. SAN BERNARDINO
24. VALS

LEGENDE DES FICHES

	Calcaire
	Gneiss
	Grès
	Carrière en flanc de taille
	Carrière en fosse
	Carrière en galerie
	Carrière en puits

ANDEER



1

description géologique gneiss de la nappe suretta

description pétrographique gneiss (orthogneiss)

lieu d'exploitation	Andeer	
canton	GR	
masse spécifique	2699	kg/m ³
résistance à la compression	191-218	N/mm ² (béton 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	15-27.1	N/mm ²
module d'élasticité		kN/mm ²
porosité	0.8	%
coeff. d'absorption d'eau	0.8-1.0	% vol
gélivité	résistant	
rés. agents atmosphériques	résistant	
couleur	vert à vert foncé	
traitements de surface	tout traitement	
exploitation en activité	oui	2010
nombre de carrières	1	3
volume exploité	4000	17'000 m ³ /année
type de carrière	en flanc de taille	
système d'exploitation	perforation-explosif-fil diamanté	
dim. blocs d'extraction	100x80x60 / 300-350x160x180 LxPxH cm	

ENTREPRISE VISITEE

entreprise Toscano AG Naturstein

adresse Parsagna
CH-7440 Andeer

site internet <http://www.toscano-granit.ch>

email info@toscano-granit.ch

tél / fax 081 661 13 70 - 081 661 19 55

notes Autre entreprise
ACONRAD AG

Granitwerk

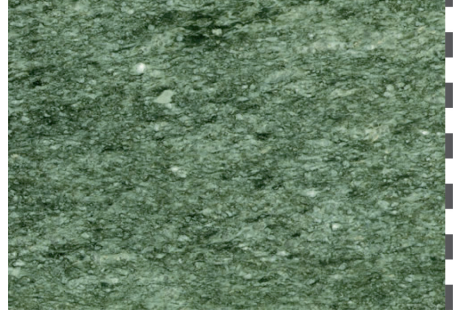
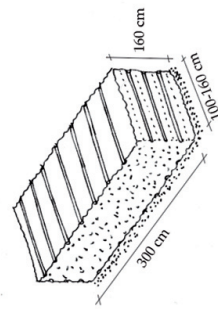
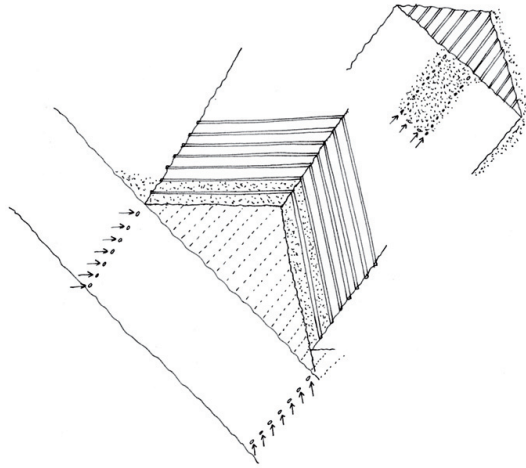
CH-7440 Andeer

T +41 (0)81 661 11 07

F +41 (0)81 661 14 55

<http://www.aconrad.ch> - granit@aconrad.ch

1) Kündig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.



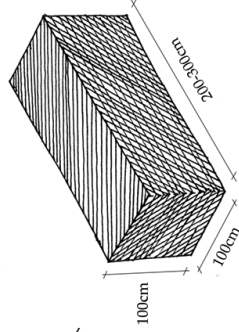
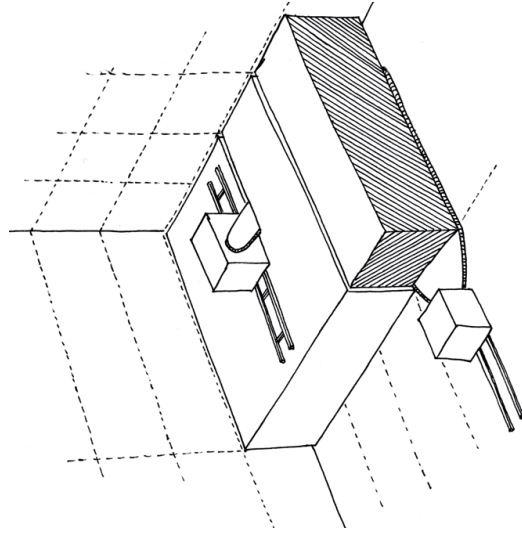
BERNER SANDSTEIN

Grès de la Molasse de Berne

2



description géologique	grès de la Molasse marine supérieure du Burdigalien	
description pétrographique	grès de la molasse	
lieu d'exploitation	Krauchthal/Ostermündingen/Köniz-Gurten	
canton	BE	
masse spécifique	2200-2210	kg/m ³
résistance à la compression	33,9-35,4	N/mm ² (béton 35; brique 40; bois 50)
résistance à la traction		N/mm ²
module d'élasticité	54,2	kN/mm ²
porosité		%
coeff. d'absorption d'eau	12-14	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques		
couleur	gris clair à gris vert	
traitements de surface	pas de polissage et de flammage	
exploitation en activité	1993-96 1/	2010
nombre de carrières	oui	oui
volume exploité	3	3
type de carrière	1900	1500
système d'exploitation	souterraine-en flanc de taille	
dim. blocs d'extraction	200-300x100x100	LxPxH cm
entreprise	Carlo Bernasconi AG	
adresse	Riedbachstrasse 51 CH-3027 Bern	
site internet	http://www.carloag.ch	
email	info@carloag.ch	
tél / fax	031 990 98 00 - 031 990 98 48	
notes	La pierre exploitée est normalement réservée pour la restauration des monuments.	



1/ Kündig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

BOLLINGER-LEHHOLZ SANDSTEIN

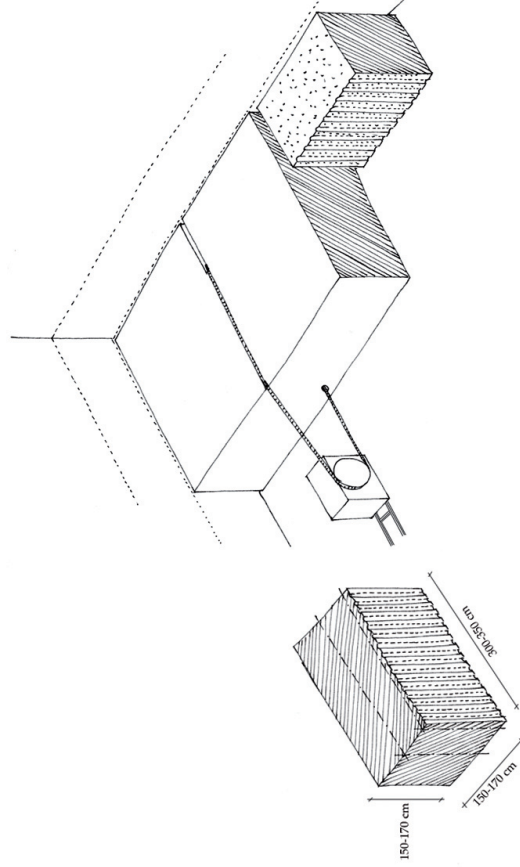
Grès de la Molasse de Bollingen-Lehholz



3

description géologique	grès de la Molasse d'eau douce inférieure de l'Aquitainien	
description pétrographique	grès arkosique ("granitique")	
lieu d'exploitation	Bollingen-Lehholz	
canton	SZ	
masse spécifique	2400	kg/m3
résistance à la compression	70	N/mm2 (béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	4.9	N/mm2
module d'élasticité		kN/mm2
porosité		%
coeff. d'absorption d'eau	7.2	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques		
couleur	gris vert clair	
traitements de surface	pas de polissage et de flammage	
exploitation en activité	1993-96	1) 2010
nombre de carrières	oui	oui
volume exploité	1	1
	800	2000
		m3/année
type de carrière	en puit	
système d'exploitation	hauveses-fil diamanté	
dim. blocs d'extraction	300-350x150-170x150-170	
	LxPxH cm	

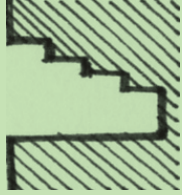
ENTREPRISE VISITEE	J. & A. Kuster Steinbrüche AG Bäch
entreprise	Kantonstrasse 24
adresse	CH-8807 Freienbach
site internet	http://www.kuster.biz
email	info@kuster.biz
tél / fax	044 787 70 70 - 044 787 70 71
notes	carrière Lehholz 8715 Bollingen - 055 212 62 70
	Sensible aux sels.



1) Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

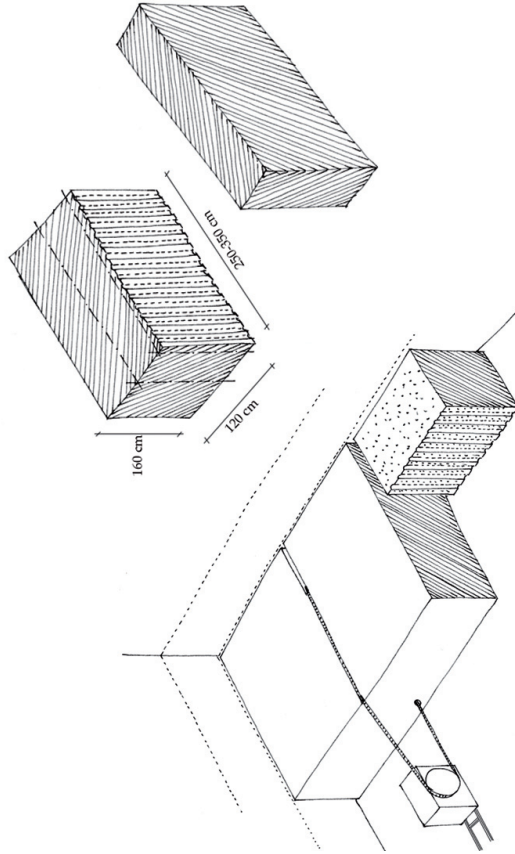
BOLLINGER-UZNABERGER SANDSTEIN

Grès de la Molasse de Bollingen-Uznaberg



4

description géologique	grès de la Molasse d'eau douce inférieure de l'Aquitainien	
description pétrographique	grès arkosique ("granitique")	
lieu d'exploitation	Eschenbach (carrière Brand)	
canton	SG	
masse spécifique	2400-2500	kg/m ³
résistance à la compression	87.2-109.5	N/mm ² (béton 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	7.2	N/mm ²
module d'élasticité		kN/mm ²
porosité	6.3-9.1	%
coeff. d'absorption d'eau	2.6-3.1	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques		
couleur	gris	
traitements de surface	pas de polissage	
exploitation en activité	1993-96 1/	2010
nombre de carrières	oui	oui
volume exploité	1	1
	2000	1200
		m ³ /année
type de carrière	en puit	
système d'exploitation	hauvse-fil diamanté-perforation	
dim. blocs d'extraction	250-350x120x160	
ENTREPRISE VISITEE		
entreprise	Gebr. Müller AG	
adresse	alte Uznabergstrasse CH-8732 Neuhaus	
site internet	http://www.muellermatursteine.ch	
email	info@muellermatursteine.ch	
tél / fax	055 286 30 00 - 055 282 42 50	
notes	Sensible aux sels.	



1/ Kündig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

BUCHBERGER SANDSTEIN

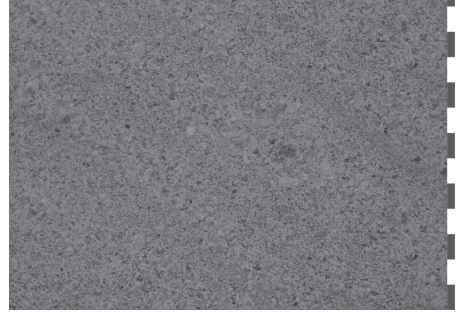
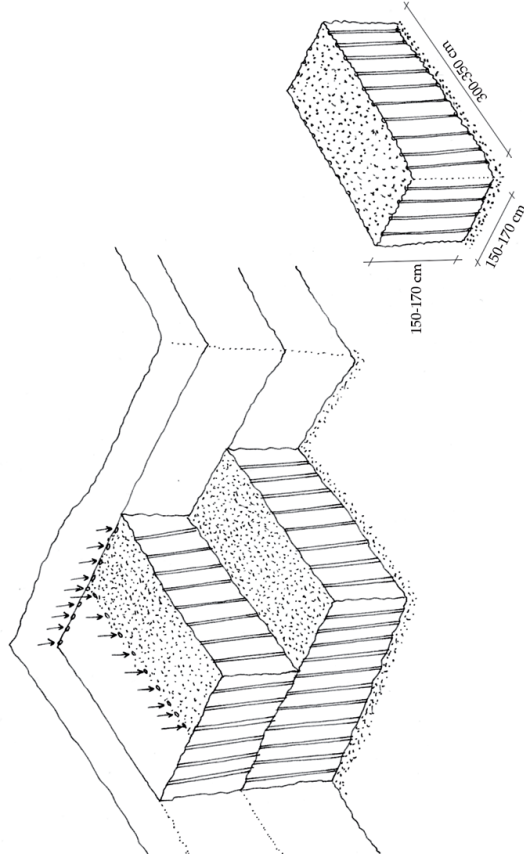
Grès de la Molasse de Buchberg

5



description géologique	grès de la Molasse d'eau douce inférieure de l'Aquitainien	
description pétrographique	grès arkosique ("granitique")	
lieu d'exploitation	Nuolen-Guntliweiid	
canton	SZ	
masse spécifique	2510	kg/m3
résistance à la compression	82	N/mm2 (selon 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction		N/mm2
module d'élasticité		kN/mm2
porosité		%
coeff. d'absorption d'eau	5.3	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques		
couleur	gris vert clair	
traitements de surface	pas de polissage et de flammage	
	1993-96	2010
exploitation en activité	oui	oui
nombre de carrières	1	1
volume exploité	900	1000
		m3/année
type de carrière	en flanc de taille	
système d'exploitation	perforation-fil diamanté	
dim. blocs d'extraction	300-350x150-170x150-170	
		LxPxH cm

ENTREPRISE VISITEE	J. & A. Kuster Steinbrüche AG Bäch
entreprise	Kantonstrasse 24
adresse	CH-8807 Freienbach
site internet	http://www.kuster.biz
email	info@kuster.biz
tél / fax	044 787 70 70 - 044 787 70 71
notes	carrière guntliweiid 8855 Nuolen - 055 440 24 13
	Sensible aux sels.



1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

CALANCA

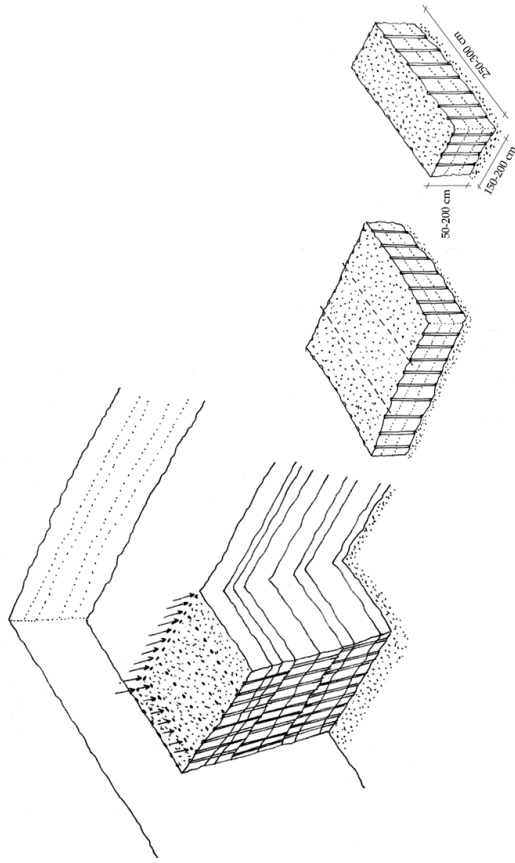
6



description géologique gneiss de la nappe simano

description pétrographique gneiss (paragneiss) à deux micas

lieu d'exploitation	Arvigo	
canton	GR	
masse spécifique	2710	kg/m ³
résistance à la compression	188.5/161.5	N/mm ² (béton 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	13.3/4.5	N/mm ²
module d'élasticité	58.2/35.8	kN/mm ²
porosité	1.86	%
coeff. d'absorption d'eau	0.28	% vol
gélivité	0	
rés. agents atmosphériques	résistant	
couleur	gris foncé	
traitements de surface	tout traitement	
exploitation en activité	1993-96	1) 2010
nombre de carrières	oui	
volume exploité	2	m ³ /année
type de carrière	flanc de taille	
système d'exploitation	perforation-explosif	
dim. blocs d'extraction	250-300x150-200x150-200	
ENTREPRISE VISITEE		
entreprise	Lino Polti e figli SA	
adresse	CH-6543 Arvigo	
site internet	http://www.linopolti.com	
email	info@linopolti.com	
tél / fax	091 828 11 10 ou 12 77 - 091 828 14 62	
notes	Autre entreprise: Alfredo Polti SA Industria del granito CH-6537 Grono (cava a Arvigo) 091 827 24 42 http://www.alfredopolti.ch	



1) Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

CRESCIANO

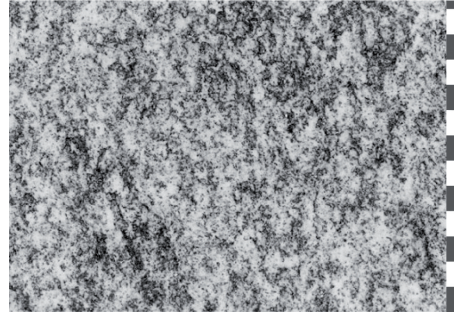
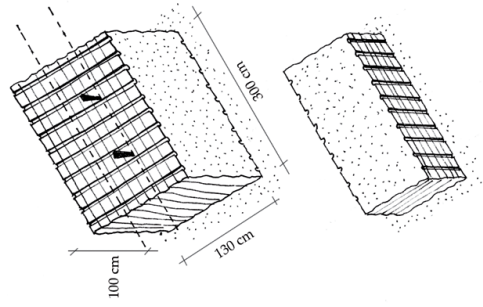
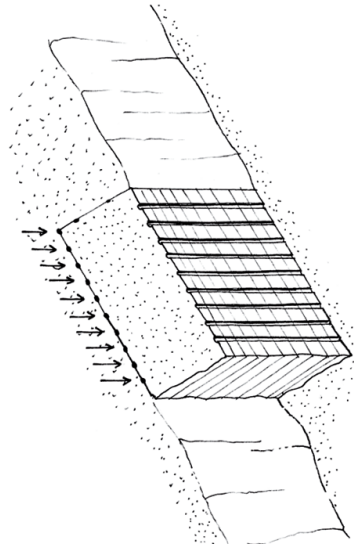
7



description géologique gneiss de l'unité leventina

description pétrographique gneiss (paragneiss)

lieu d'exploitation	Cresciano
canton	Ti
masse spécifique	2660 kg/m ³
résistance à la compression	132-191 N/mm ² (béton S5; brique 40; bois S0)
résistance à la traction	14-18 N/mm ²
module d'élasticité	47 kN/mm ²
porosité	1 %
coeff. d'absorption d'eau	0.3-0.88 % vol
gélivité	0
rés. agents atmosphériques	résistant
couleur	gris clair
traitements de surface	tout traitement
exploitation en activité	2010
nombre de carrières	oui
volume exploité	3
	50'000 m ³ /année
type de carrière	flanc de taille
système d'exploitation	perforation-explosif
dim. blocs d'extraction	300x100x130 LxPxH cm
ENTREPRISE VISITEE	
entreprise	Ongaro & Co SA
adresse	CH-6705 Cresciano
site internet	http://www.ongaro-graniti.ch
email	info@ongaro-graniti.ch
tél / fax	091 863 14 54 - 091 863 17 10
notes	Autre entreprise: Nuova Antonini SA Estrazione e fornitura di pietra naturale CH - 6532 Castione www.graniti.ch



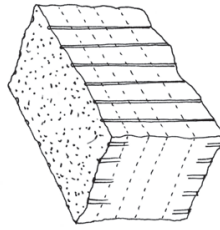
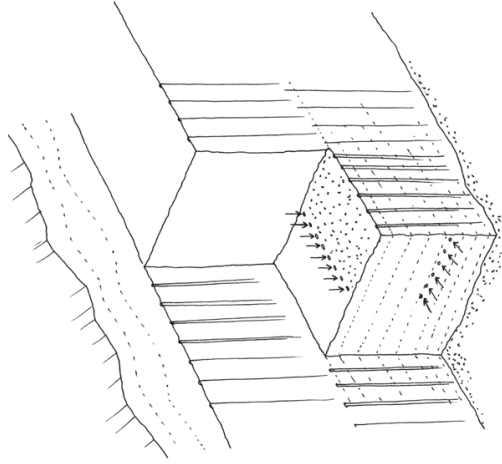
1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

GRES DE LA MOLIERE

8



description géologique	grès coquillier de la Molasse marine supérieure du Burdigalien	
description pétrographique	grès coquillier	
lieu d'exploitation	Murist-La Mollière	
canton	FR	
masse spécifique	2640	kg/m3
résistance à la compression	41.7	N/mm2 (béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction		N/mm2
module d'élasticité		kN/mm2
porosité	4.06	%
coeff. d'absorption d'eau	1.54	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques	résistant	
couleur	jaune gris, bleu gris	
traitements de surface	pas de polissage et de flammage	
exploitation en activité	1993-96	2010
	oui	oui
nombre de carrières	1	2
volume exploité	800	m3/année
type de carrière	en flanc de taille	
système d'exploitation	perforation	
dim. blocs d'extraction	LxPxH cm	
ENTREPRISE VISITEE		
entreprise	Romain Pillonel - Carrières de la Mollière	
adresse	Route de la Chapelle 12 CH-1470 Estavayer-le-Lac	
site internet		
email		
tél / fax	026 663 54 85 - 026 663 54 89	
notes	Données techniques issues de Niggli, P. 1915	



1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

GRES DE MASSONNENS

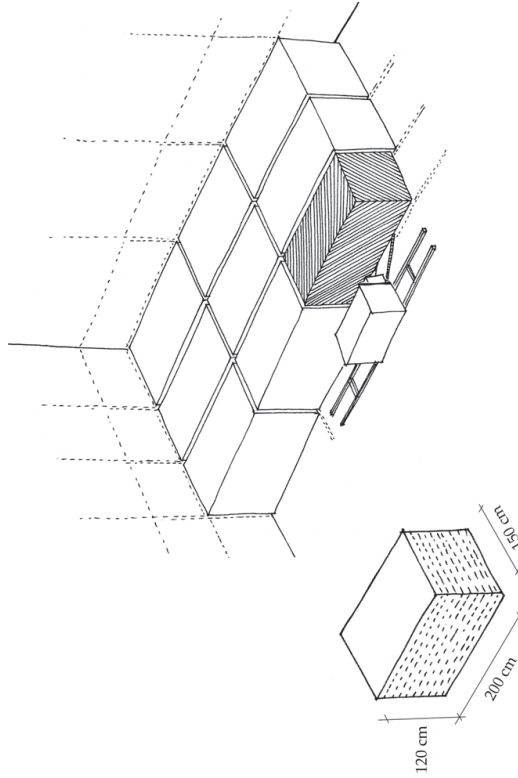
9



description géologique grès de la Molasse marine supérieure du Burdigalien

description pétrographique grès de la molasse

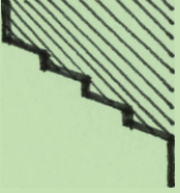
lieu d'exploitation	Massonnens		
canton	FR		
masse spécifique	2708	kg/m ³	
résistance à la compression	36.6	N/mm ²	(selon 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction		N/mm ²	
module d'élasticité		kN/mm ²	
porosité	19.9	%	
coeff. d'absorption d'eau	13.9	% vol	
gélivité			
rés. agents atmosphériques			
couleur	gris jaune, gris bleu		
traitements de surface	pas de polissage et de flammage		
exploitation en activité	oui	2010	
nombre de carrières	1	oui	
volume exploité	600	400	m ³ /année
type de carrière	en flanc de taille		
système d'exploitation	haveuses		
dim. blocs d'extraction	200x150x120		
ENTREPRISE VISITEE			
entreprise	Geniloud Paul SA		
adresse	Rue du Marchet 18 CH-1740 Neyruz (FR)		
site internet			
email			
tél / fax	026 653 15 10 (Bureau 026 477 17 35)		
notes	Les quantités extraites sont utilisées pour la restauration.		



1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

GRES DE VILLARLOD

10



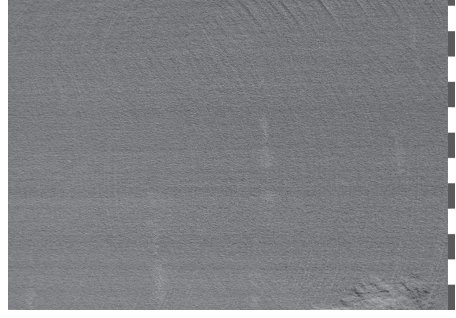
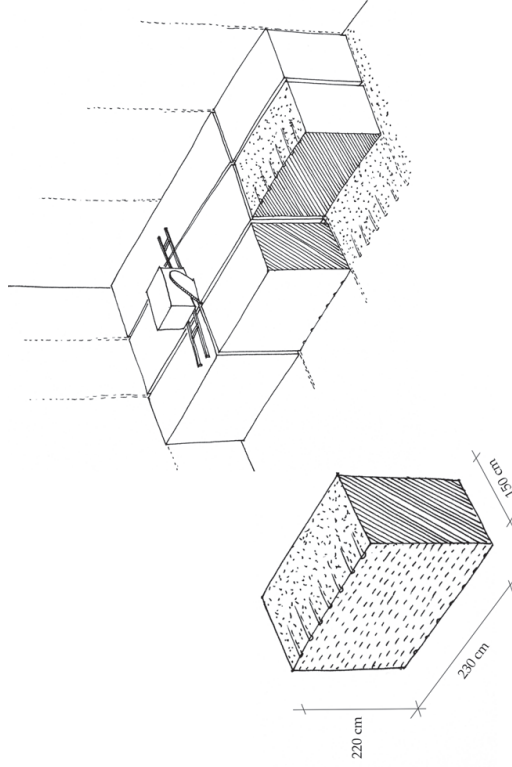
description géologique grès de la Molasse marine supérieure du Burdigalien

description pétrographique grès de la molasse

lieu d'exploitation	Villarlod		
canton	FR		
masse spécifique	2289	kg/m ³	
résistance à la compression	42-52	N/mm ²	(béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	0.8-1.1	N/mm ²	
module d'élasticité	5-6	kN/mm ²	
porosité	15.5	%	
coeff. d'absorption d'eau	11.5	% vol	
gélivité			
rés. agents atmosphériques			
couleur	gris vert clair, gris jaune clair, gris bleu clair		
traitements de surface	pas de polissage et de flammage		
exploitation en activité	oui	2010	
nombre de carrières	1	oui	
volume exploité	<200	200	m ³ /année

type de carrière	en flanc de taille
système d'exploitation	hauvaise-perforation
dim. blocs d'extraction	230x150x220 LxPxH cm

ENTREPRISE VISITEE
entreprise Molasse de Villarlod.ch SA
adresse Case Postale 148
 CH-1726 Favargny
 La Carrière de Villarlod - CH-1695 Le Glèbe
site internet <http://www.molassedevillarlod.ch>
email info@molassedevillarlod.ch
tél / fax 026 411 11 87 - 026 411 39 24
notes La pierre extraite est normalement réservée pour la restauration.



1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

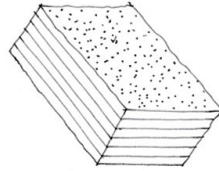
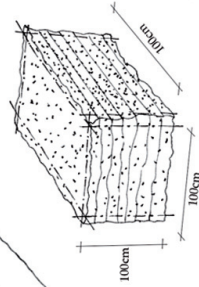
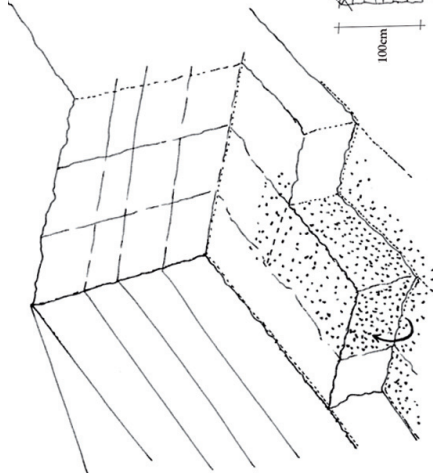
GUBER

Alpnacher Guber



11

description géologique	grès du Flysch de l'Ultra Helvétique	
description pétrographique	grès calcaire (haut contenu en calcium 75%)	
lieu d'exploitation	Alpnach	
canton	OW	
masse spécifique	2560	kg/m ³
résistance à la compression	209	N/mm ² (béton 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	30.5	N/mm ²
module d'élasticité	74	kN/mm ²
porosité		%
coeff. d'absorption d'eau	0.08-0.18	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques		
couleur	gris clair - gris foncé	
traitements de surface	tout traitement	
exploitation en activité	1993-96	1) 2010
	oui	oui
nombre de carrières	1	1
volume exploité	-	20'000 m ³ /année
type de carrière	en flanc de taille	
système d'exploitation	pelle mécanique-explosif	
dim. blocs d'extraction	100x100x100 LxPxH cm	
ENTREPRISE VISITEE		
entreprise	Guber Natursteine AG	
adresse	bûro: Grünebeck 3 steinbruch: Guberstrasse CH-6055 Alpnach Dorf	
site internet	http://www.guber.ch	
email	info@guber.ch	
tél / fax	041 670 28 28 - 041 670 13 67	
notes	Les dimensions des blocs sont très variables.	



1) Kündig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

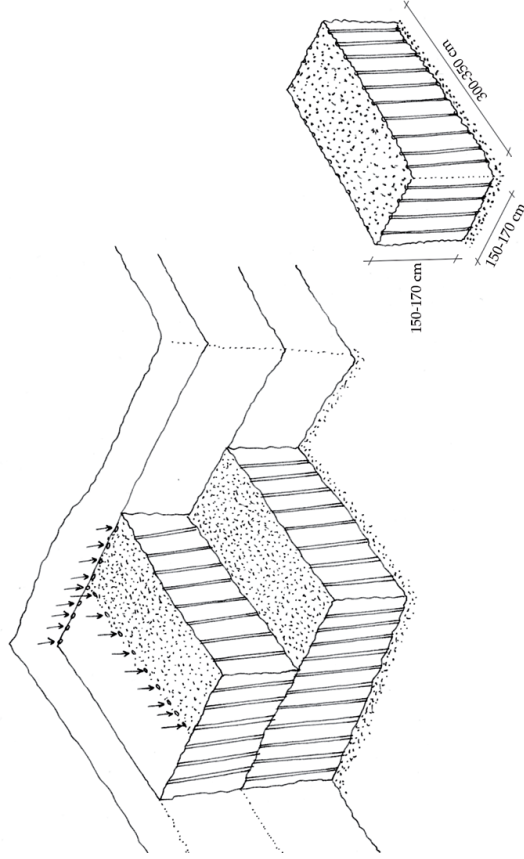
GUNTLWEIDER SANDSTEIN

Grès de la Molasse de Guntliweid

12



description géologique	grès de la Molasse d'eau douce inférieure de l'Aquitainien	
description pétrographique	grès arkosique ("granitique")	
lieu d'exploitation	Nuolen-Guntliweid	
canton	SZ	
masse spécifique	2595	kg/m3
résistance à la compression	108	N/mm2 (béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction		N/mm2
module d'élasticité		kN/mm2
porosité		%
coeff. d'absorption d'eau	4.1	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques		
couleur	gris vert clair	
traitements de surface	pas de polissage et de flammage	
	1993-96	2010
exploitation en activité	oui	oui
nombre de carrières	1	1
volume exploité	900	1'000
		m3/année
type de carrière	en flanc de taille	
système d'exploitation	perforation-fil diamanté	
dim. blocs d'extraction	300x150-170x150-170	
ENTREPRISE VISITEE		
entreprise	J. & A. Kuster Steinbrüche AG Bäch	
adresse	Kantonstrasse 24 CH-8807 Freienbach	
site internet	http://www.kuster.biz	
email	info@kuster.biz	
tél / fax	044 787 70 70 - 044 787 70 71	
notes	carrière guntliweid 8855 Nuolen - 055 440 24 13	
	Sensible aux sels.	



1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

IRAGNA

13



description géologique gneiss de l'unité leventina

description pétrographique gneiss (paragneiss)

lieu d'exploitation	Iragna		
canton	TI		
masse spécifique	2660	kg/m ³	
résistance à la compression	180	N/mm ²	(selon 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	18.4	N/mm ²	
module d'élasticité	67.2	kN/mm ²	
porosité		%	
coeff. d'absorption d'eau		% vol	
gélivité			
rés. agents atmosphériques			
couleur	gris clair		
traitements de surface	tout traitement		
exploitation en activité	1993-96	1)	2010
nombre de carrières	oui		
volume exploité	3		
	>30'000 m ³ /année		
type de carrière	en flanc de taille-plateau		
système d'exploitation	perforation-explosif-fil diamanté		
dim. blocs d'extraction	250-330x150x120-160 LxPxH cm		

ENTREPRISE VISITEE

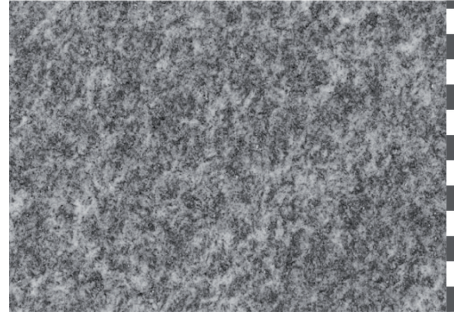
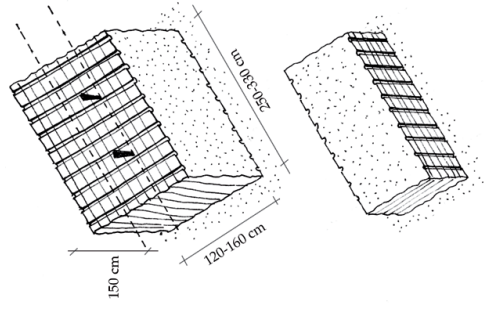
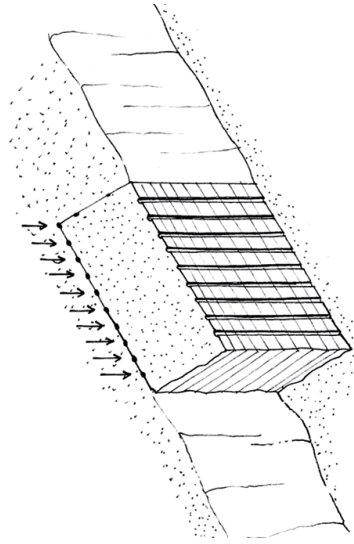
entreprise Martinetti SA cava di granito
adresse CH-6707 Iragna

site internet <http://www.martinetti.ch>

email info@martinetti.ch

tél / fax 091 866 00 01

notes Autre entreprise:
Graniti Maurino
CH-6710 Biasca
T. 091 862 13 22
<http://www.granitimauroino.ch/>
info@granitimauroino.ch



1) Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.



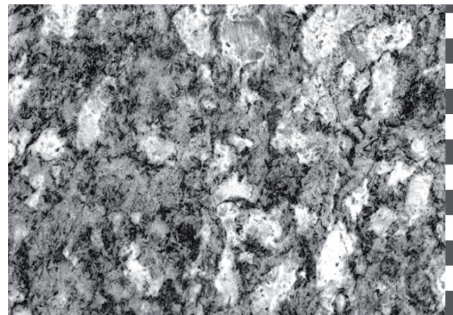
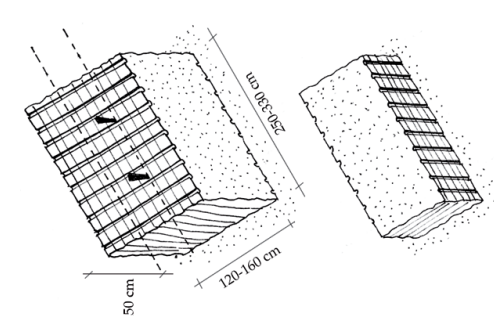
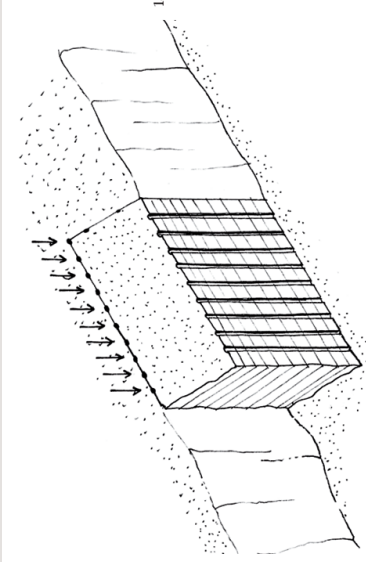
description géologique gneiss de la nappe simano

description pétrographique gneiss (gneiss à oillet)

lieu d'exploitation	Malvaglia
canton	Ti
masse spécifique	2770 kg/m ³
résistance à la compression	165-190 N/mm ² (selon 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	11-13.5 N/mm ²
module d'élasticité	kN/mm ²
porosité	%
coeff. d'absorption d'eau	% vol
gélivité	
rés. agents atmosphériques	
couleur	gris foncé
traitements de surface	tout traitement
exploitation en activité	1993-96 1/ 2010
nombre de carrières	oui
volume exploité	1 m ³ /année

type de carrière	en flanc de taille-plateau
système d'exploitation	perforation-explosif
dim. blocs d'extraction	LxPxH cm
ENTREPRISE VISITEE	
entreprise	Granito Legiuna SA
adresse	CH-6713 Malvaglia

site internet <http://www.granito-legiuna.ch>
 email info@granito-legiuna.ch
 tél / fax 091 870 11 64-079 413 67 58-091 870 23 37
 notes

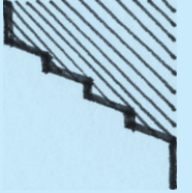


1/ Kündig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

LIESBERGER KALKSTEIN

Calcaire de Liesberg

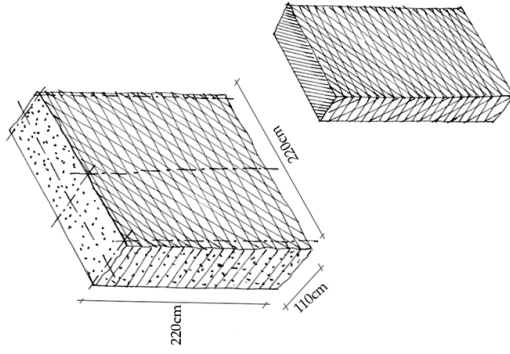
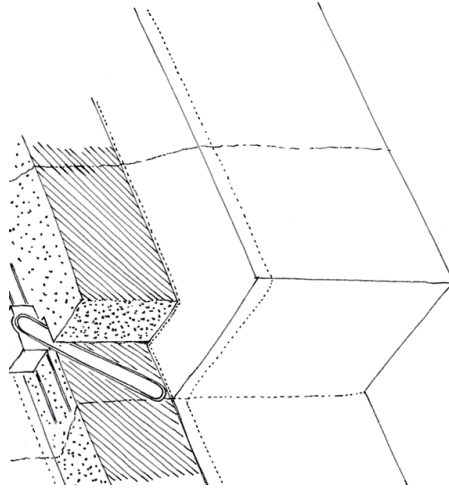
15



description géologique calcaire oolithique du Séquanien

description pétrographique calcaire oolithique

lieu d'exploitation	Liesberg-Laufen	
canton	BL	
masse spécifique	2580-2680	kg/m ³
résistance à la compression	117-138	N/mm ² (béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	13,8-14,1	N/mm ²
module d'élasticité		kN/mm ²
porosité		%
coeff. d'absorption d'eau	0,25	% vol
gélivité		% vol
rés. agents atmosphériques		
couleur	jaune crème-beige-rouge	
traitements de surface	tout traitement	
exploitation en activité	1993-96	1) 2010
nombre de carrières	oui	oui
volume exploité	1	1 (2)
	<200	600
		m ³ /année
type de carrière	en flanc de taille	
système d'exploitation	hauveses	
dim. blocs d'extraction	H:170-220 / 220x110x220	
ENTREPRISE VISITEE		
entreprise	Gebr. Thomann AG	
adresse	Baselstrasse-Delsbergstrasse CH-4253 Liesberg	
site internet	http://www.steinwelt.ch	
email	info@gtho.ch	
tél / fax	061 771 05 52-061 771 03 76	
notes	Attention aux poches d'argile. Deux qualités de pierre selon les bancs.	



1) Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

LODRINO

16



description géologique gneiss de l'unité leventina

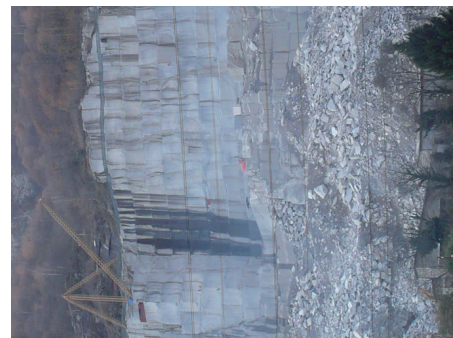
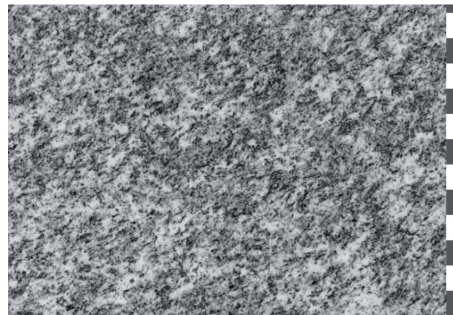
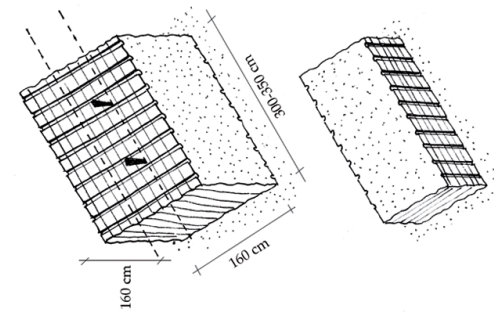
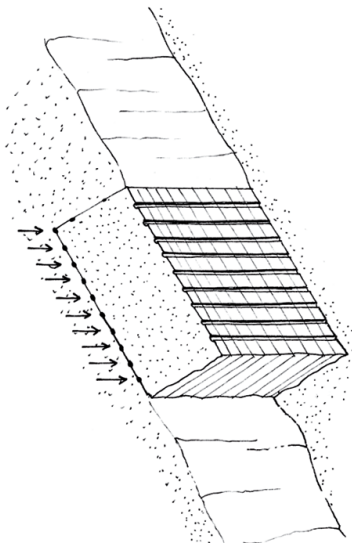
description pétrographique gneiss (paragneiss)

lieu d'exploitation	Lodrino
canton	TI
masse spécifique	2650 kg/m ³
résistance à la compression	202 N/mm ² (béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	13-20 N/mm ²
module d'élasticité	kN/mm ²
porosité	%
coeff. d'absorption d'eau	0.86-0.90 % vol
gélivité	
rés. agents atmosphériques	
couleur	gris clair
traitements de surface	tout traitement
exploitation en activité	2010 oui
nombre de carrières	4
volume exploité	40'000 m ³ /année

type de carrière	flanc de taille
système d'exploitation	perforation-explosif-fil diamanté
dim. blocs d'extraction	300-350x160x160 LxPxH cm

ENTREPRISE VISITEE
 entreprise
 adresse
 Gianni graniti SA
 CH-6527 Lodrino

site internet <http://www.gianni-graniti.ch>
 email info@gianni-graniti.ch
 tél / fax 091 863 22 86-091 863 27 50
 notes
 Autre entreprise:
 Sangiorgio Elio SA,
 CH-6527 Lodrino,
 T. 091 863 17 31 (Fax 091 863 31 46)
<http://www.sangiorgioelio.com>.



1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

MÄGENWILER MUSCHELKALK

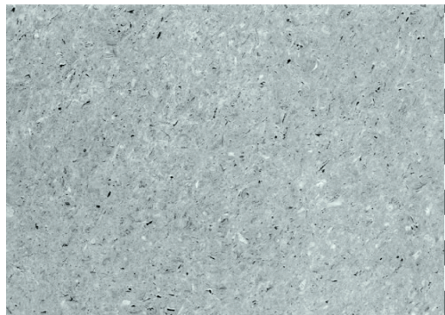
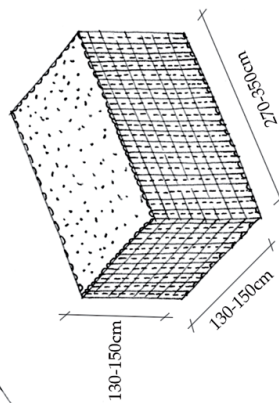
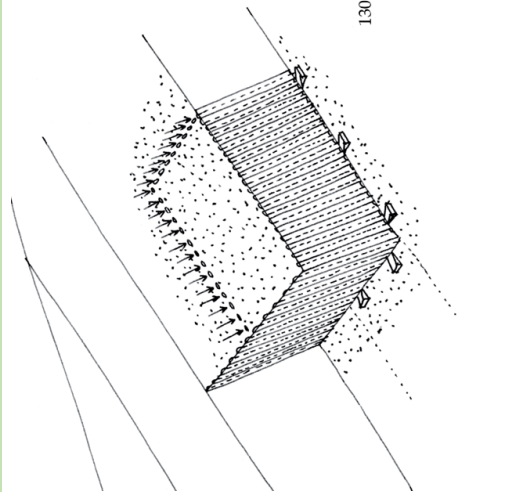
Grès coquillier de Mägenwil



17

description géologique	grès coquillier de la Molasse marine supérieure du Burdigalien	
description pétrographique	grès coquillier	
lieu d'exploitation	Mägenwil-Othmarsingen	
canton	AG	
masse spécifique	2500	kg/m ³
résistance à la compression	52-61 (35-90)	N/mm ² (béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	11,2	N/mm ²
module d'élasticité	14-24	kN/mm ²
porosité	5,7	%
coeff. d'absorption d'eau	1,9	% vol
gélivité		
rés. agents atmosphériques	résistant	
couleur	gris bleu clair et gris jaune	
traitements de surface	pas de polissage et de flammage	
exploitation en activité	oui	2010
nombre de carrières	1	oui
volume exploité	<200	250 m ³ /année
type de carrière	en fosse	
système d'exploitation	perforation	
dim. blocs d'extraction	270-350x130-150x130-150 LxPxH cm	

ENTREPRISE VISITEE	Emil Fischer AG	
entreprise	Steinbruch Steinhof	
adresse	postfach 142 CH-5605 Dottikon	
site internet	http://www.fischer-natursteine.ch	
email	buero@fischer-natursteine.ch	
tél / fax	062 885 80 10-062 885 80 11	
notes	L'entreprise Fischer est gérée par trois associés. La macroporosité de la roche n'est pas la cause d'une forte gélivité.	



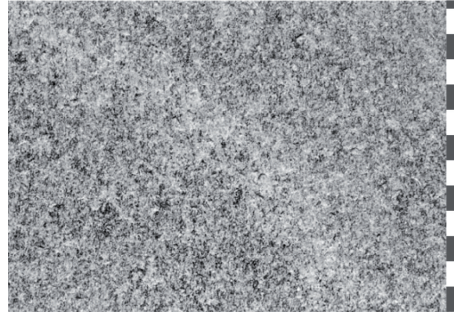
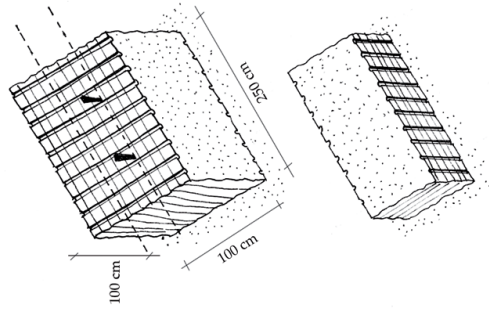
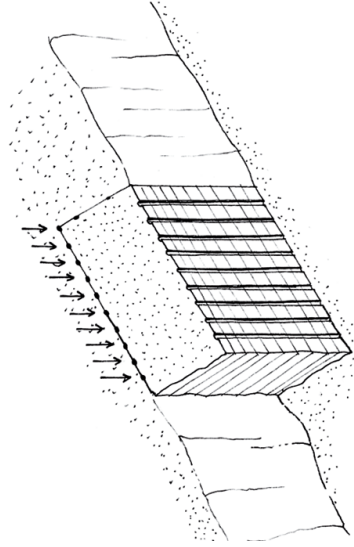
1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.



description géologique gneiss de la nappe antigorio

description pétrographique gneiss (paragneiss) à deux micas

lieu d'exploitation	Cevio-Riveo-Linescio
canton	Ti
masse spécifique	2720 kg/m ³
résistance à la compression	224 N/mm ² (béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	26 N/mm ²
module d'élasticité	kN/mm ²
porosité	%
coeff. d'absorption d'eau	0.96 % vol
gélivité	
rés. agents atmosphériques	
couleur	gris foncé
traitements de surface	tout traitement
exploitation en activité	1993-96 1/ 2010
nombre de carrières	oui
volume exploité	1 20'000 m ³ /année
type de carrière	flanc de taille
système d'exploitation	perforation-explosif-fil diamanté
dim. blocs d'extraction	250x100x100 LxPxH cm
ENTREPRISE VISITEE	
entreprise	Bettazza graniti SA
adresse	Strada Cantonale CH-6675 Cevio
site internet	http://www.bettazzagraniti.ch
email	info@bettazzagraniti.ch
tél / fax	091 754 15 01-091 754 13 88
notes	



ONSERNONE

19



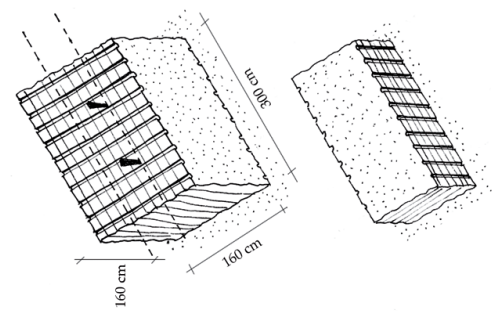
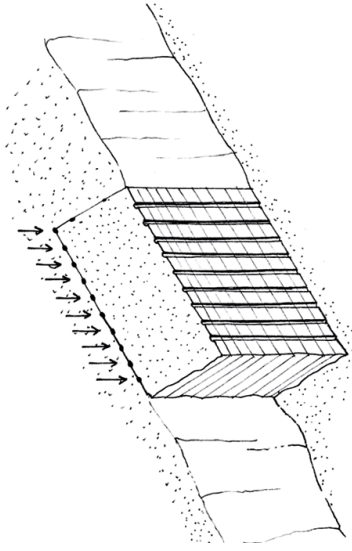
description géologique gneiss de la nappe antigorio

description pétrographique gneiss (paragneiss) à deux micas

lieu d'exploitation	Valle Onsernone-Valle Vergeletto		
canton	TI		
masse spécifique	2730	kg/m ³	
résistance à la compression	222	N/mm ²	(béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	23	N/mm ²	
module d'élasticité		kN/mm ²	
porosité		%	
coeff. d'absorption d'eau	0.79	% vol	
gélivité			
rés. agents atmosphériques			
couleur	gris foncé		
traitements de surface	tout traitement		
exploitation en activité	1993-96	1)	2010
nombre de carrières			oui
volume exploité			2
			-
			m ³ /année

type de carrière	flanc de taille
système d'exploitation	perforation-explosif
dim. blocs d'extraction	300x160x160 / 100-200x100x30-50 LxPxH cm
ENTREPRISE VISITEE	
entreprise	Granito Onsernone Edgardo Pollini e figlio SA
adresse	Strada Cantonale CH-6654 Cavigliano

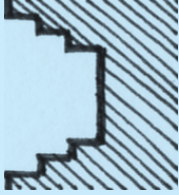
site internet
 email
 tél / fax 079 230 01 07
 notes



1) Kindig, R., ed. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

ROC DE CERNIA

20



description géologique calcaire cristallin du Portlandien

description pétrographique calcaire micritique

lieu d'exploitation	Valangin-la Cernia		
canton	NE		
masse spécifique	2.68	kg/m ³	
résistance à la compression	92	N/mm ²	(béton S5; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	2.3	N/mm ²	
module d'élasticité		kN/mm ²	
porosité		%	
coeff. d'absorption d'eau		% vol	
gélivité			
rés. agents atmosphériques			
couleur	crème (beige à gris)		
traitements de surface	pas de polissage et de flammage		
exploitation en activité	oui	2010	oui
nombre de carrières	1		1
volume exploité	<200		25'000 m ³ /année
type de carrière	en fosse		
système d'exploitation	perforation-explosif		
dim. blocs d'extraction	80-120x40-60x40-60 LxPxH cm		

ENTREPRISE VISITEE

entreprise S. Facchinetti SA

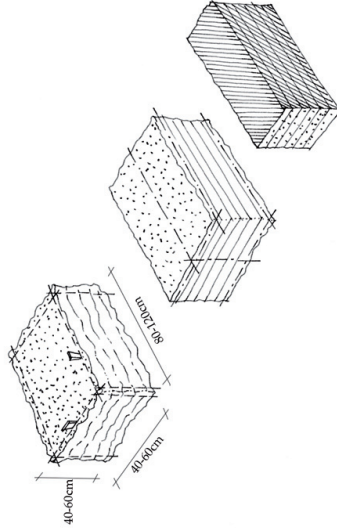
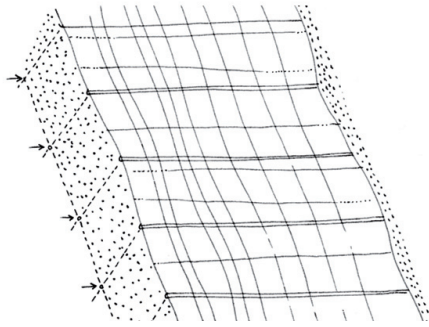
adresse Gouttes-d'or 78
CH-2009 Neuchâtel

site internet <http://www.facchinettisa.ch>

email lacernia@facchinettisa.ch

tél / fax 032 720 20 90 - 032 720 20 99

notes Attention aux poches d'argile et marne.
Utilisation totale pour travaux de génie civil. La partie pierre naturelle est assez réduite.

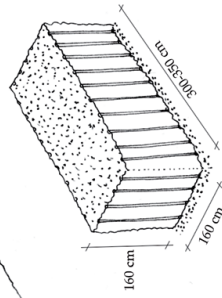
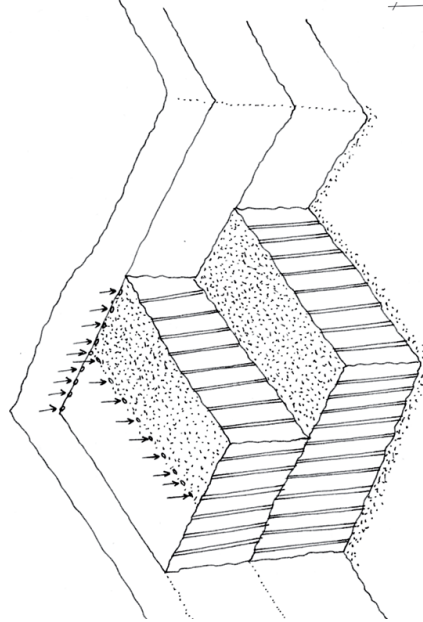


1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

ROOTER SANDSTEIN

Grès de la Molasse de Root

21



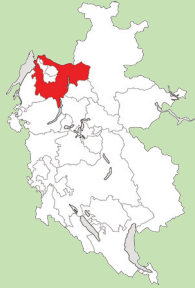
description géologique	grès de la Molasse marine supérieure du Burdigalien
description pétrographique	grès "en plaquettes" calcaire
lieu d'exploitation	Root-Rooterberg
canton	LU
masse spécifique	kg/m ³
résistance à la compression	80-90 (béton 55; brique 40; bois 50) N/mm ²
résistance à la traction	N/mm ²
module d'élasticité	kN/mm ²
porosité	%
coeff. d'absorption d'eau	4.9 % vol
gélivité	
rés. agents atmosphériques	
couleur	gris vert clair
traitements de surface	pas de polissage et de flammage
exploitation en activité	1993-96 1/ 2010
nombre de carrières	oui
volume exploité	1 750 m ³ /année
type de carrière	en flanc de taille
système d'exploitation	perforation-explosif
dim. blocs d'extraction	300-350x160x160 LxPxH cm
ENTREPRISE VISITEE	
entreprise	Emilio Stecher AG
adresse	Werkstrasse 15 CH-6037 Root
site internet	http://www.stecher.ch
email	natursteine@stecher.ch
tél / fax	041 450 00 50-041 450 00 51
notes	Grâce à la présence des micas, cassure possible. L'exploitation est faite chaque deux à trois ans par l'entreprise allemande Schubert und Partners.



1/ Kündig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

RORSCHACHER SANDSTEIN

Grès de la Molasse de Rorschach



22

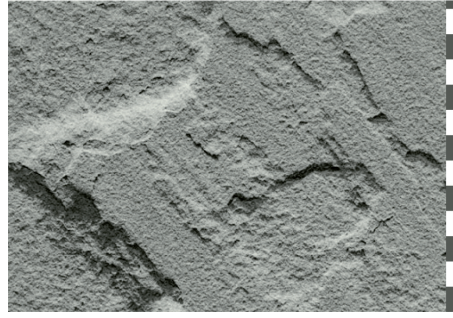
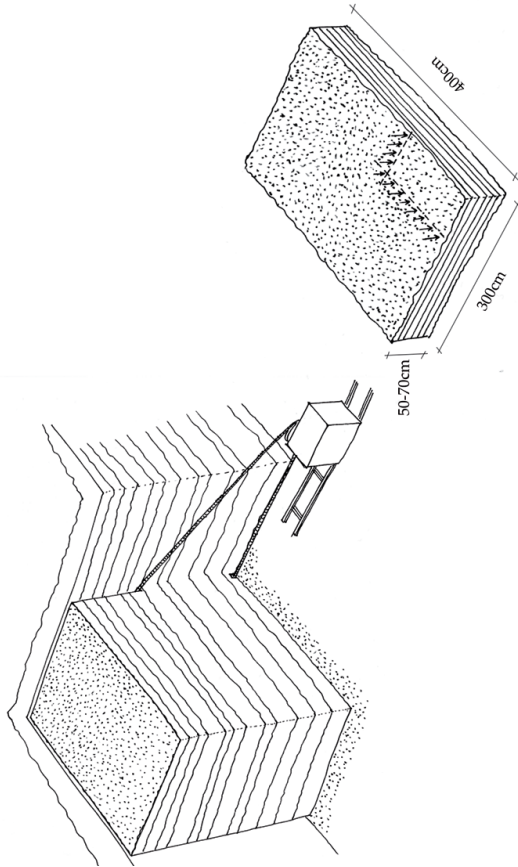
description géologique grès de la Molasse marine supérieure du Burdigalien

description pétrographique grès "en plaquettes" calcaire

lieu d'exploitation	St-Margrethen-Fuchsloch/Buchen-Staad
canton	SG
masse spécifique	2502 kg/m ³
résistance à la compression	72-93 N/mm ² (selon 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	7.1 N/mm ²
module d'élasticité	9.6-10.6 kN/mm ²
porosité	7.9 %
coeff. d'absorption d'eau	2.4 % vol
gélivité	
rés. agents atmosphériques	
couleur	gris vert
traitements de surface	pas de polissage et de flammage
exploitation en activité	1993-96 1/ 2010
nombre de carrières	oui
volume exploité	2 1
type de carrière	6200 11-12'000 m ³ /année
système d'exploitation	en flanc de taille
dim. blocs d'extraction	perforation-fil diamanté 400x300x70-120 LxPxH cm

ENTREPRISE VISITEE	Bärlocher Steinbruch und Steinhauerei AG
entreprise	postfach 13
adresse	CH-9422 Buchen-Staad
site internet	http://www.baerlocher-natursteine.ch
email	baerlocher@baerlocher-natursteine.ch
tél / fax	071 858 60 10-071 858 60 11
notes	Grâce à la présence des micas, cassure possible. Deux qualités. Gros éléments minces possibles, mais attention à la stratification.

1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.



SAN BERNARDINO

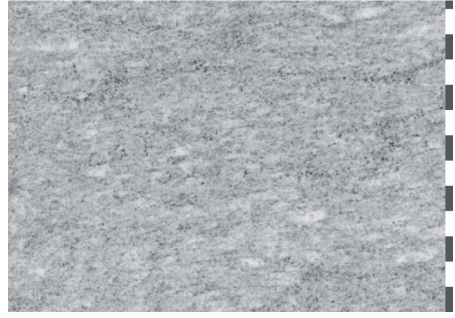
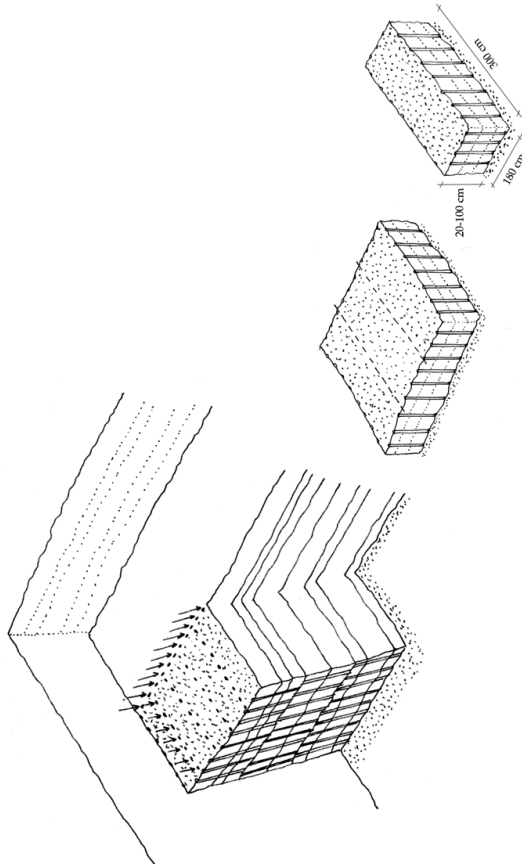
23



description géologique gneiss de la nappe adula

description pétrographique gneiss (paragneiss) à muscovite

lieu d'exploitation	Hinterrhein-Dürrenbüel
canton	GR
masse spécifique	kg/m ³
résistance à la compression	N/mm ² (selon 55; brique 40; bois 50)
résistance à la traction	N/mm ²
module d'élasticité	kN/mm ²
porosité	%
coeff. d'absorption d'eau	% vol
gélivité	
rés. agents atmosphériques	
couleur	gris vert clair
traitements de surface	tout traitement
exploitation en activité	1993-96 1/ 2010
nombre de carrières	oui à vérifier
volume exploité	1
	<200
	m ³ /année
type de carrière	en flanc de taille
système d'exploitation	perforation-explosif
dim. blocs d'extraction	300x180x20-100
ENTREPRISE VISITEE	
entreprise	Toscano AG et Bärlocher
adresse	Parsagna CH-7440 Anderer
site internet	http://www.toscano-granit.ch
email	info@toscano-granit.ch
tél / fax	081 661 13 70
notes	L'exploitation a recommencé grâce aux entreprises Toscano et Bärlocher.



1/ Kündig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

VALS

Valsér Quarzit



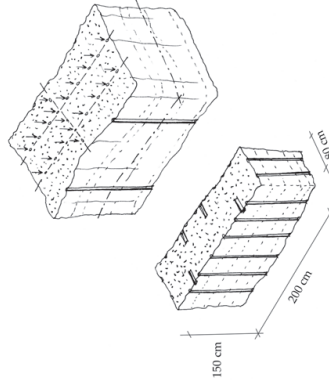
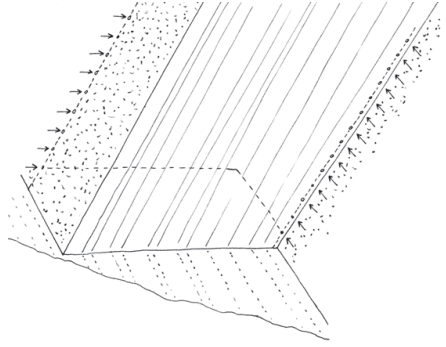
24

description géologique gneiss de la nappe adula

description pétrographique gneiss (orthogneiss), quartzite micacé schisteux

lieu d'exploitation	Vals	
canton	GR	
masse spécifique	2700	kg/m ³
résistance à la compression	227	N/mm ² (béton S5; brique 40; bois S0)
résistance à la traction	27	N/mm ²
module d'élasticité		kN/mm ²
porosité	0.8	%
coeff. d'absorption d'eau	0.4	% vol
gélivité	0	
rés. agents atmosphériques	résistant	
couleur	gris vert	
traitements de surface	tout traitement	
exploitation en activité	oui	2010
nombre de carrières	1	oui
volume exploité	10'000	m ³ /année

type de carrière	en flanc de taille
système d'exploitation	perforation-explosif
dim. blocs d'extraction	200x80x150
ENTREPRISE VISITEE	
entreprise	Truffer AG
adresse	Natursteinwerk Balma CH-7132 Vals
site internet	http://www.truffer.ch
email	quarry@truffer.ch
tél / fax	081 935 16 42 - 081 935 15 54
notes	



1/Kindig, R., éd. "Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz", Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1996.

ANALYSE DES DONNEES RECUEILLIES LORS DES VISITES DE CARRIERES

Les données quantitatives recueillies lors des visites des carrières suisses de pierre naturelle de taille ont été analysées et sont présentées dans les tableaux de cette annexe. Elles permettent de donner un aperçu de l'état de ce secteur d'activité au début du XXI^e siècle. Les visites ont eu lieu entre 2007 et 2010.

Nous remercions toutes les entreprises qui nous ont accueilli et qui nous ont fourni les informations nécessaires à cette analyse.

Fiche	Carrière	Canton	Entreprise	Localisation géographique	Plateau	Alpes	Sudalpin	Date d'ouverture avant 1910	1910-1950	1950-1980	après 1980	Employés total	exploitation
1	La Cernia-Valangin	NE	Facchinetti SA	1						1		16	5
2	Laufen	BL	Thomann AG Natursteine	1						1		20	3
3	Alpnacher Guber	OW	Guber Natursteine AG		1			1				40	4
4	Root	LU	Emilio Stecher AG							1		50	0
5	Steinhof-Othmarsingen	AG	Emil Fischer AG					1				25	2
6	Brand-Eschenbach	SG	Müller Natursteinwerk AG					1				25	4
7	Andeer	GR	A. Conrad AG			1		1				25	2
8	Buchen-Staad	SG	Bärlocher Steinbruch und Steinhauerei AG		1			1				45	15
9	Cevio	TI	Bettazza Graniti					1				25	6
10	Onsernone	TI	Granito Onsernone-Pollini					1				14	6
11	Andeer	GR	Toscana AG					1			1	20	10
11	San Bernardino	GR	Toscana AG					1					
12	Calanca	GR	Lino Polti e Figli SA					1				25	5
13	Bern	BE	Carlo Bernasconi		1			1				34	5
14	Lodrino	TI	Sangiorgio Elio SA						1			27	4
15	Lodrino	TI	Giannini Lodrino							1		34	7
16	Iragna	TI	Martinetti SA							1		8	8
17	Cresciano	TI	Ongaro Graniti					1				21	7
18	Malvaglia	TI	Granito Legiuna							1			
20	Leholz-Bollingen	SZ	Kuster Steinbrüche AG					1				30	6
20	Guntliweid-Nuolen	SZ	Kuster Steinbrüche AG					1					
21	Massonnens	FR	Geniloud Paul SA					1				1	1
22	Villarlod	FR	Molasse de Villarlod.ch					1				1	1
23	Truffer-Vals	GR	Truffer AG						1			48	5
24	La Molière	FR	Pillonel Romain					1				3	2
				2	10	13	0	11	2	11	1	537	108

Fiche	Carrière	Carrières exploitées	Secteur d'activité	exploitation et transformation	exploitation-transformation-mise en oeuvre	Type de roche		calcaire	gneiss	granite	Type de carrière		puits	flanc de taille	souterraine
						grès	calcaire				fosse	granite			
1	La Cernia-Valangin	1	exploitation		1			1			1				
2	Laufen	1		1				1						1	
3	Alpnacher Guber	1		1		1								1	
4	Root	1			1									1	
5	Steinhof-Othmarsingen	1			1						1				
6	Brand-Eschenbach	1			1							1			
7	Andeer	1		1					1					1	
8	Buchen-Staad	1			1				1					1	
9	Cevio	1		1					1					1	
10	Onsernone	2		1					1					2	
11	Andeer	2		1					1					2	
11	San Bernardino	1	1						1					1	
12	Calanca	1		1					1					1	
13	Bern	2			1				1					1	
14	Lodrino	1			1				1					1	
15	Lodrino	1		1					1					1	
16	Iragna	1	1						1					1	
17	Cresciano	1			1				1					1	
18	Malvaglia	1		1					1					1	
20	Leholz-Bollingen	1			1							1			
20	Guntliweid-Nuolen	1			1									1	
21	Massonnens	1	1											1	
22	Villarlod	1	1											1	
23	Truffer-Vals	1		1					1					1	
24	La Molière	2		1								1		1	
		29	4	11	10	11	2	13	0	3	2	23	1		

Fiche	Carrière	Type d'exploitation			Type de perforation			Type de chutes	Volume exploité (m ³ /an)	Pourcentage des chutes	Marché			Europe	Monde
		haveuse	fil diamanté	perforation	explosif	autre	fil diamanté				perforation	explosif	autre		
1	La Cernia-Valangin		1				1	25000	0			1			
2	Laufen	1						600					1		
3	Alpnacher Guber						1	23000	30			1			
4	Root					1		750				1			
5	Steinhof-Othmarsingen					1		250	30		1				
6	Brand-Eschenbach	1	1			1		1400	30			1			
7	Andeer					1		10000	50				1		
8	Buchen-Staad		1			1		12000	10			1			
9	Cevio		1			1		20000	50			1			
10	Onsernone					1						1			
11	Andeer					1		7000	80			1			
11	San Bernardino					1					1				
12	Calanca					1		25000	30			1			
13	Bern		1			1						1			
14	Lodrino					1		12000	30			1			
15	Lodrino		1			1		30000	60			1			
16	Iragna		1			1		30000	15			1			
17	Cresciano					1		15000	35			1			
18	Malvaglia					1							1		
20	Leholz-Bollingen	1	1			1		2000				1			
20	Guntliweid-Nuolen					1		1000				1			
21	Massonnens	1				1		400	5		1				
22	Villarod	1				1		200	5		1				
23	Truffer-Vals					1		10000	40			1		1	
24	La Molière					1		NA	NA			1			
		6	9	20	14	1	225600	31,25	0	6	18	9	1		

Fiche	Carrière	Traitement des chutes	mise à la décharge	valorisation moellons	valorisation granulats en propre	valorisation granulats par tierces
1	La Cernia-Valangin			1	1	1
2	Laufen				1	
3	Alpnacher Guber	1			1	
4	Root					
5	Steinhof-Othmarsingen				1	
6	Brand-Eschenbach	1				1
7	Andeer			1		1
8	Buchen-Staad			1		1
9	Cevio					
10	Onsernone	1				
11	Andeer					1
11	San Bernardino			1		
12	Calanca	1				
13	Bern			1		1
14	Lodrino			1		
15	Lodrino	1		1		
16	Iragna			1		1
17	Cresciano			1		1
18	Malvaglia					
20	Leholz-Bollingen			1		
20	Guntliweiid-Nuolen			1		
21	Massonnens	1				
22	Villarlod	1				
23	Truffer-Vals					
24	La Molière	1		1		1
		8	0	12	4	8

LISTE DES CARRIERES SUISES DE PIERRE NATURELLE DE TAILLE

Nous avons réalisé une liste des carrières suisses de pierre naturelle de taille actuellement exploitées. Nous nous sommes basés sur les informations contenues dans la thèse de doctorat de Hanspeter Schwarz de 1983 [Schwarz, H. 1983] en les vérifiant à travers celles publiées en 1996 [Kündig, R., éd. 1996]. Les données actuelles proviennent de différentes sources, c'est-à-dire des annuaires, des listes de la Naturstein Verband der Schweiz, des registres de commerce et elles ont été confrontées avec le nombre total d'entreprises actives dans ce secteur, présent dans le Recensement Fédéral des Entreprises de 2005.

Nous remercions la Naturstein Verband des Schweiz, dans la personne de son chef de bureau M. Jürg Depierraz, et l'Office Fédéral de Statistique, dans la personne de M. Kurt Wüthrich, pour les données fournies.

Sources:

Schwarz, H. 1983: *Die Steinbrueche in der Schweiz*, Zürich, Universität Zürich.

Kündig, R., éd. 1996: *Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz*, Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission.

Nr	Canton	Commune	Entreprise	Adresse entreprise	Pierre	Exploitation		
						1980-1981 1)	1993-1996 2)	2007-2009 3)
1	AG	Gansingen	Gebrüder Obrist	4349 Oberhofen	schlifsandstein	oui		à vérifier
2	AG	Othmarsingen-Dottikon	E. Fischer AG	5604 Hendschiken	grès coquilliers	oui		oui
3	AR	Teufen-Lochmüli	Teufener Sandsteinbruch lochmüli AG	9100 Herisau	grès de la Molasse	non	oui	oui
4	BE	Berne	Carlo Bernasconi AG	3027 Bern	grès de la Molasse	oui	oui	oui
5	BE	Blausee-Mitholz	SHB Naturstein	3714 Frutigen	Calcaire silicieux	non	oui	oui
6	BE	Ringgenberg	SRG Steinbrüche und Naturstein AG Ringgenberg-Goldswil	3805 Goldswil	calcaire	oui		oui
7	BL	Laufen	René Müller AG	4242 Laufen	calcaire	non	oui	oui
8	BL	Liesberg	Thomann AG Natursteine	4253 Liesberg	calcaire	non	oui	oui
9	FR	Cerniat	Steinbrüche Tatüren	1737 Plasselb	grès du Flysch	oui	oui	oui
10	FR	Villarlod	Carrière de Villarlod SA	1695 Le Glèbe	grès de la Molasse	non	oui	oui
11	FR	Massonnens	Genilloud Paul SA	1692 Massonnens	grès de la Molasse	oui	oui	oui
12	FR	Murist-La Molière	Romain Pillonel-Carrière de la Molière	1470 Estavayer-Le-Lac	grès coquilliers	oui	oui	oui
13	GR	Medel	Giger SA	7188 Sedrun	pierre ollaire	oui		oui
14	GR	Vals	A. Furger	7132 Vals	gneiss	oui	oui	à vérifier
15	GR	Vals	Truffer AG	7132 Vals	gneiss	oui	oui	oui
16	GR	Hinterrhein	Gebrüder Mainetti	7431 Splügen	gneiss	oui	oui	oui
17	GR	Hinterrhein	Graniti Conrad srl	I-23020 Piuro (SO)	gneiss	non	oui	oui
18	GR	San Bernardino	Toscano AG	7440 Andeer	gneiss			oui
19	GR	Andeer	A. Conrad AG	7440 Andeer	gneiss	oui	oui	oui
20	GR	Andeer	Toscano AG	7440 Andeer	gneiss	oui	oui	oui
21	GR	Arvigo	Alfredo Polti SA	6543 Arvigo	gneiss			oui
22	GR	Arvigo	Lino Polti e figli SA	6543 Arvigo	gneiss	oui	oui	oui
23	GR	Soglio	Sonja Schumacher	7610 Soglio	gneiss	oui	oui	à vérifier
24	GR	Promontogno	Scartazzini e Tognini	7649 Promontogno	gneiss	oui	oui	oui
25	GR	Promontogno	Graniti Conrad srl	I-23020 Piuro (SO)	gneiss	non	oui	oui
26	GR	Brusio	Paganini e figli	7748 Campascio	gneiss	oui	oui	à vérifier
27	GR	Poschiavo	Marmi e Serpentine SA	7742 Poschiavo	serpentine	oui	oui	oui
28	LU	Root	Emilio Stecher AG	6037 Root	grès de la Molasse	oui	oui	oui
29	NE	Neuchâtel-Valangin	S. Facchinetti SA	2009 Neuchâtel	calcaire	oui		oui

Nr	Canton	Commune	Entreprise	Adresse entreprise	Pierre	Exploitation		
						1980-1981 1)	1993-1996 2)	2007-2009 3)
30	OW	Alpnach	Guber Natursteine AG	6055 Alpnach-Dorf	grès du Flysch	oui	oui	oui
31	SG	Staad b. Rorschach	Bärlocher Steinbruch und Steinhauerei AG	9422 Staad b. Rorschach	grès de la Molasse	oui	oui	oui
32	SG	St. Margrethen	Gautschi AG	9430 St. Margrethen	grès de la Molasse	oui	oui	oui
33	SG	Ebnat-Kappel	R. Schmitt AG	9642 Ebnat-Kappel	grès de la Molasse	oui		à vérifier
34	SG	Mels	Anton Ackermann	8887 Mels	schiste	oui	oui	oui
35	SG	Eschenbach	Gebrüder Müller AG	8732 Neuhas	grès de la Molasse	oui	oui	oui
36	SG	Mels	Bossart Natursteinwerk AG	9230 Flawil	schiste	oui	oui	à vérifier
37	SZ	Bollingen	Steinbrüche Kuster AG	8807 Freienbach	grès de la Molasse		oui	oui
38	SZ	Nuolen	Steinbrüche Kuster AG	8807 Freienbach	grès de la Molasse	oui		oui
39	TI	Peccia	Cristallina SA	6695 Peccia	marbre	oui		oui
40	TI	Cevio	Bettazza graniti SA	6675 Cevio	gneiss	oui		oui
41	TI	Someo	Bionda e Co	6671 Riveo	gneiss	oui		à vérifier
42	TI	Someo	Fratelli Campagna SA	6671 Riveo	gneiss	oui		à vérifier
43	TI	Vergeletto	Figli fu R. Pollini SA	6671 Riveo	gneiss	oui		à vérifier
44	TI	Onsernone	Granito Onsernone Edgardo Pollini e figlio SA	6654 Cavigliano	gneiss	non		oui
45	TI	Brione Verzasca	Cavagna e Co	6598 Tenero	gneiss	oui		à vérifier
46	TI	Personico	M. Merelli SA	6526 Prosito	gneiss	oui		oui
47	TI	Iragna	Maurino SA	6710 Biasca	gneiss	oui		oui
48	TI	Iragna	SA Cave di Granito Ticinesi	6707 Iragna	gneiss	oui		oui
49	TI	Lodrino	Giannini Graniti SA	6527 Lodrino	gneiss	oui		oui
50	TI	Lodrino	Zenio Ambrosini	6527 Lodrino	gneiss	oui		oui
51	TI	Lodrino	Elio Sangiorgio	6527 Lodrino	gneiss	oui		oui
52	TI	Malvaglia	Granito Legiuna SA	6713 Malvaglia	gneiss à oilletts	oui		oui
53	TI	Cresciano	Ongaro & Co SA	6705 Cresciano	gneiss	oui		oui
54	TI	Cresciano	Nuova Antonini SA	6705 Cresciano	gneiss	oui		oui
55	TI	Creasciano	SA Cave di Granito Ticinesi	6707 Iragna	gneiss	oui		oui
56	TI	Someo	Figli fu R. Pollini SA	6671 Riveo	gneiss	oui		oui
57	TI	Someo	Fratelli Pozzi	6671 Riveo	gneiss	oui		à vérifier
58	TI	Brione Verzasca	Buzzini Armando SA	6634 Brione Verzasca	gneiss	oui		oui
59	TI	Iragna	Martinetti SA	6707 Iragna	gneiss	oui		oui

Nr	Canton	Commune	Entreprise	Adresse entreprise	Pierre	Exploitation		
						1980-1981 1)	1993-1996 2)	2007-2009 3)
60	VS	Salvan	Marin Fils	1920 Martigny	calcaire	oui	oui	oui
61	VS	Collonges	Marin Fils	1920 Martigny	brèche	oui	oui	oui
62	VS	St. Léonard	MTA Carrière de Sant-Léonard	1958 St. Léonard	quarzite	non	oui	oui
Sources:								
1) Schwarz, H. 1983: <i>Die Steinbrueche in der Schweiz</i> , Zürich, Universität Zürich.								
2) Kündig, R., éd. 1996: <i>Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz</i> , Zürich, Schweizerische Geotechnische Kommission.								
3) Sources variées: Annuaires téléphoniques, site NVS, moneyhouse.ch, swissfirms.com								

LOIS ET REGLEMENTS SUISSES CONCERNANT LA CARRIERE

La liste qui suit contient les lois et les règlements suisses qui concernent directement la carrière de pierre naturelle soit comme objet dans le paysage soit comme lieu de travail. Les textes de loi ont été organisés selon leur appartenance au droit fédéral ou cantonal.

Pour l'identification des différents textes de loi, nous avons utilisés le moteur de recherche "lexfind" (<http://www.lexfind.ch>) développé par l'Institut du Fédéralisme de l'Université de Fribourg.

Droit fédéral

CH	Accord relatif aux marchés publics		0.632.231.421
CH	Code civil suisse	CC	210
CH	Convention concernant le travail de nuit des enfants dans l'industrie		0.882.711.6
CH	Convention entre la Suisse et la France sur les rapports de voisinage et la surveillance des forêts limitrophes		0.631.256.934.99
CH	Convention no 14 concernant l'application du repos hebdomadaire dans les établissements industriels		0.882.712.4
CH	Liste de la Confédération suisse		0.632.211.2
CH	Loi fédérale complétant le code civil suisse (Livre cinquième: CO droit des obligations)		220
CH	Loi fédérale sur le travail dans l'industrie, l'artisanat et le commerce	LTr	822.11
CH	Ordonnance du DETEC concernant les listes pour les mouvements de déchets		
CH	Ordonnance du DFF sur les allègements fiscaux et l'intérêt de retard pour l'impôt sur les huiles minérales		641.612
CH	Ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement	OEIE	814.011
CH	Ordonnance sur l'imposition des huiles minérales	Oimpmin	641.611
CH	Ordonnance sur la protection des sites de reproduction de bactraciens d'importance nationale	OBat	451.34
CH	Ordonnance sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction	OTConst	823.311.141
CH	Ordonnance sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation	OTerm	910.91
CH	Ordonnance sur les substances explosibles	OExpl	941.411
CH	Verfassung des Kantons Uri		131.214

Droit cantonal

AG	Gesetz über Raumplanung, Umweltschutz und Bauwesen	BauG	713.100
AG	Verordnung über den Weinbau		915.712
AG	Verordnung über die Bewertung der Grundstücken		
AG	Vollziehungsverordnung zum Bundesgesetz über die Jagd und den Schutz wildlebender Säugertiere und Vögel sowie zum kantonalen Gesetz über Wildschutz, Vogelschutz und Jagd		
AI	Verordnung über die Natur- und Heimatschutz		
AR	Gesetz über die Einführung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches		
BE	Décret concernant la procédure d'octroi du permis de construire	DPC	725.1
BE	Loi sur les routes	LR	732.11
BE	Ordonnance cantonale sur la protection des eaux	OPE	821.1
BE	Ordonnance portant exécution de la loi fédérale du 8 mars 1960 sur les routes nationales		732.181
BE	Ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement	OCEIE	820.111
BE	Ordonnance sur les constructions	OC	721.1
BL	Raumplanungs- und Baugesetz	RBG	400
FR	Loi du 14 septembre 2007 sur l'impôt sur les successions et les donations	LISD	635.2.1
FR	Loi du 15 décembre 1967 sur les routes		741.1
FR	Loi du 1er mai 1996 sur les droits de mutations et les droits sur les gages immobiliers		635.1.1

FR	Loi du 22 mai 1974 d'application de la loi fédérale du 8 octobre 1971 sur la protection des eaux contre la pollution		812.1
FR	Loi du 22 novembre 1911 d'application du code civil suisse pour le canton de Fribourg		210.1
FR	Loi du 4 octobre 1850 sur l'exploitation des mines		931.1
FR	Loi du 9 mai 1983 sur l'aménagement du territoire et les constructions		710.1
FR	Ordonnance du 2 juillet 2002 sur les études d'impact sur l'environnement et les procédures décisives	OEIEP	810.15
FR	Ordonnance du 20 mai 2003 concernant les zones protégées pour les animaux sauvages		922.17
FR	Règlement du 18 décembre 1984 d'exécution de la loi du 9 mai 1983 sur l'aménagement du territoire et les constructions		710.11
FR	Tarif du 9 janvier 1968 des émoluments administratifs		126.21
GE	Règlement d'application de l'ordonnance fédérale relative à l'étude de l'impact sur l'environnement	ROEIE	
GL	Beschluss über die Durchführung der Umweltverträglichkeitsprüfung	UVP	
GL	Kantonale Natur- und Heimatschutzverordnung		
GL	Verordnung über die Bewertung der Grundstücke		
GR	Kantonale Umweltschutzverordnung	KUSV	820.110
GR	Kantonale Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung	KVUVP	820.150
GR	Verordnung über die amtlichen Schätzungen	SchV	850.110
GR	Verordnung über die Natur- und Heimatschutz		
JU	Décret d'organisation du Gouvernement et de l'administration cantonale		172.111
JU	Décret fixant les émoluments de l'administration cantonale		176.21
JU	Loi sur la construction et l'entretien des routes		722.11
JU	Ordonnance portant délégation de compétence au Chef du Service des ponts et chaussées en matière de police de construction des routes		722.112.1
JU	Ordonnance portant exécution de la loi fédérale du 8 mars 1960 sur les routes nationales		722.181
JU	Ordonnance sur la protection des eaux		814.21
LU	Gesetz betreffend das Berg-Regal		670
LU	Gesetz über den Natur- und Landschaftsschutz		709a
LU	Gesetz über die Volksschulbildung		
LU	Planungs- und Bauverordnung		
LU	Steuerverordnung		
LU	Umweltschutzverordnung		701
NE	Arrêté fixant le statut des réserves naturelles neuchâteloises de la faune et de la flore		
NE	Décret concernant la protection des sites naturels du canton		
NE	Loi sur l'extraction de matériaux	LEM	
NE	Loi sur les mines et les carrières		
NE	Loi sur les routes et voies publiques	LRVP	
NE	Règlement concernant l'utilisation et la surveillance des anciennes carrières en galeries du Val-de-Travers		
NE	Règlement d'application de la loi sur la protection des biens culturels		
NE	Règlement d'organisation du Département de la gestion du territoire		

NW	Gesetz betreffend die Einführung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches		
NW	Gesetz über den Bau und Verhalten der Strassen		622.1
NW	Gesetz über den Natur- und Landschaftsschutz		
NW	Vollzugsverordnung zum kantonalen Jagdgesetz	KJSV	
NW	Vollzugsverordnung zum kantonalen Umweltschutzgesetz (Anhang)		721.91A
OW	Gesetz betreffend die Einführung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches		
OW	Strassenverordnung		
OW	Verordnung zum Baugesetz		
SG	Einführungsgesetz zum Schweizerischen Zivilgesetzbuch		911.1
SG	Gesetz über die Raumplanung und das öffentliche Baurecht (Baugesetz)		731.1
SH	Gesetz über die Einführung des Schweizerischen Zivilgesetzbuches		210.100
SH	Verordnung über den Naturschutz		
SH	Verordnung zum Einführungsgesetz zum Umweltschutzgesetz	USGV	814.101
SO	Kantonale Bauverordnung		711.61
SO	Planungs- und Baugesetz		711.1
SO	Richtlinien über die Durchführung der Umweltverträglichkeitsprüfung		
SO	Verordnung über den Natur- und Heimatschutz		
SZ	Planungs- und Baugesetz		400.100
SZ	Verordnung betreffend den Natur- und Heimatschutz und die Erhaltung von Altertümern und Kunstdenkmälern		
SZ	Vollzugsverordnung zum kantonalen Verordnung zum Umweltgesetz	USG-VV	711.111
TG	Verordnung des Regierungsrates zur Umweltverträglichkeitsprüfung		
TI	Decreto legislativo concernente l'adozione degli Obiettivi pianificatori cantonali del Piano direttore		
TI	Legge organica patriziale		
TI	Regolamento di applicazione della legge edilizia	RLE	
TI	Regolamento per gli scavi o le estrazioni di materiali nell'ambito della protezione delle acque		
UR	Reglement über die Ausübung der Jagd		40.3121
UR	Reglement über die Umweltverträglichkeitsprüfung		
VD	Arrêté concernant la surveillance à exercer par l'Etat sur les mines et carrières	AMines	
VD	Arrêté d'application de la loi du 27 février 1963 concernant le droit de mutation sur les transferts immobiliers et l'impôts sur les successions	ALMSD	
VD	Code rural et foncier	CRF	
VD	Décret portant adoption du plan directeur cantonal des carrières	DPDCar	
VD	Décret portant sur l'adaptation du plan directeur sectoriel des carrières PDCar de 1991	DAPDCar	
VD	Loi concernant le droit de mutation sur les transferts immobiliers et l'impôt sur les successions et donations	LMSD	
VD	Loi sur les carrières	LCar	
VD	Loi sur les mines	LMines	
VD	Loi sur les routes	LRou	
VD	Règlement d'application de l'ordonnance fédérale relative à l'étude de l'impact sur l'environnement	RVOEIE	

VD	Règlement d'application de la loi du 10 décembre 1969 sur la protection de la nature, des monuments et des sites	RLPNMS	
VD	Règlement d'application de la loi du 24 mai 1988 sur les carrières	RLCar	
VD	Règlement d'application de la loi du 4 décembre 1985 sur l'aménagement du territoire et les constructions	RLATC	
VD	Règlement fixant les émoluments en matière administrative	RE-Adm	
VD	Règlement sur la police des eaux dépendant du domaine public	RLPDP	
VD	Règlement sur les mines	RLMines	
VD	Règlement sur les réserves de chasse et de protection de la faune du canton de Vaud	RRCh	
VS	Loi sur l'aménagement des cours d'eau		721.1
VS	Loi sur la protection de la nature, du paysage et des sites		451.1
VS	Loi sur le timbre		643.1
VS	Loi sur les constructions		705.1
VS	Loi sur les expropriations		710.1
VS	Loi sur les mines et les carrières		
VS	Loi sur les routes		725.1
VS	Ordonnance sur l'information géographique		211.605
VS	Ordonnance sur les constructions		705.100
VS	Règlement d'application de l'ordonnance fédérale relative à l'étude d'impact sur l'environnement		814.100
VS	Règlement d'exécution de la loi forestière		921.100
VS	Règlement d'exécution de la loi sur le timbre		643.100
ZH	Einführungsgesetz zum Schweizerischen Zivilgesetzbuch		
ZH	Einführungsverordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung		
ZH	Verordnung über die Anforderungen an die Verkehrssicherheit und die Sicherheit von Strassenkörpern		
ZH	Verordnung zum Schutze des Landschaftsbildes von Albispass		
ZH	Verordnung zum Schutze des Landschaftsbildes von Rheinflall		
ZH	Verordnung zum Schutze des Orts- und Landschaftsbildes von Regensberg		

TRACÉ D'UN LINTEAU EN PIERRE NATURELLE

Nous avons déterminé, à l'aide de la méthode graphique proposée par Jean-Marc Laurent pour le tracé d'un linteau en pierre naturelle monolithique [Laurent, J.-M. 2007], et à travers des relations géométriques simples, la formule mathématique exprimant son hauteur statique en fonction de la largeur de l'ouverture. Cette relation a été ensuite vérifiée pour les rapports modulaires les plus courants, c'est-à-dire 4:1:2; 6:1:3; 8:1:4 et 10:1:5. Ce dernier rapport ne satisfait pas la relation établie plus haut, et il est donc impossible de l'utiliser pour réaliser des linteaux.

Source:

Laurent, J.-M. 2007: *Construction et restauration des bâtiments en pierre. Histoire, technique, pratique*, s.l., Editions Vial, p.45.

Vérifications de la règle pour différents rapports modulaires

A. Rapport modulaire 1:2:4

$$\overline{AD} = 2 \cdot \overline{DE}$$

$$\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD} = 2 \overline{DE} \quad \overline{AB} + \overline{CD} = \overline{DE}$$

$$\overline{BC} = \overline{DE}$$

$$\overline{DE} \geq \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \overline{BC}$$

$$\overline{BC} \geq \frac{6 \sqrt{3}}{6} \cdot \overline{BC} \quad \text{vrai}$$

B. Rapport modulaire 1:3:6

$$\overline{AD} = 3 \overline{DE}$$

$$\overline{BC} = 2 \overline{DE}$$

$$\overline{DE} \geq \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \overline{BC}$$

$$\frac{1}{2} \overline{BC} \geq \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \overline{BC}$$

$$\overline{BC} \geq \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \overline{BC} \quad \text{vrai}$$

C. Rapport modulaire 1:4:8

$$\overline{AD} = 4 \overline{DE}$$

$$\overline{BC} = 3 \overline{DE}$$

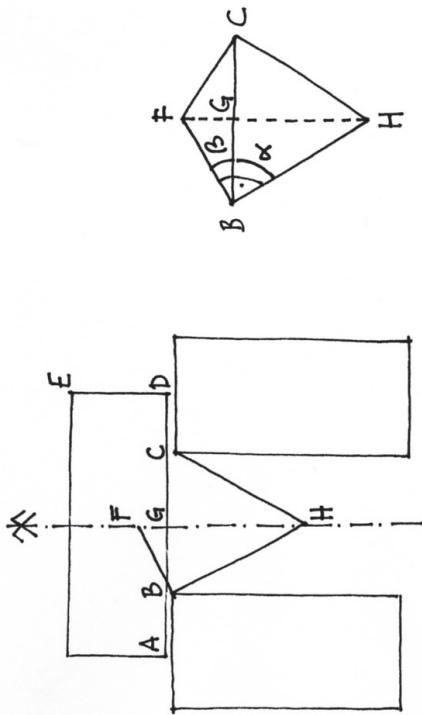
$$\frac{1}{3} \overline{BC} \geq \frac{\sqrt{3}}{6} \overline{BC}$$

$$\overline{BC} \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \overline{BC} \quad \text{vrai}$$

D. Rapport modulaire 1:5:10

$$\frac{1}{4} \overline{BC} \geq \frac{\sqrt{3}}{6} \overline{BC}$$

$$\overline{BC} \geq \frac{4 \sqrt{3}}{3} \overline{BC} \quad \text{non!}$$



1. BCH est un triangle équilatéral
 $\Rightarrow \alpha = 60^\circ \Rightarrow \beta = 30^\circ - 60^\circ = 30^\circ$

2. \overline{GF} est la hauteur statique du linteau \overline{BC} ,
 qui dépend de la largeur de l'ouverture \overline{BC} .

$$\overline{GF} = \tan \alpha \cdot \overline{BG}$$

$$\overline{GF} = \tan 30^\circ \cdot \frac{1}{2} \overline{BC}$$

$$\overline{GF} = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \overline{BC} \approx 0,29 \cdot \overline{BC}$$

COMPORTEMENT PARASISMIQUE DES MAÇONNERIES EN PIERRE

Le comportement parasismique des maçonneries en pierre naturelle de taille a été étudié grâce à la collaboration avec le *Laboratoire d'Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction (IMAC)* de l'Institut d'Ingénierie Civile, de la Faculté Enac de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, à travers différents travaux d'étudiants d'Ingénierie Civile, sous la direction du Dr. Pierino Lestuzzi. Cette expérience didactique et de recherche a permis, en 2010, de réaliser un projet de Master en Ingénierie Civile basé sur un essai expérimental du comportement d'une maçonnerie non armée en pierre naturelle soumise à des charges statiques cycliques. Réalisé par El Mehdi Khaldoun, sous la direction du Dr. Pierino Lestuzzi, ce projet a reçu le Prix SGEB 2010 (*Société suisse du génie parasismique et de la dynamique des structures*).

Le rapport d'essai de ce travail est publié dans les pages qui suivent.

Nous remercions le Dr. Pierino Lestuzzi pour l'enthousiasme, la compétence et la contribution à la réussite de notre thèse, ainsi que tout le personnel du Laboratoire IMAC et des halles d'essais de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, en particulier dans les personnes de Sylvain Demierre et Gérald Rouge.

Nous remercions également les étudiants qui, à travers leurs travaux, ont fait avancer notre recherche et les connaissances autour du comportement parasismique des maçonneries en pierre naturelle: Raphaël Dauphin; Béla Lamoth; Christophe Berger et El Mehdi Khaldoun.

Mme la Professeure Katrin Beyer pour les discussions que nous avons eu lors des essais de 2010.

Olivier Fawer, tailleur de pierre et expert de l'*Association Romande des Métiers de la Pierre (ARMP)*, pour avoir rendu possible la réalisation de la maçonnerie utilisée lors du travaux de Master 2010 à travers son savoir-faire et sa participation active à la phase de planification.

L'entreprise Ongaro & Co SA, de Cresciano, qui a fourni les éléments en gneiss pour la construction de la maçonnerie testée.



Détermination du comportement sismique des maçonneries en pierres naturelles par essais expérimentaux

Essai statique-cyclique

Projet de master 2010

Rapport de synthèse



El Mehdi KHALDOUN

Encadrant : Dr. Pierino LESTUZZI

Architecte : Arch. EPF Stefano ZERBI

Assistant : Marcelo OROPEZA

Table des matières

Résumé	4
Introduction	4
Matériaux	4
Pierre naturelle	4
Mortier	5
Calles	5
Construction du mur	5
Description de l'essai statique cyclique	6
Échantillon de l'essai	6
Bâti de charge	6
Equipements de mesure	6
Capteurs nécessaires	6
Programme de l'essai	7
Déroulement de l'essai	7
Résultats de l'essai statique - cyclique	7
Essais de compression	8
Description	8
Résultats de l'essai de compression	8
Essai de cisaillement	8
Installation et instrumentation de l'essai	8
Modes de rupture	9
Résultats	9
Résistance latéral du refend : Modèles simplifiés	10
SIA 266	10
FEMA	11
EC	11
Comparaison des résultats	12
Conclusion	12
Références	12

Liste des figures

Figure 1 : Calles.	5
Figure 2 : Construction du mur .	5
Figure 3 : Echantillon de l'essai.	6
Figure 4 : Bâti de charge en élévation.	6
Figure 5 : Plan des capteurs inductifs et cibles pour déformètre.	6
Figure 6 : Etapes de chargement du mur.	7
Figure 7 : Rupture en balancement pour un drift = 7.5 %.	7
Figure 8 : Courbes hystérétiques (Capteur 4).	7
Figure 9 : Rupture du muret 1 en compression.	8
Figure 10 : Dispositif de l'essai (Gneiss).	8
Figure 11 : Schéma du dispositif de l'essai.	8
Figure 12 : Rupture en cisaillement du premier muret en gneiss.	9
Figure 13 : Rupture en cisaillement du premier muret en molasse.	9
Figure 14 : a) et b) Contraintes de cisaillement et normales en fonction du temps (gneiss).	9
Figure 15 : Valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction des contraintes normales pour les murets en gneiss.	9
Figure 16 : a) et b) Contraintes de cisaillement et normales en fonction du temps (molasse).	10
Figure 17 : Valeurs maximales et valeurs résiduelles des contraintes de cisaillement en fonction des contraintes normales pour les murets en molasse.	10
Figure 18 : Résistance latérale d'un voile [4].	10

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du gneiss.	4
Tableau 2 : Résultats de l'essai en compression.	8
Tableau 3 : Valeur pour le calcul de la résistance latérale avec la SIA 266.	11
Tableau 4 : Valeur de calcul pour la méthode FEMA.	11
Tableau 5 : Résistances obtenues pour N= 300 [kN] (0.38 [MPa]) et N= 480 [kN](0.60 [MPa]).	12
Tableau 6 : Résistance latérale au glissement.	12

Résumé

La maçonnerie en pierres est le plus vieux matériau de construction ayant résisté jusqu'à nos jours. Ce type de maçonnerie est essentiellement retrouvé dans les anciennes constructions, mais on pourrait se demander si on ne pourrait pas construire en pierres naturelles actuellement. En général, les murs en pierres sont considérés comme éléments structuraux capables de reprendre les efforts de compression. Cependant, ils peuvent aussi reprendre des efforts latéraux dans le plan dû au vent et aux séismes. Dans ce sens, très peu d'études ont été menées pour déterminer le comportement sismique dans le plan sous chargement statique cyclique. Pendant ce travail, on a testé uniquement un seul mur avec un arrangement de pierres simple. Les résultats ont montré que le mur se rompt uniquement en balancement sans rupture interne. Toutefois, on peut noter que ce mur se comporte mieux qu'un mur en maçonnerie traditionnelle en briques. D'un autre côté, pour évaluer la cohésion et le coefficient de frottement de ce type de pierres, on a effectué des essais en cisaillement qui présentent une incertitude quant aux résultats obtenus. Ces résultats ont montré que ce type de pierre en gneiss présente une cohésion importante. Finalement, ces essais ont expliqué les valeurs de résistance latérales en cisaillements obtenus avec les méthodes simplifiées qui sont plus faibles que les valeurs expérimentales.

Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de master supervisé par le Dr Pierino Lestuzzi et en collaboration avec Mr Stefano Zerbi doctorant à l'EPFL. Ce dernier s'intéresse au comportement de nouvelles constructions en pierres naturelles. Le but de ce projet de master est de déterminer la résistance au cisaillement de certains types de maçonneries en pierre naturelle composées d'éléments de roches en gneiss et de mortier. Il s'agira en effet de tester un mur de dimensions réelles au cisaillement et quelques échantillons (petits murets) de maçonneries en compression.

Les murs en maçonnerie de pierre naturelle jouent un rôle important dans la reprise des efforts sismiques» quand ils sont les seuls éléments capables de reprendre les actions sismiques horizontales. Dans ce sens, ce travail permettra non seulement de comprendre le comportement des murs en maçonnerie en pierres naturelles mais aussi de conduire à un meilleur dimensionnement des nouvelles structures en maçonnerie en pierres.

Par ailleurs, la maçonnerie est un matériau dont le comportement structurel et les caractéristiques mécaniques sont moins connus que le béton armé ou le métal. D'autant plus que la maçonnerie en pierre naturelle n'est presque plus utilisée pour la construction et donc très peu d'études y ont été consacrées. Pour déterminer la réponse sismique il faut connaître la résistance au cisaillement de la maçonnerie. Une fois que les dimensions et l'effort normal du mur sont connus, la résistance à la flexion est facilement déterminée. Le mécanisme de rupture par cisaillement est ainsi plus intéressant que le mode de rupture en glissement ou en flexion. Ainsi, les dimensions et l'effort normal agissant sur le mur ont été choisis à cet égard. Ce qui nous intéresse lors de cet essai est de déterminer la capacité de déformation lors d'une rupture en cisaillement. Cette dernière est définie par une inclinaison ($\delta = \Delta/h_w$).

Dans ce sens, le mur a été testé avec un chargement statique-cyclique. Dans un premier temps, on a réalisé les essais sur le mur afin d'obtenir la capacité de déformation du mur (ductilité), sa résistance au cisaillement et sa courbe hystérétique. Ensuite, on a fait une évaluation de la performance sismique de mur en ce basant sur sa capacité de déformation et sa dissipation d'énergie. Finalement, on a utilisé des modèles simplifiés pour estimer la résistance latérale du mur et la comparer avec la valeur expérimentale obtenue.

D'un autre côté, on a effectué des essais en compression et en cisaillement pour déterminer les caractéristiques mécaniques du gneiss. Pour faire une comparaison avec un autre type de pierre on a fait des essais en cisaillement sur des éléments en molasse.

Matériaux

Pierre naturelle



Il s'agit d'un **gneiss** prélevé au Tessin.

Dans le tableau 1, on peut voir des valeurs indicatives des caractéristiques mécaniques de la roche. Pour déterminer les valeurs réelles un essai en compression est nécessaire.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques du gneiss.

f_{sk}	32.5	[MPa]	valeur caractéristique de la résistance à la compression de la maçonnerie \perp à l'assise
f_{sd}	13	[MPa]	valeur de calcul de la résistance à la compression de la maçonnerie \perp à l'assise
γ	2650	[kg/m ³]	Poids volumique

Le gneiss étant une roche stratifiée, la résistance à la compression est plus importante parallèlement au lit que perpendiculairement.

Pour la construction du mur on a utilisé huit blocs d'une dimension de 80*40*40 cm et de quatre blocs d'une dimension de 40*40*40 cm. Pour les essais en compression on a utilisé des échantillons plus petit d'une dimension de 30*15*15 cm.

Mortier

Pour une meilleure répartition des contraintes dans le mortier, il doit être plus déformable que la pierre. Le gneiss étant une roche très dure, le mortier le plus adapté à cette roche serait un mortier à chaux. Cependant, l'utilisation d'un tel mortier est très peu commune en pratique d'où le choix d'utiliser un mortier bâtard.

La composition standard du mortier bâtard est déterminée selon la norme SIA 178.

Pour la construction du mur on a utilisé les proportions suivantes : 3 proportions de sable pour une de liant, ce dernier est composé de 2 proportions de ciment et une de chaux hydraulique.

Pour les joints horizontaux, on a utilisé un sable avec une granulométrie de 0-3mm, tandis que pour les joints verticaux on a utilisé un sable plus fin ayant une granulométrie de 0-1.5 mm.

Pour évaluer la résistance du mortier on aurait dû préparer de petits échantillons rectangulaires normalisés. Par manque de ces éléments on se contentera de valeurs trouvées dans la littérature et la norme SIA.

Calles



Figure 1 : Calles.

Entre chaque bloc de pierre, il est d'usage d'utiliser des calles soit en plastiques, soit en bois comme on peut voir sur la figure 1. Les calles en plastiques sont plus dures et lisses, contrairement aux calles en bois qui sont plus déformables et plus rugueuses. Ces dernières permettent d'avoir une adhérence plus grande avec le mortier et la pierre. Pour cet essai, on n'a pas utilisé de calles pour faciliter la mise en place des blocs. Cependant, pour déterminer le comportement réel de ces calles, on va utiliser ces deux types lors des essais en compression.

Construction du mur

La construction du mur a été effectuée par Mr Olivier Fawer tailleur de pierre à Lausanne. Le montage du mur a été réalisé au laboratoire du 8 au 11 mars 2010 avec un rythme d'une assise par jour. Chaque assise a été montée selon les règles de l'art. D'autre part, pour éviter d'abîmer le sol du laboratoire, on a décidé de construire le mur sur un socle en béton armé préfabriqué de 20 cm d'épaisseur.

La première assise du mur a été fixée sur la dalle de support par une résine époxy (Sikadur 31) pour éviter le glissement du mur à ce niveau. Pour sa mise en place, on a utilisé des calles en plastiques. Ces calles sont utilisées uniquement à ce niveau. Lors de l'essai, on a observé un soulèvement du mur à ce niveau, cela est dû au manque d'adhérence entre la dalle et la résine époxy, il aurait été préférable de piquer la dalle de support pour rendre sa surface plus rugueuse. Après avoir mis en place la première assise, on a rempli les joints verticaux avec du mortier avec une épaisseur des joints de mortier variant entre 2 et 3 cm. En outre, pour conserver une certaine humidité autour des joints, on a accroché des linges mouillés autour des joints et on a recouvert le mur d'une bâche.

Enfin, on a mis en place la dalle du dessus le 1^{er} avril 2010 qui a été collé au mur avec la même résine époxy que la dalle de support. Après la construction du mur, on a monté à côté des murets pour les essais en compression. La surface de contact a été lissée par une fine couche de Sikadur pour permettre une meilleure répartition de la charge. Étant donné que le mortier nécessite une durée d'environ 5 semaines avant la mise en charge, l'essai sur le mur a commencé le 3 mai 2010. D'autre part, les essais en compression ont été effectués le 17 mai 2010.

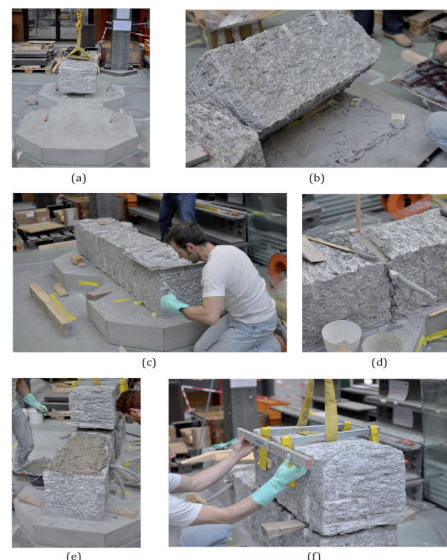


Figure 2 : Construction du mur.

Description de l'essai statique cyclique

Échantillon de l'essai

Le but de cet essai est de simuler les forces réelles agissantes sur un mur qui ont été d'une part appliquées sur la dalle pour simuler les actions sismiques et d'autre part appliquées par la précontrainte pour simuler l'effort normal.

Cet échantillon est composé de :

- Un mur en pierre de taille en gneiss,
- Une dalle en béton armé,
- Un socle en béton armé.

La forme de l'échantillon a été choisie afin d'obtenir un mécanisme de rupture au cisaillement. Pour l'obtention de ce mode de rupture, il faut que le mur ait une forme trapue (plus large que haute). Cependant, avec des roches comme le gneiss, on peut s'attendre à une rupture par glissement. Les briques seront disposées comme on peut voir sur la figure 3.

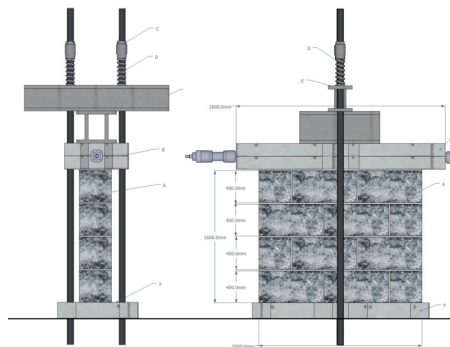


Figure 3 : Echantillon de l'essai.

Bâti de charge

Le bâti de charge est composé de :

- L'échantillon,
- L'ossature,
- Les barres de précontrainte,
- L'équipement de mesure (capteurs de déplacement, vérins ...).

L'ossature est composée de quatre poutres HEB 360 de chaque côté qui sont précontraintes au sol du laboratoire. Ces éléments sont stabilisés par dix profilés (deux C 560/6000 et huit C 320/1660). Chaque boulon a été précontraint. Les vérins hydrauliques sont appuyés sur deux profilés (C 320/2060 et C 320 1660).

Les barres de précontrainte de 36 [mm] de diamètre permettent d'appliquer l'effort normal appliqué sur le mur mais aussi d'obtenir la rupture en cisaillement recherchée. Ces barres sont ancrées dans le sol du

laboratoire (dalle de 800mm en béton armé). Avant d'effectuer l'essai statique cyclique, ces barres seront chargées avec un incrément de 10 [kN] jusqu'à l'obtention de l'effort normal souhaité. Cette force est introduite en utilisant un vérin hydraulique avec une pompe à main. En outre, on doit utiliser des ressorts entre le profilé métallique et les ancrages pour éviter les incréments dus à l'élongation de la barre.

Afin de répartir l'action de la précontrainte sur le mur, on a disposé de deux dalles en béton armée ((largeur 0.8m, longueur de 2.6m, épaisseur 0.16m) et un profilé métallique sur le mur.

Pour appliquer les forces latérales de façon cycliques, on utilisera des vérins de par et d'autre de la dalle. Ce chargement quasi-statique est introduit manuellement à l'aide de vérins et une pompe à main.

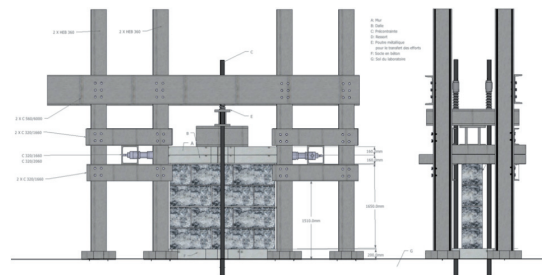


Figure 4 : Bâti de charge en élévation.

Equipements de mesure

Capteurs nécessaires

Pour mesurer les déplacements au niveau vertical, horizontal et diagonal du mur, on a besoin de 18 capteurs de déplacement inductifs (figure 5). Dans le lit des joints, les déformations verticales et horizontales ont été mesurées à l'aide de capteur de déformations et ensuite mesurées au déformètre. Les forces appliquées sur le mur ont été calculées par les capteurs de forces.

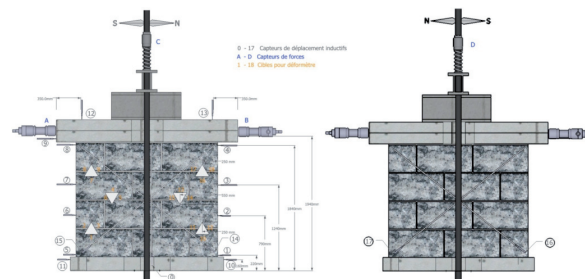


Figure 5 : Plan des capteurs inductifs et cibles pour déformètre.

Programme de l'essai

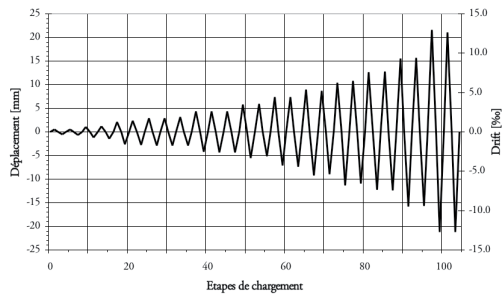


Figure 6 : Etapes de chargement du mur.

Lors d'un essai statiques-cycliques les sollicitations sismiques sont simulées par des mouvements très lents et de va-et-vient avec une amplitude fixée et progressive. Un chargement cyclique est appliqué par des vérins sous forme de forces ou de déplacements imposés.

Dans un premier temps on a chargé le mur en force imposée jusqu'à l'obtention du déplacement élastique. Pour chaque étape de chargement cela représente 2 cycles de chargement. Secondement, on n'est passé à un chargement en déplacements imposés pour lequel on a effectué 3 cycles pour chaque étape de chargement au début et ensuite on est passé à 2 cycles (figure 6).

Déroulement de l'essai

Au début de l'essai, on a appliqué un effort normal de 0.40 [MPa]. Après avoir effectué les cycles en force imposées, on a choisi un déplacement élastique de 1.4 [mm] qui représentait par la suite le pas de chargement. Les étapes suivantes de chargement ont révélé une rupture par basculement sans aucun dommage interne du mur (figure 7).

Pendant tout l'essai ont rencontré plusieurs problèmes qui gênaient l'avancement de l'essai. Le mur étant plus résistant en cisaillement, la capacité des vérins n'était plus suffisante. Pour aller plus dans l'essai, on était obligé d'augmenter la capacité des vérins. La solution adoptée est la mise en place des vérins en parallèle. Avec cette solution, on était obligé de changer la position des vérins pour l'application de la force de chaque côté.

Après plusieurs cycles de chargement, le mode de rupture dominant était le basculement, on a décidé d'augmenter l'effort normal à 0.60 [MPa] pour obtenir une rupture en cisaillement. Après l'application de l'effort de précontrainte, les ressorts se sont complètement comprimés. On a dû les changer avec des ressorts plus rigides pour garder cet effort constant pendant le chargement.

Par ailleurs, on a rencontré un autre problème lors du chargement : la dalle de dessus touchait la traverse

supportant les vérins. Pour éviter cela on a remonté cette traverse de 8 [cm] vers le haut. En outre, le mur tournait sur sa base et du coup il a touché une colonne. Pour éviter cet obstacle, on a enlevé la précontrainte et puis on a replacé le mur à sa place. Finalement, on s'est arrêté à un drift égal à 12.5 ‰ car la conception du bâti ne permettait plus d'avancer plus loin.

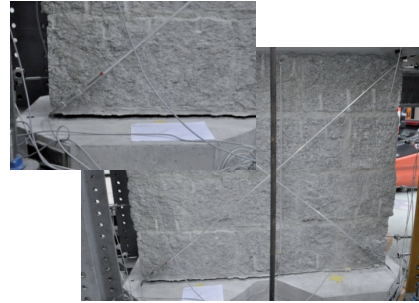


Figure 7 : Rupture en basculement pour un drift = 7.5 ‰.

Résultats de l'essai statique - cyclique

L'objectif principal de l'essai était d'étudier le comportement en cisaillement de maçonnerie en pierre en gneiss. Cependant, il s'est avéré que le mode de rupture dominant lors de l'essai est le basculement.

La performance sismique du mur est déterminée à travers les courbes hystérétiques qui représentent l'évolution de la force latérale appliquée sur le mur en fonction des déformations qu'il subit. Ces courbes représentent également l'énergie dissipée par le mur. Ci-dessous les courbes hystérétiques (figure 8) complètes correspondant au capteur disposé en haut du mur (capteur 4).

Le mécanisme de rupture étant le basculement, on a très peu d'énergie dissipée. On peut voir aussi sur les courbes qu'on est sur la phase élastique non linéaire. Aucun dommage autre que le décollement de la base n'est à signaler sur le mur. On pourrait donc réutiliser le mur pour réaliser un autre essai avec une autre conception favorisant la rupture par cisaillement.

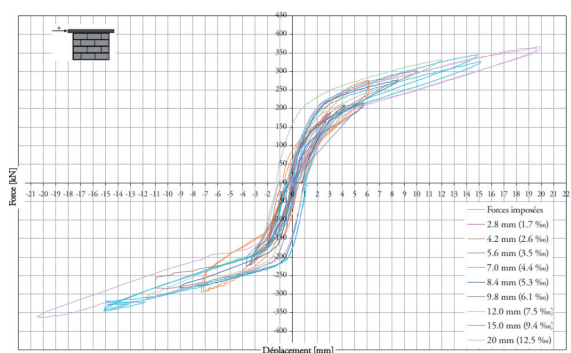


Figure 8 : Courbes hystérétiques (Capteur 4).

Essais de compression

Description

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de la maçonnerie on a effectué des essais en compression. Pour cet essai, on a construit en même temps que le mur trois petits murets ayant les mêmes caractéristiques en l'occurrence avec le même mortier et sans calles. En outre, pour évaluer l'effet du mortier et des calles on a testé trois autres échantillons. Le premier avec le même mortier et des calles différentes, le second avec les mêmes calles et un mortier différent et enfin le dernier avec des calles et un mortier différents. Le mortier utilisé a une granulométrie similaire à celle des joints verticaux à savoir 0-1.5 mm, en réalité il fallait utiliser le même mortier que les joints horizontaux. Finalement, on a testé quatre murets à la compression. Les deux autres murets seront testés au cisaillement.

Résultats de l'essai de compression

La machine d'essai est guidée en déplacement imposé. La vitesse adoptée est de 0.4 mm/min. Avec cette vitesse, la résistance est obtenue après environ 15 à 20 [min] de chargement.



Figure 9 : Rupture du muret 1 en compression.

Comme on peut voir sur la figure 9 la rupture se passe essentiellement dans la roche et de manière aléatoire. En effet, le mortier bâtard étant souple il se déforme sans se rompre.

Les résistances des 4 murets testés sont présentées au tableau 3. La valeur moyenne de la résistance en compression de la maçonnerie des quatre murets testés est de 32.9 [MPa].

Tableau 2 : Résultats de l'essai en compression.

	Muret 1	Muret 4	Muret 5	Muret 6
Temps de chargement [min]	14.7	11.4	18.2	22.3
Résistance à la compression [MPa]	39.4	34.0	25.8	32.2

Essai de cisaillement

Afin de déterminer la résistance au cisaillement du mortier des joints on a testé 2 murets (similaires à ceux testés en compression) en se référant à l'EN 1052-3. Selon l'Eurocode, il faudrait 12 échantillons pour effectuer cet essai mais avec 2 échantillons, on peut espérer obtenir le critère de Mohr-Coulomb. Les deux murets testés ont été construits juste après la construction du grand mur le 11 mars 2010. Le mortier utilisé est le même que le muret 1 et la dimension des joints varie entre 2 et 3 cm.

En plus de cela, on a testé 2 murets en molasse. Ils ont été construits avec un mortier à la chaux. Leurs dimensions (12 X 17 X 30 cm) sont différentes des murets en gneiss (15 X 15 X 30 cm) avec une épaisseur des joints de 2 cm. Ces deux échantillons nous permettront de faire une comparaison avec les éléments en gneiss.

Installation et instrumentation de l'essai

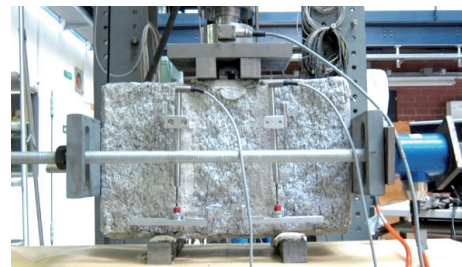


Figure 10 : Dispositif de l'essai (Gneiss).

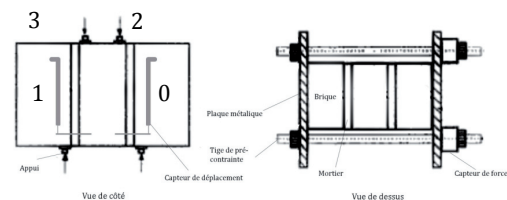


Figure 11 : Schéma du dispositif de l'essai.

Le test a été effectué sur une machine standard Walter & Bai d'une capacité de ± 300 [kN]. Sur sa base, l'échantillon est appuyé de façon ponctuelle avec des plaques en acier d'une section carrée de 4 [cm] ayant une longueur de 15 [cm] (la même dimension que les briques). Au-dessus de l'échantillon, les charges sont introduites par l'intermédiaire de mêmes plaques (figure 10). La force de cisaillements est mesurée par un capteur de force placé entre le vérin et une plaque s'appuyant sur les deux plaques en acier. L'effort de la précontrainte, quant à lui, est mesuré par deux capteurs de forces disposés sur les tiges. Finalement,

le déplacement au niveau des joints est mesuré par deux capteurs de déplacement de chaque côté du muret.

Pour obtenir deux valeurs différentes de résistance au cisaillement, on a appliqué deux contraintes différentes de 0.4 [MPa] et 0.6 [MPa]. Cette précontrainte a été introduite par la main en serrant simplement les écrous de chaque côté des barres.

Modes de rupture

- Échantillon en gneiss :

Le premier échantillon testé s'est rompu uniquement d'un seul côté (figure 12). On a observé une forte augmentation de la précontrainte juste avant la rupture, on est passé de 0.4 [MPa] à 0.6 [MPa] avec un très faible déplacement. Sur le deuxième échantillon, on n'a observé aucune rupture.



Figure 12 : Rupture en cisaillement du premier muret en gneiss.

- Échantillon en molasse :

En ce qui concerne les murets en molasse, on a observé tout d'abord une rupture dans un seul joint. Ensuite, le second joint a rompu et la brique du milieu à continuer à glisser le long des joints par simple frottement (figure 13).

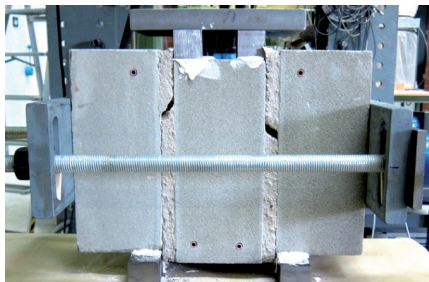


Figure 13 : Rupture en cisaillement du premier muret en molasse.

Résultats

La contrainte de cisaillement a été calculée en divisant la force appliquée par le vérin par deux fois la surface le long des joints.

- Gneiss

Sur le premier échantillon, on observe une faible chute de la force de cisaillements après la rupture. Ensuite, elle augmente pour arriver à un palier sans que la valeur de la force ne chute ou augmente (figure 14). Ceci peut être dû à un disfonctionnement de la machine d'essai. Dans ce cas, les résultats présentés ci-dessous sont incertains mais ils nous permettent d'avoir une idée sur le comportement du matériau. On peut penser aussi que ce genre d'essai ne semble pas adapté pour le gneiss.

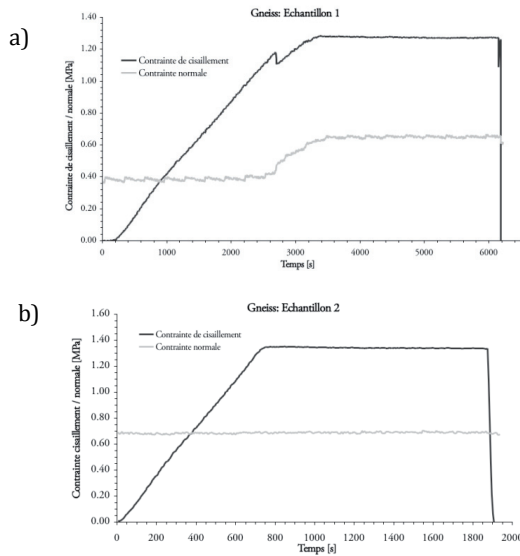


Figure 14 : a) et b) Contraintes de cisaillement et normales en fonction du temps (gneiss).

À partir de ces résultats, on a déterminé la loi de Mohr-Coulomb qui nous donne l'angle de frottement et la cohésion. Les valeurs obtenues nous procurent uniquement les contraintes maximales. Pour le premier échantillon, la valeur considérée est celle obtenue juste avant la rupture. Pour le deuxième échantillon, vu qu'on a pas eu de rupture on considèrera la valeur du palier comme valeur maximale.

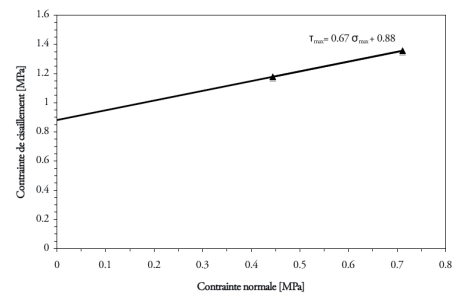


Figure 15 : Valeurs maximales des contraintes de cisaillement en fonction des contraintes normales pour les murets en gneiss.

On obtient donc la loi de Mohr-Coulomb suivante (figure 15) : $\tau_{s \max} = 0.67 \sigma + 0.88$.

La valeur du coefficient de frottement ($\tan(\rho) = 0.67$) semble s'approcher de valeurs usuelles (0.60 – 0.70). La valeur de la cohésion obtenue reste très élevée (0.88 [MPa]).

• **Molasse**

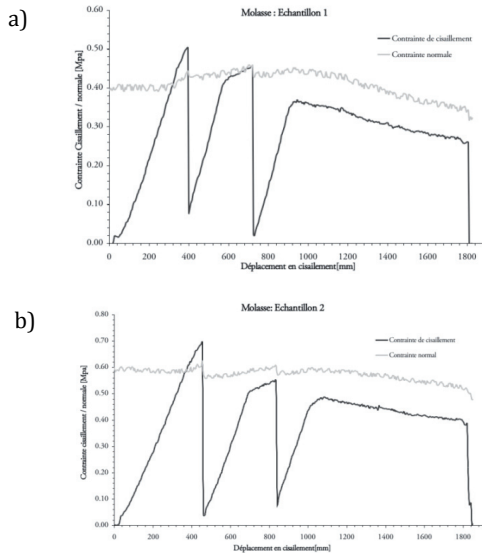


Figure 16 : a) et b) Contraintes de cisailment et normales en fonction du temps (molasse).

Les deux chutes de la force appliquée (figure 16 a et b) sur le muret s'explique par la rupture de chaque joint. L'effort de la précontrainte ne varie quasiment pas pendant l'essai.

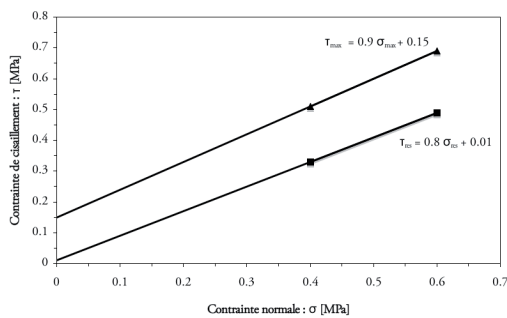


Figure 17 : Valeurs maximales et valeurs résiduelles des contraintes de cisailment en fonction des contraintes normales pour les murets en molasse.

On obtient donc les lois de Mohr-Coulomb suivante (figure 17) pour:

- Les valeurs maximales : $\tau_{s \max} = 0.90 \sigma + 0.15$
- Les valeurs résiduelles : $\tau_{s \text{ res}} = 0.80 \sigma + 0.01$

Les coefficients de frottements obtenus pour les valeurs maximales et les valeurs résiduelles sont

presque égales. Par contre la cohésion pour les deux cas peut être considéré comme négligeable.

Sur les murets en gneiss, on observe un comportement d'ensemble : les joints sont solidaires avec les pierres contrairement au murets en molasse.

Les résultats concernant les essais en cisailment sur les murets gneiss sont incertains. Toutefois, cet essai en cisailment nous a permis de mieux comprendre le comportement du mur testé lors de l'essai statique cyclique. Sur l'essai statique cyclique, on n'a obtenu aucun dommage au niveau des joints ce qui explique cette cohésion très élevée qui conduit à une résistance en cisailment très élevé.

Résistance latéral du refend : Modèles simplifiés

Pour calculer la résistance on considérera les normes suisses SIA 266, la FEMA ainsi que l'EC6 et l'EC8. Ces méthodes de calcul sont très conservatrices, vu qu'il s'agit d'un essai expérimental les valeurs de la résistance peuvent changer considérablement. Lors de l'essai on a appliqué deux efforts normaux différents ($N = 300$ [kN] et $N = 480$ [kN]). Pour le calcul de la résistance latérale on utilisera donc ces deux valeurs.

SIA 266

La norme suisse permet la détermination de la résistance latérale dans le cas du cisailment combiné avec un effort normal. Il s'agit de faire une superposition d'un champ de contraintes oblique et d'un champ de contraintes verticaux pour maximiser l'effort tranchant V_{Rd} (figure 18). Il faut satisfaire les conditions d'équilibre, les résistances et les conditions géométriques (équation 1 à 8).

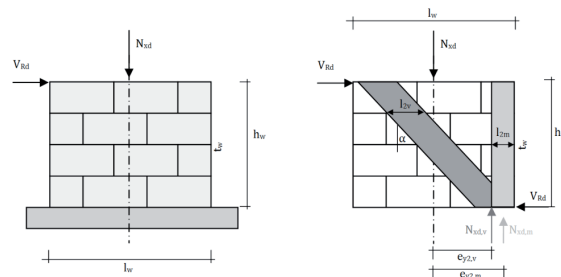


Figure 18 : Résistance latérale d'un voile [4].

Équilibre

$$N_{xd,m} = N_{xd} - N_{xd,v} \quad [1]$$

$$N_{xd,v} \cdot e_{y2,v} + N_{xd,m} \cdot e_{y2,m} = V_{Rd} \cdot h_w \quad [2]$$

$$V_{Rd} = N_{xd,v} \cdot \tan \alpha \quad [3]$$

Résistance

$$N_{xd,v} \leq f_{yd} \cdot l_{2v} \cdot t_w \cdot \cos^2 \alpha \quad [4]$$

$$N_{xd,m} \leq (f_{xd} - f_{yd}) \cdot l_{2m} \cdot t_w \quad [5]$$

$$\tan \alpha \leq \mu_d \quad [6]$$

Géométrie

$$l_{2v} = l_w - 2 \cdot$$

$$e_{y2,v} \quad [7]$$

$$l_{2m} = l_w - 2 \cdot e_{y2,m} \quad [8]$$

Tableau 3 : Valeur pour le calcul de la résistance latérale avec la SIA 266.

γ	26.5	[kN/m ³]	Poids volumique
N	34	[kN]	Poids de l'échantillon
f_{yk}	32.9	[MPa]	Valeur caractéristique de la résistance à la compression de la maçonnerie ⊥ à l'assise
f_{xd}	13.2	[MPa]	Valeur de calcul de la résistance à la compression de la maçonnerie ⊥ à l'assise
f_{yd}	6.5	[MPa]	Valeur de calcul de la résistance à la compression de la maçonnerie ⊥ au joint verticaux $f_{yd} = 0.3 \cdot f_{xd}$
μ_d	0.6		Valeur de calcul du coefficient de frottement interne dans les joints d'assise
h_w	1600	[mm]	Hauteur du mur
l_w	2000	[mm]	Longueur du mur
t_w	400	[mm]	Épaisseur du mur

FEMA

La FEMA (Federal Emergency Management Agency) propose deux formules simplifiées pour le balancement et le cisaillement qui dépendent de la géométrie de l'élément et des charges qui lui sont appliquées.

Tableau 4 : Valeur de calcul pour la méthode FEMA.

v_d	0.27	[MPa]	valeur de calcul de la résistance au cisaillement de la maçonnerie
v_{mk}	0.3	[MPa]	valeur caractéristique de la résistance au cisaillement du lit de mortier
v_{md}	0.15	[MPa]	valeur de calcul de la résistance au cisaillement du lit de mortier
γ_M	2		facteur partiel de la maçonnerie

• Rupture par cisaillement

La résistance latérale du refend dépend du glissement selon les joints de l'assise selon l'équation suivante :

$$V_{Rd,S} = 0.67 v_d l_w t_w \quad \text{avec}$$

$$v_d = 0.5 \left(0.75 \cdot v_{md} + \frac{N_{xd}}{l_w \cdot t_w} \right) \quad \text{et} \quad v_{md} = \frac{v_{mk}}{\gamma_M}$$

• Rupture par balancement

Pour ce type de rupture la FEMA ne considère qu'un dixième de la zone comprimée à sa base. La résistance latérale est donnée par l'équation suivante

$$V_{Rd,R} = 0.9 \cdot N_{xd} \cdot \frac{l_w}{2 h_w}$$

EC**• EC6 : Rupture par cisaillement**

La résistance de cisaillement est donnée par l'équation suivante :

$$V_{Rd,S} = f_{vd} \cdot l_{cw} \cdot t_w$$

Avec

f_{vd} : la valeur de calcul de la résistance au cisaillement

$$f_{vd} = f_{vd0} + 0.4 \cdot \frac{N_{xd}}{l_{cw} \cdot t_w} \leq 0.065 \cdot f_b$$

f_{vd0} : la valeur de calcul de la résistance au cisaillement sans effort normal $f_{vd0} = 1.25 \cdot f_{td}$

l_{cw} : la longueur de la partie comprimée

$$(l_{cw} = 3 \cdot \left(0.5 - \frac{M_u}{N_{xd} \cdot l_w} \right) \cdot l_w)$$

$$M_u = \frac{N_{xd} \cdot l_w}{2} \cdot \left(1 - \frac{N_{xd}}{k \cdot f_{xd} \cdot l_w \cdot t_w} \right) \quad \text{et} \quad k = 0.85$$

et $k = 0.85$

Ainsi, on a

$$V_{Rd,S} = \left(\frac{1.5 \cdot f_{vd0}}{0.85 \cdot f_{xd}} + 0.4 \right) \cdot N_{xd}$$

• EC8 : Rupture par balancement

La résistance au balancement peut être calculée par l'équation suivante :

$$V_{Rd,R} = \frac{l_w \cdot N_{xd}}{2 \cdot h_w} \cdot \left(1 - 1.15 \cdot \frac{N_{xd}}{l_w \cdot t_w \cdot f_{xd}} \right)$$

Comparaison des résultats

Pour un effort normal de 300 [kN], les valeurs obtenues pour le balancement se confirment lors de l'essai (tableau 5). Par contre, la résistance au cisaillement semble plus importante que celles qui sont obtenues avec ces formules simplifiées. En augmentant l'effort normal le mode n'a pas changé et le balancement continu à se produire aucune rupture en cisaillement contrairement aux résultats obtenus avec la SIA 266, la FEMA ou l'EC.

Tableau 5 : Résistances obtenues pour $N= 300$ [kN] (0.38 [MPa]) et $N= 480$ [kN](0.60 [MPa]).

Résistance	σ [MPa]	SIA 266	FEMA	EC6, EC8
Cisaillement [kN]	0.38	174	131	130
Balancement [kN]			169	187
Cisaillement [kN]	0.60	265	191	243
Balancement [kN]			270	350

Les essais en cisaillement (avec incertitude) ont confirmé le fait que la résistance en cisaillement est plus importante que celle prévu par les formules simplifiées. En considérant les résultats des essais en cisaillement, on peut calculer la résistance de glissement en cisaillement avec la formule suivante : $\tau_{s \max} = 0.67 \sigma + 0.88$.

Tableau 6 : Résistance latérale au glissement.

N [kN]	σ [MPa]	τ_s [MPa]	Résistance latérale V_s [kN]
300	0.38	1.15	920
480	0.60	1.28	1024

Lors de l'essai, on était très loin des valeurs trouvées avec cette estimation de la résistance latérale en glissement. Pour obtenir cette rupture il fallait appliquer une charge plus grande pour espérer obtenir une rupture en cisaillement.

Conclusion

Le but de ce travail était de déterminer la comportement sismique de maçonnerie en pierre naturelles avec une rupture en cisaillement dans l'espoir de développer ce matériau pour les constructions nouvelles. Dans ce sens un mur construit en gneiss a été testé sous un chargement statique cyclique.

Les résultats obtenus montrent que des maçonneries construit avec du Gneiss se comportent mieux faces aux séismes comparé à une maçonnerie traditionnelles en briques. Avec cette maçonnerie en gneiss en atteint une capacité de déformation de 12.5 ‰ ce qui est mieux que ce qu'on avoir avec des maçonneries traditionnelles. De plus, la résistance au cisaillement semble très élevée. On obtient uniquement une rupture en balancement sans aucune rupture en cisaillement.

En effectuant les essais en cisaillement sur les petits murets, il s'est avéré que l'influence de la cohésion est considérable $c = 0.88$ [MPa] par contre la valeur obtenue pour le coefficient de frottement $\tan(\rho) = 0.67$ semble s'approcher des valeurs usuelles (0.60 – 0.70). Le fait d'avoir des blocs de pierres taillées de façon brut favorise cela. Il faut noter que ces résultats restent incertains et une généralisation est à éviter.

Des essais sur ce type de maçonneries en pierres naturelles en gneiss ont rarement été réalisés. Ainsi, continuer cet essai afin d'obtenir des résultats plus poussé permettra de mieux comprendre le comportement de ce type de pierres sous des efforts sismiques.

Références

- [1] Normes suisse SIA V178.
- [1] Normes suisse SIA 266.
- [2] FEMA 356.
- [3] Eurocodes 6 et 8.
- [4] Génie parasismique, 2008, Pierino Lestuzzi et Marc Badoux.
- [5] Seismic Vulnerability of Cultural Heritage Buildings in Switzerland, Thèse EPFL 2008, Mylène Devaux.
- [6] Détermination de la résistance sismique de maçonneries anciennes par essais expérimentaux, Travail de master 2007, Pascale Favez.
- [7] In-planeseismic behaviour of historic stone masonry, 2010, Abdelsamie Elmenshawi, Mohamed Sorour, Aftab Mufti, Leslie G Jaeger, and Nigel Shrive.
- [8] Assessment of the in-plane shear strength of stone masonry walls by simplified models, 2006, G. Vasconcelos and P.B. Lourenço.
- [9] Earthquake-resistant design of masonry buildings, 2000, M. Tomazevic.
- [10] EN 1052-3 : Methods of test for masonry. Determination of initial shear strength.

CALCULS THERMIQUES SUR DES BATIMENTS EN PIERRE MASSIVE

Nous avons réalisés une série de calculs de la consommation d'énergie pour le chauffage sur trois bâtiments de logement en pierre naturelle massive à l'aide du logiciel Lesosai 6 ®.

Le premier type d'immeuble, Variante 1, possède des façades en pierre naturelle massive ainsi qu'un refend longitudinal. Le deuxième type comporte un noyau central en pierre naturelle massive ainsi qu'une façade soit en pierre massive, Variante 2 A, soit en construction légère fortement isolée, Variante 2 B.

Pour chaque variante, nous avons considéré le cas des maçonneries en pierre naturelle sans isolation; avec isolation intérieure et avec un crépi isolant extérieur.

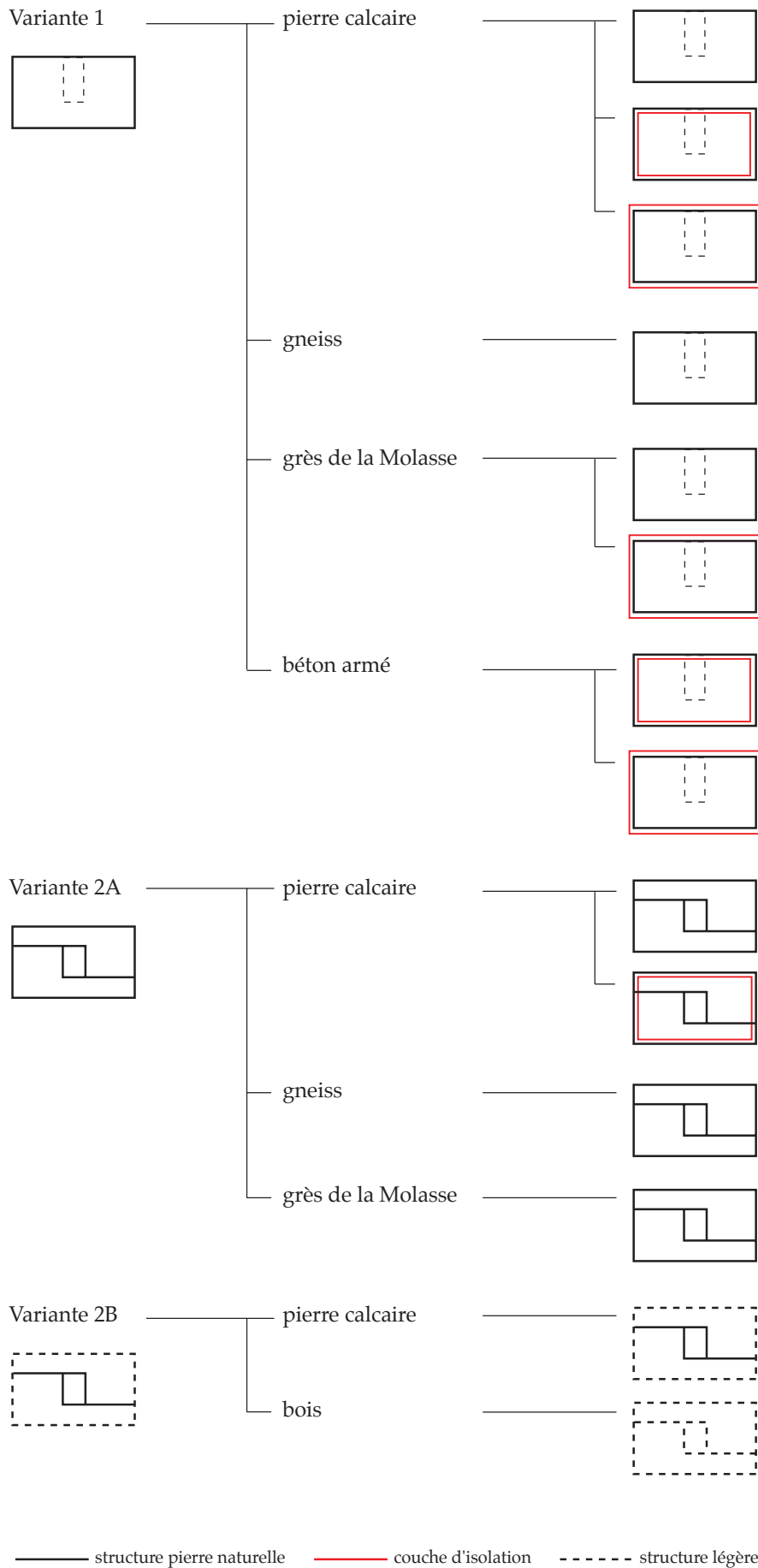
Chaque cas a été calculé pour les climats de Berne; Lausanne; Lugano et Neuchâtel, villes que nous avons considérées comme cas exemplaire pour chaque région suisse.

Les résultats de ces calculs sont donnés, ici de suite, sous la forme de graphiques.

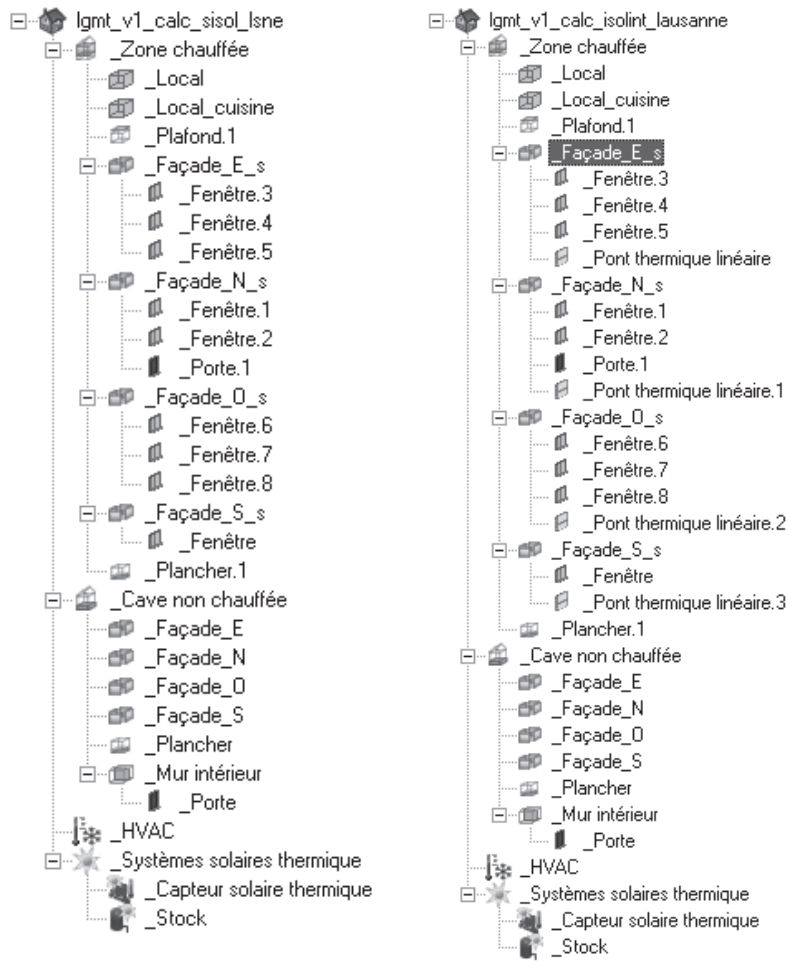
Nous remercions l'entreprise E4tech (<http://www.e4tech.com>) de Lausanne pour nous avoir fourni une version du logiciel Lesosai 6 ®, ainsi que son responsable, M. Flavio Foradini.

Nous remercions également le Prof. Claude-Alain Roulet, de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, et le Prof. Pierre-André Seppey, de la Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale du Valais, de Sion, pour les renseignements et les informations.

LOGEMENT EN PIERRE NATURELLE
Schémas des variantes pour calculs thermiques effectués avec LESOSAI® 6

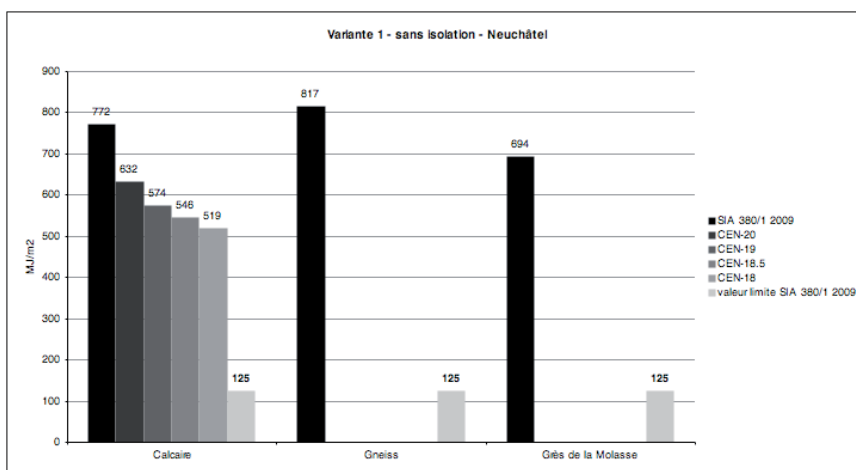
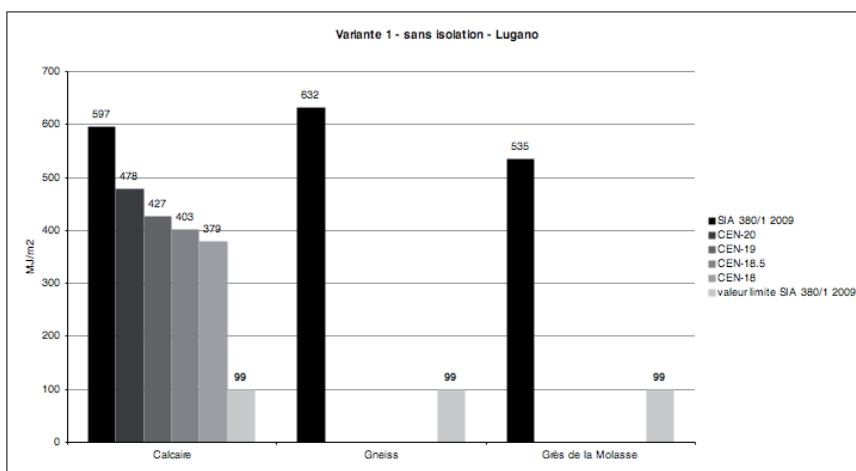
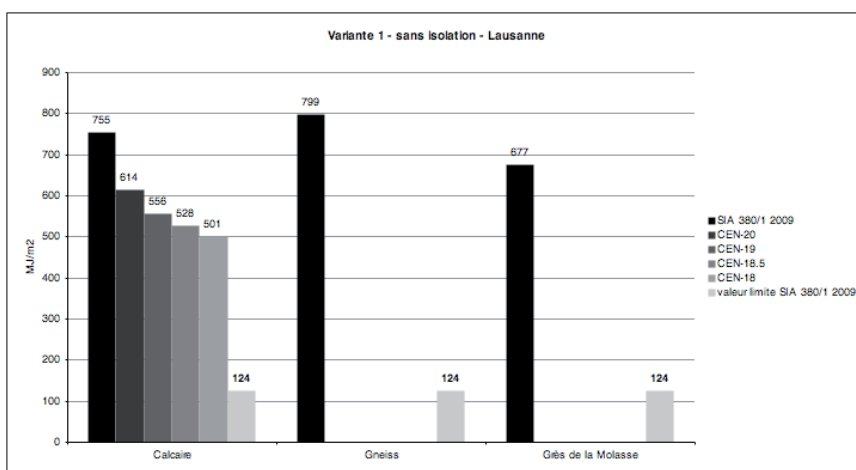
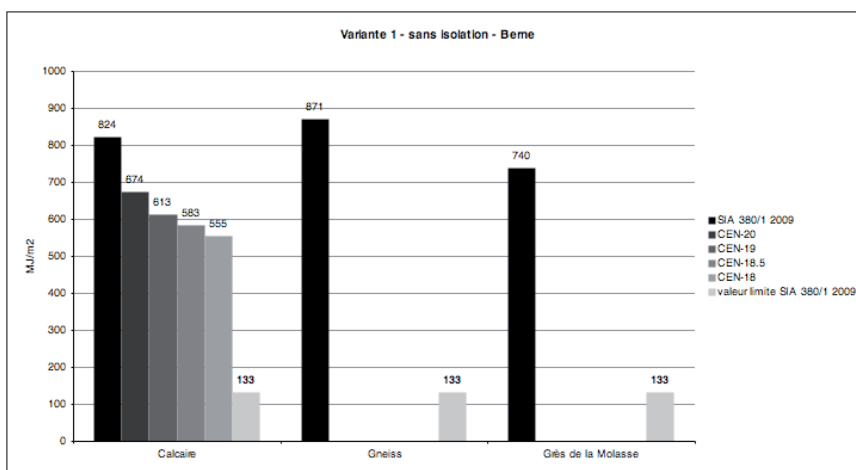


VARIANTE 1

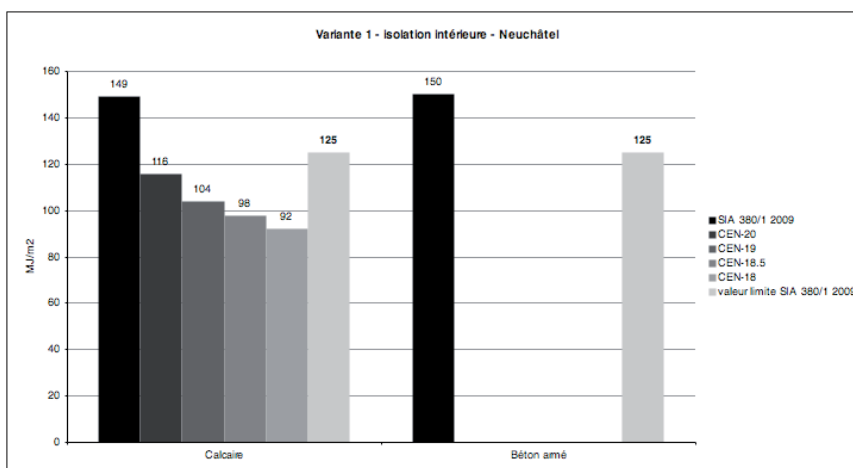
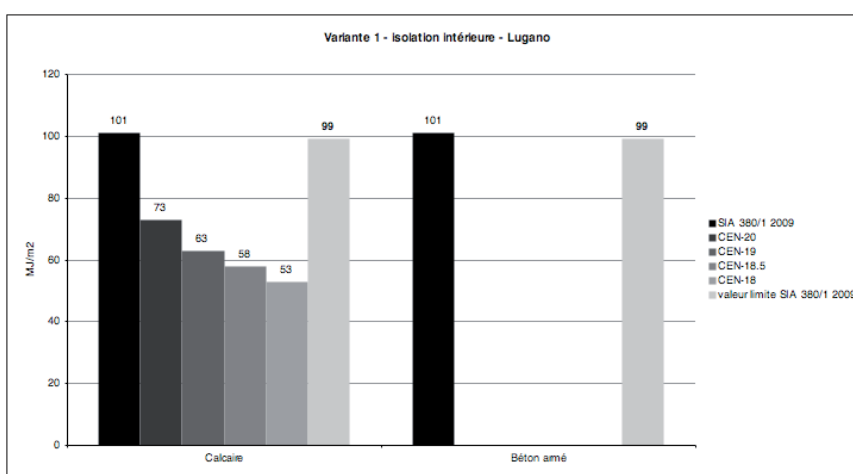
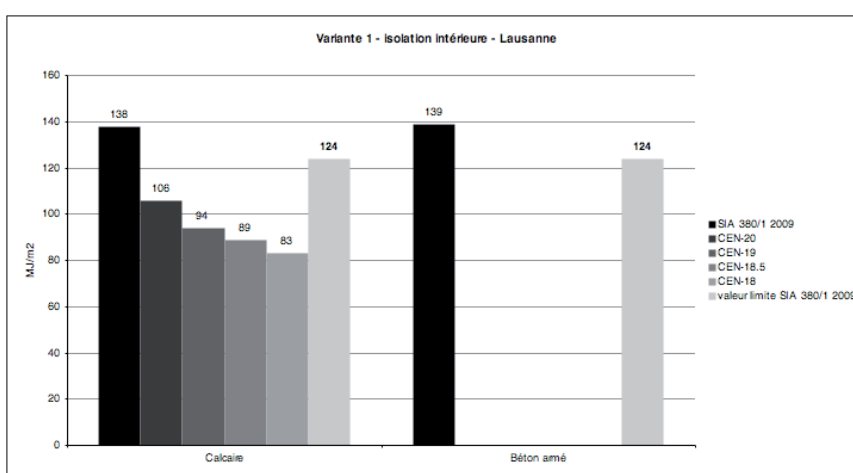
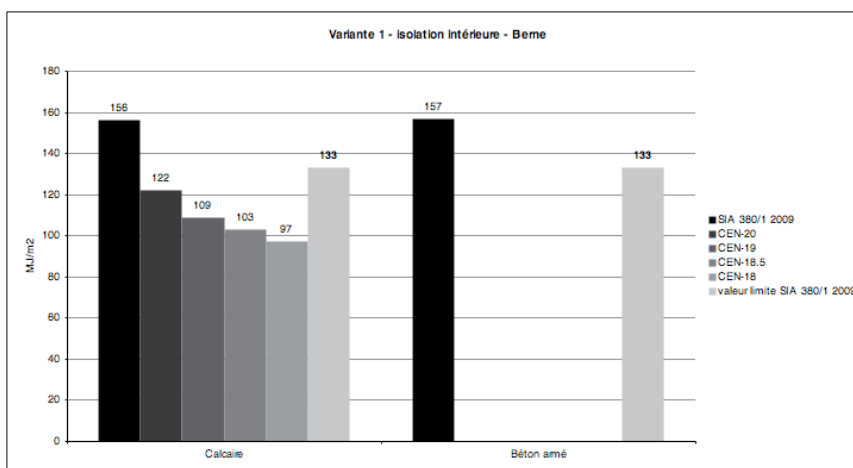


Arborescences du modèle LESOSAI 6® pour la Variante 1.

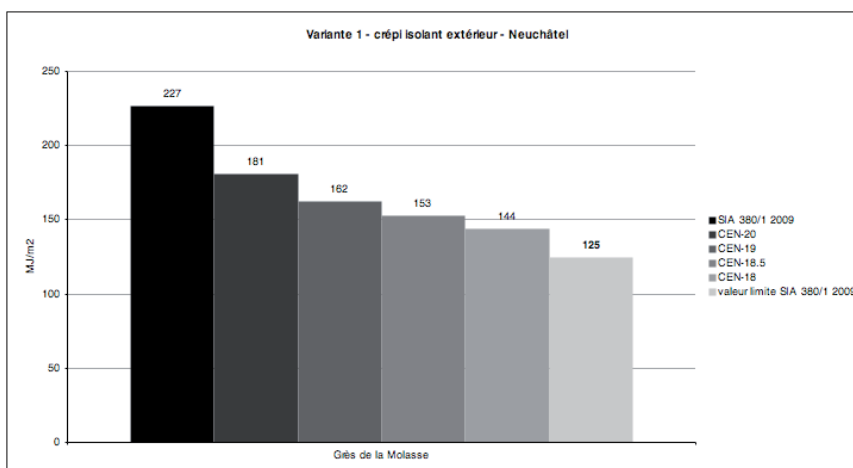
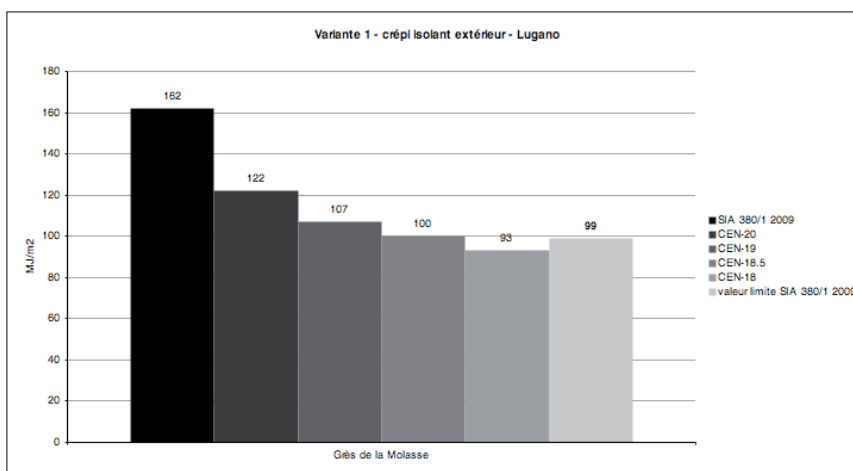
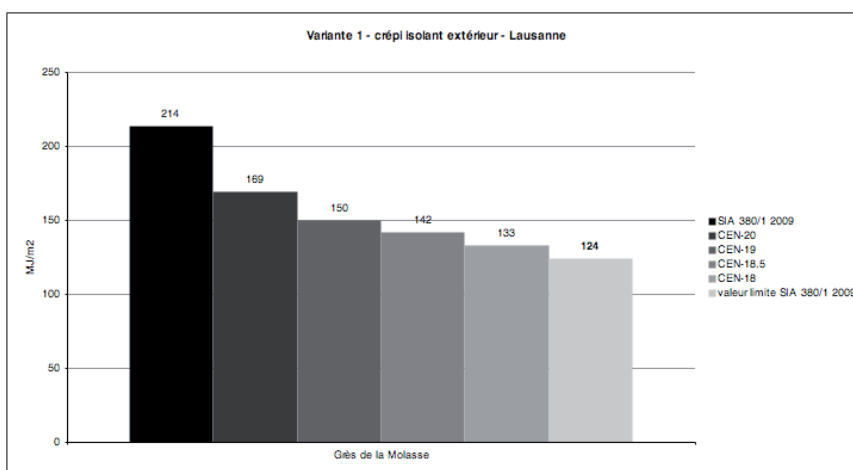
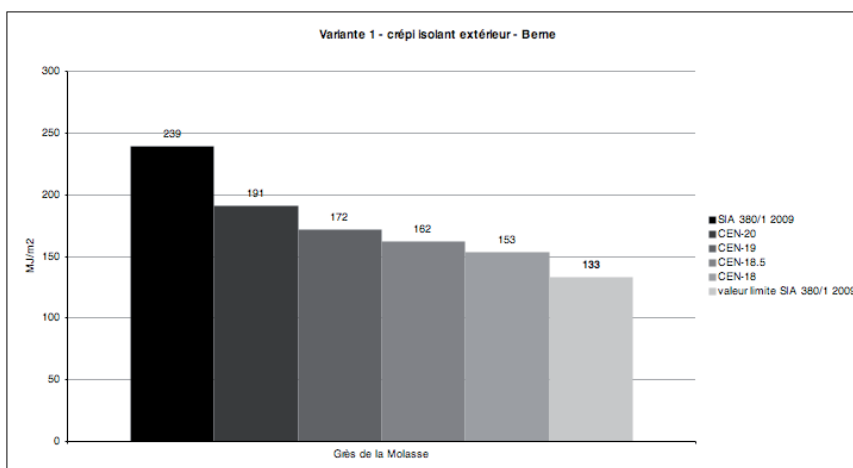
VARIANTE 1 - Sans isolation



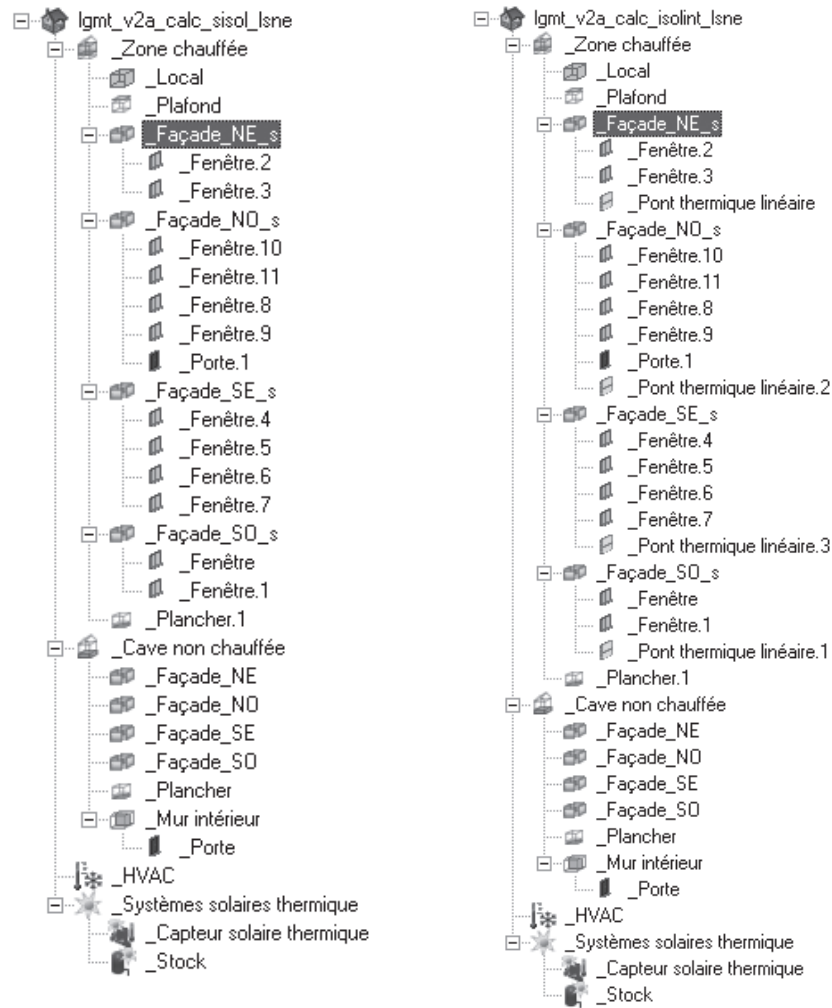
VARIANTE 1 - Isolation intérieure



VARIANTE 1 - Crépi isolant extérieur

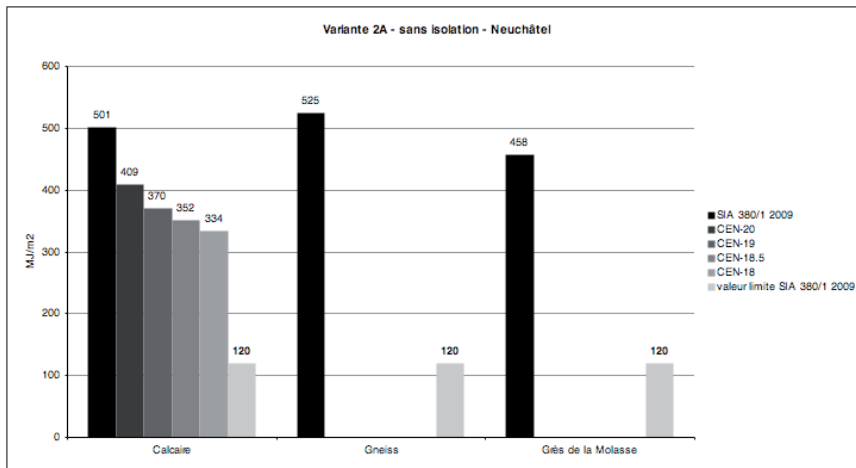
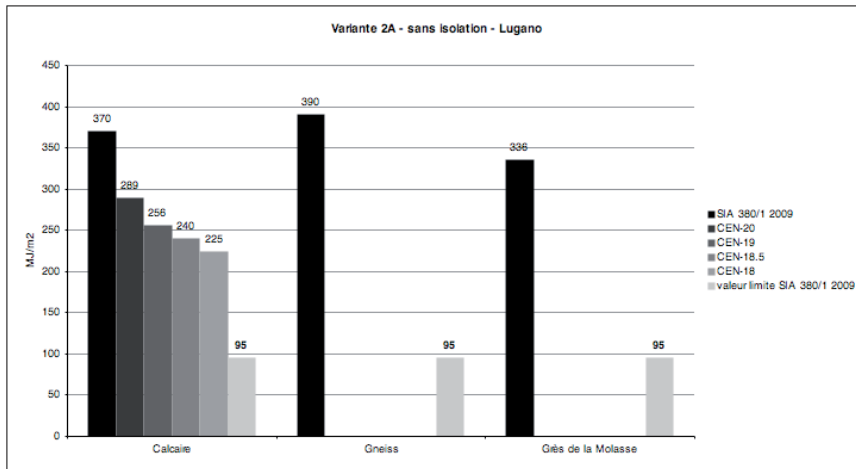
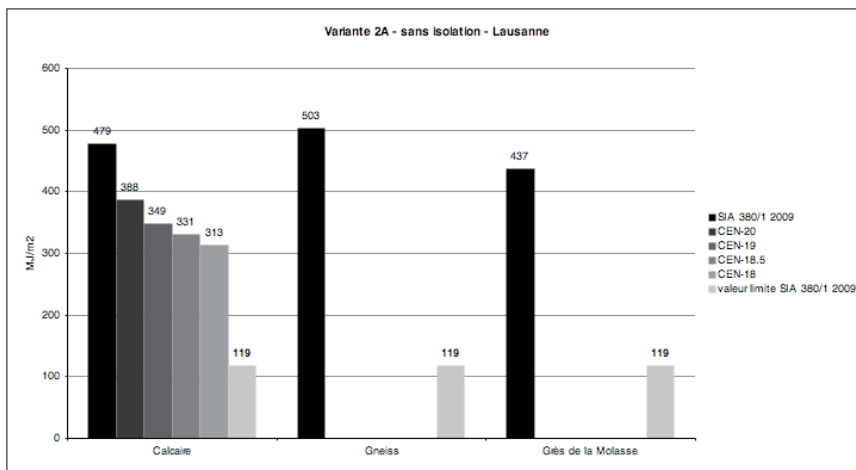
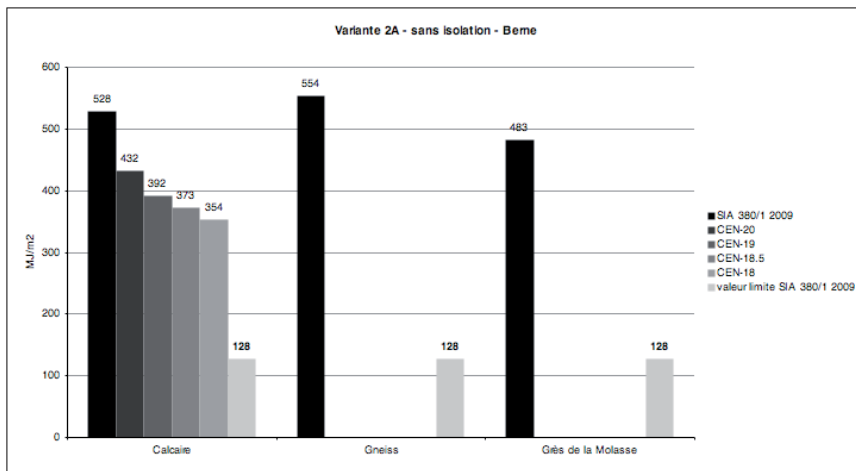


VARIANTE 2 A

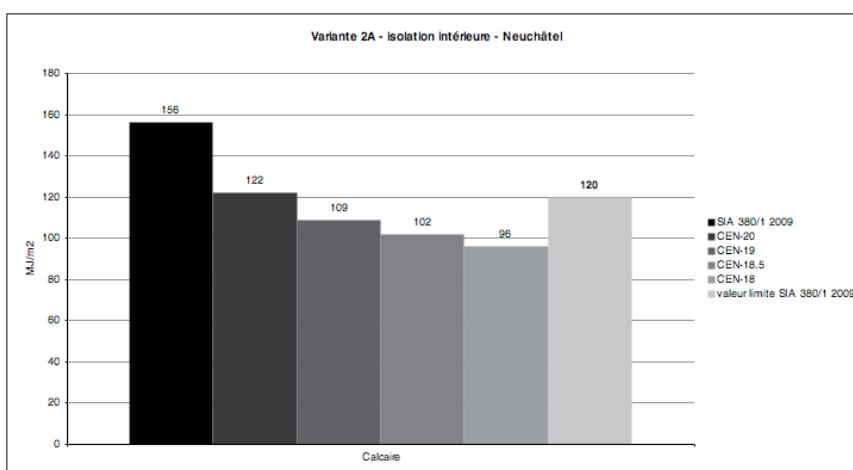
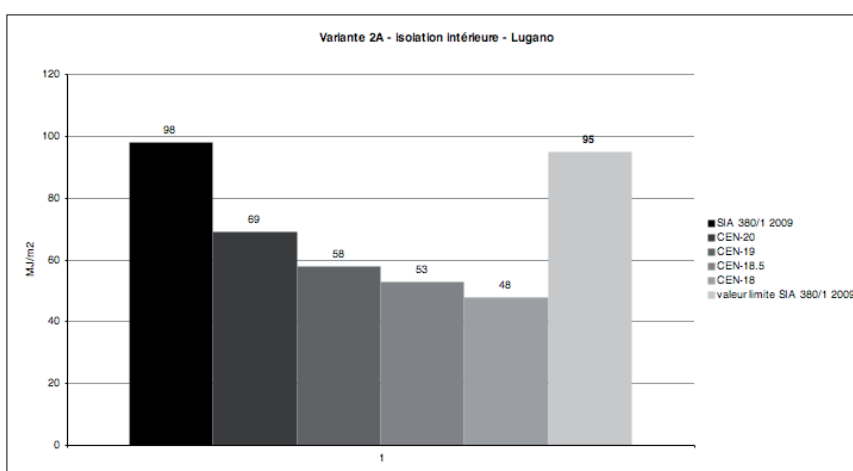
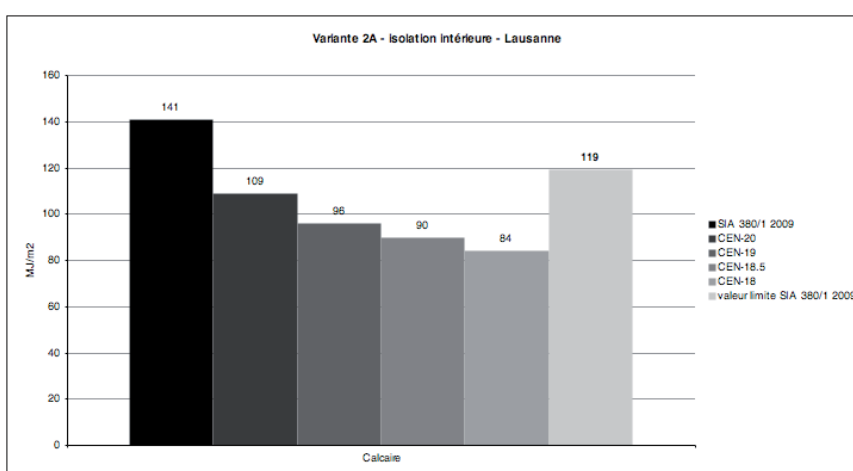
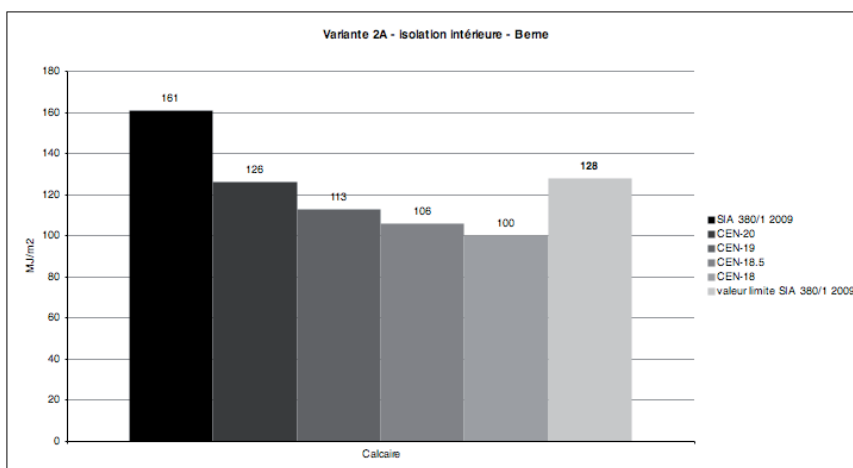


Arborescences du modèle LESOSAI 6® pour la Variante 2 A.

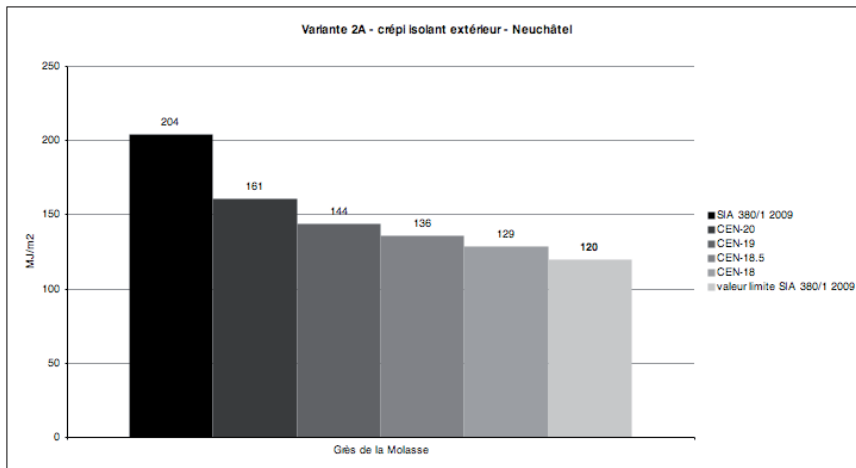
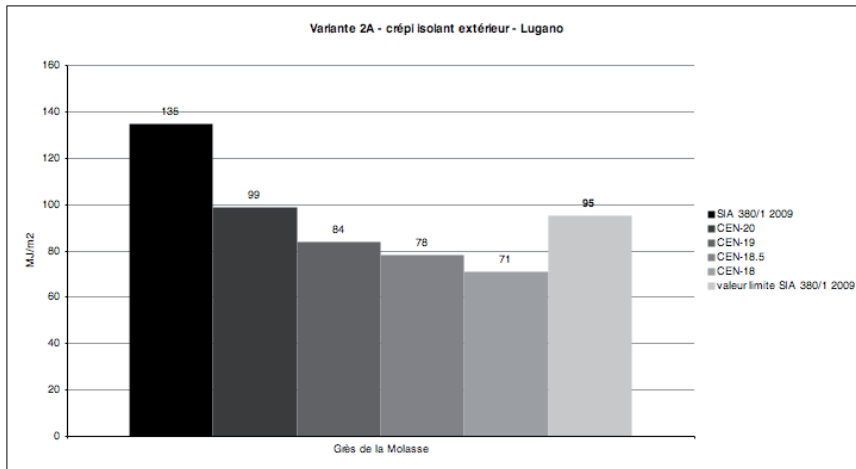
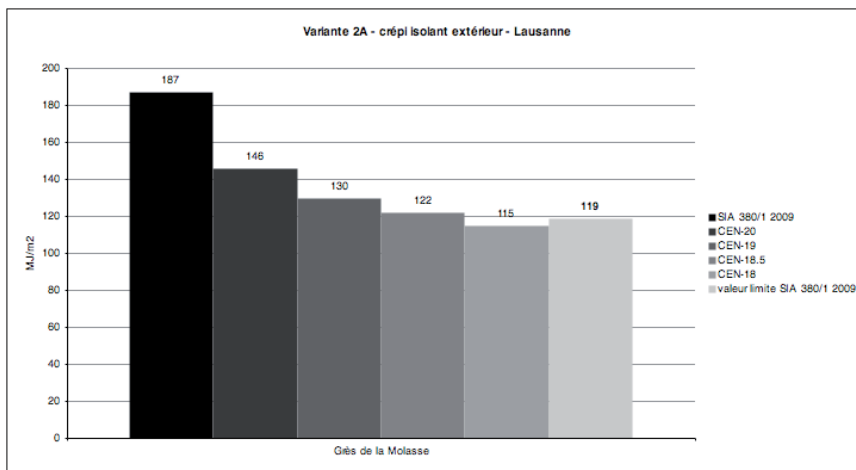
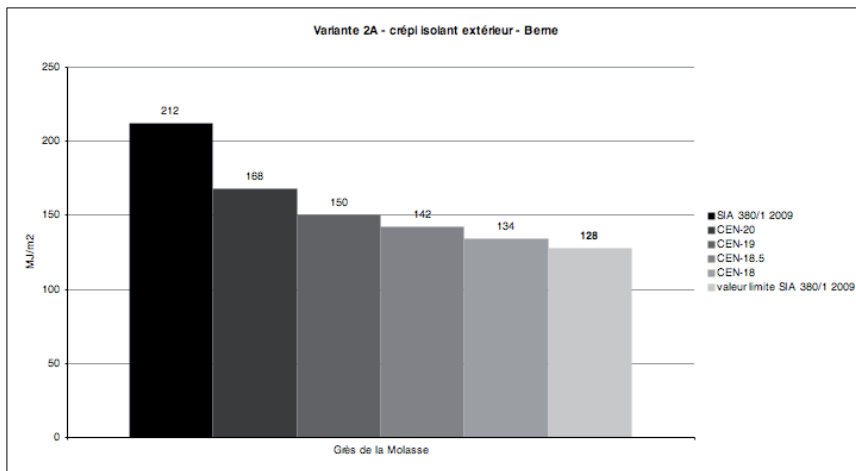
VARIANTE 2 A - Sans isolation



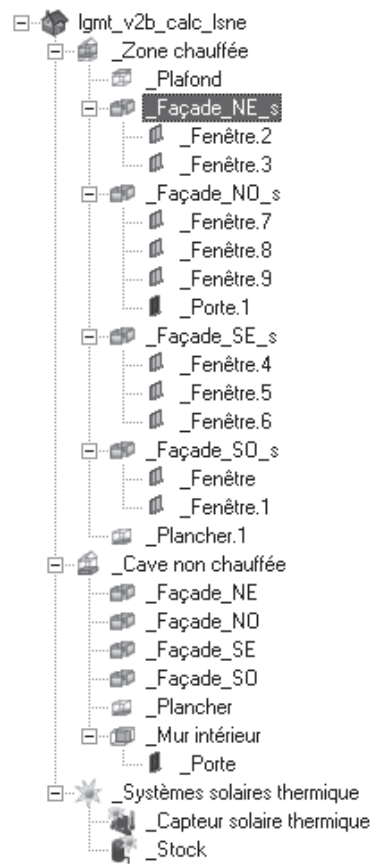
VARIANTE 2 A - Isolation intérieure



VARIANTE 2 A - Crépi isolant extérieur

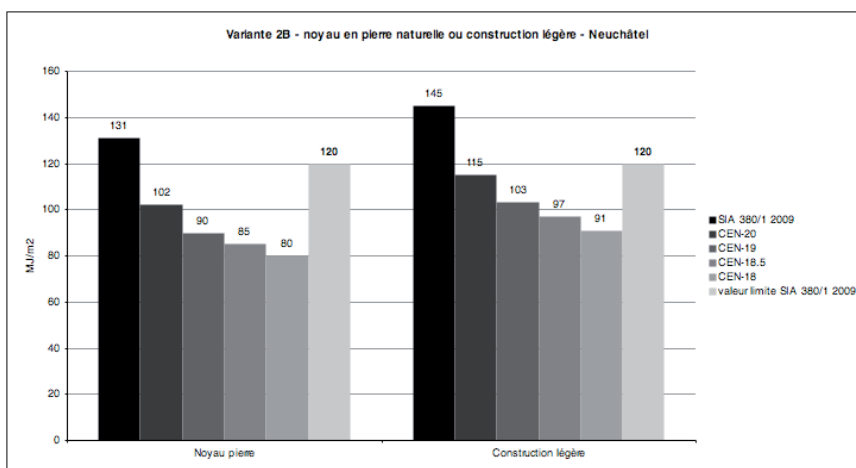
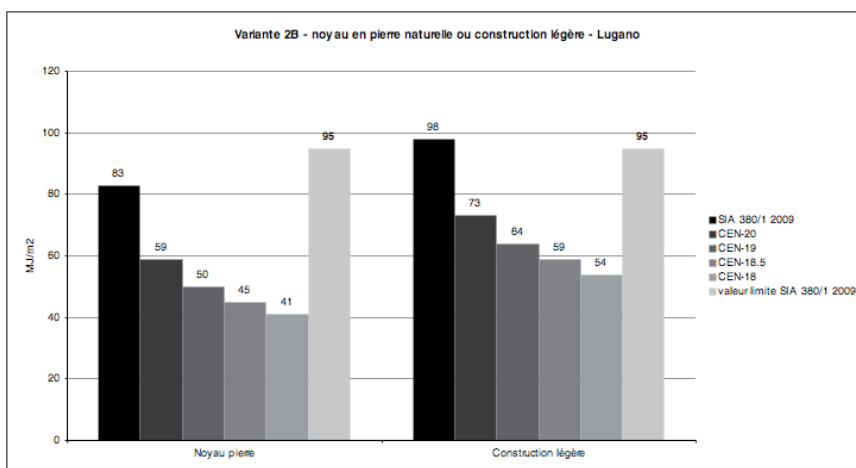
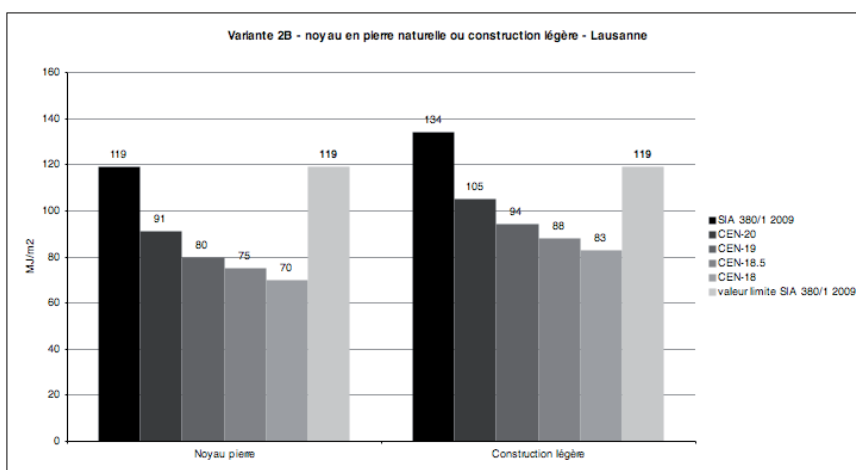
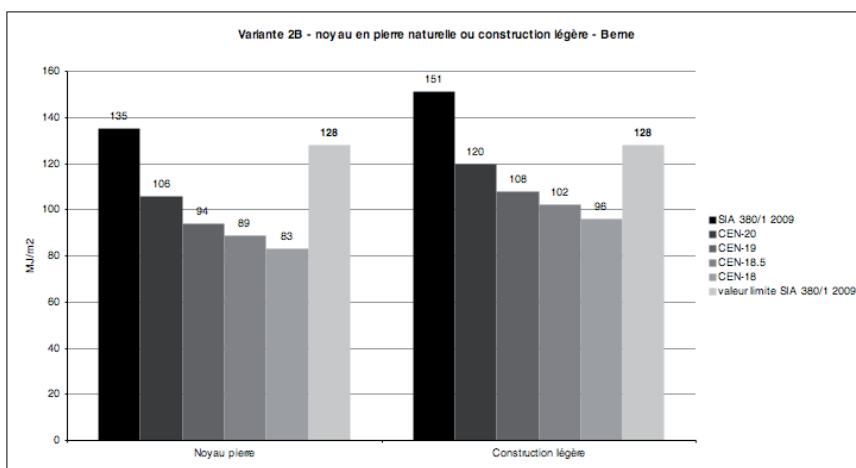


VARIANTE 2 B



Arborescence du modèle LESOSAI 6 ® pour la Variante 2 B.

VARIANTE 2 B - Noyau en pierre massive ou structure légère



INERTIE THERMIQUE DES FAÇADES EN PIERRE NATURELLE

L'étude faite sur l'inertie thermique des façades en pierre naturelle massive a permis d'en déterminer, pour des épaisseurs variables, les principales caractéristiques thermiques: c'est-à-dire, la valeur "U" [W/mK]; l'amortissement et le déphasage [h]. Ces valeurs ont été rassemblées dans des graphiques qui les mettent en relation à la variation de l'épaisseur. Ces diagrammes constituent un outil d'aide à la décision pendant la phase de projet ou d'évaluation, dans le cas des bâtiments existants.

Des façades massives en gneiss, grès et calcaire ont été étudiées, dans une mise en oeuvre sans isolation; avec isolation intérieure, et avec crépi isolant, soit extérieur soit intérieur. Les graphiques sont rassemblés selon le type de mise en oeuvre et les différentes variantes sont confrontées dans un diagramme comparatif.

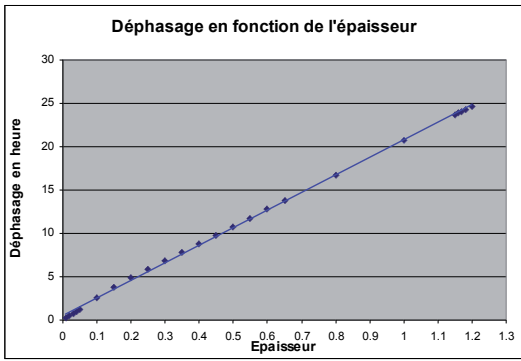
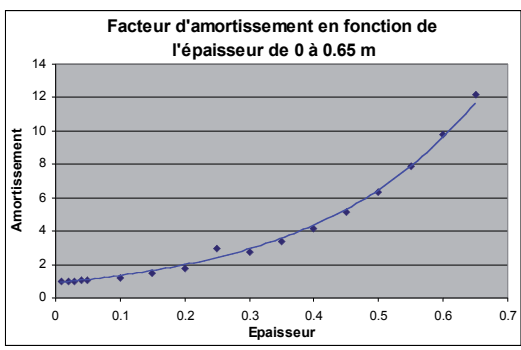
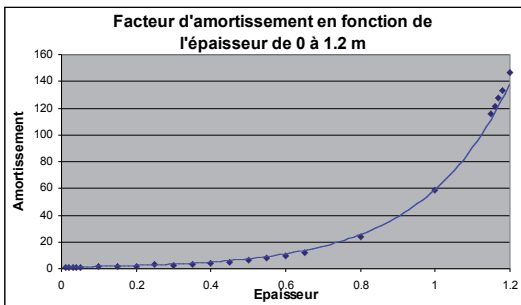
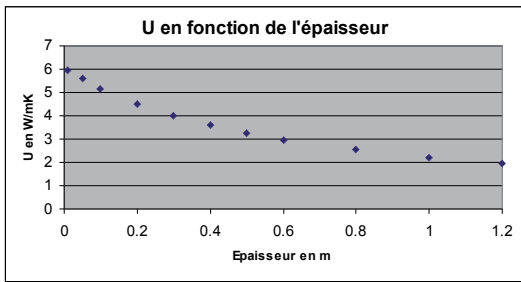
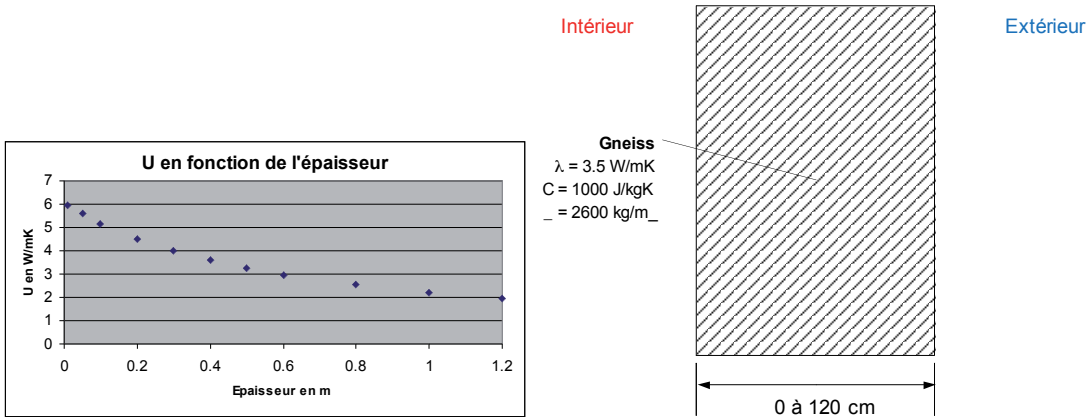
Cette étude a été réalisée par le *Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment* (LESBAT) de la *Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud*, par Jérôme Bouglé, assistant, sous la direction du Prof. Stéphane Citherlet. Ceci a été rendu possible par le soutien de l'*Associazione Industrie dei Graniti marmi e pietre naturali del Ticino* (AIGT), de la *Naturstein Verband der Schweiz* (NVS), de l'entreprise *Bärlocher Steinbruch und Steinhaurei AG* et du *Laboratoire de Construction et Conservation* (LCC) de l'Institut d'Architecture de la Faculté Enac du l'Epfl de Lausanne. Nous remercions toutes ces personnes.

Inertie thermique des façades en pierre naturelle

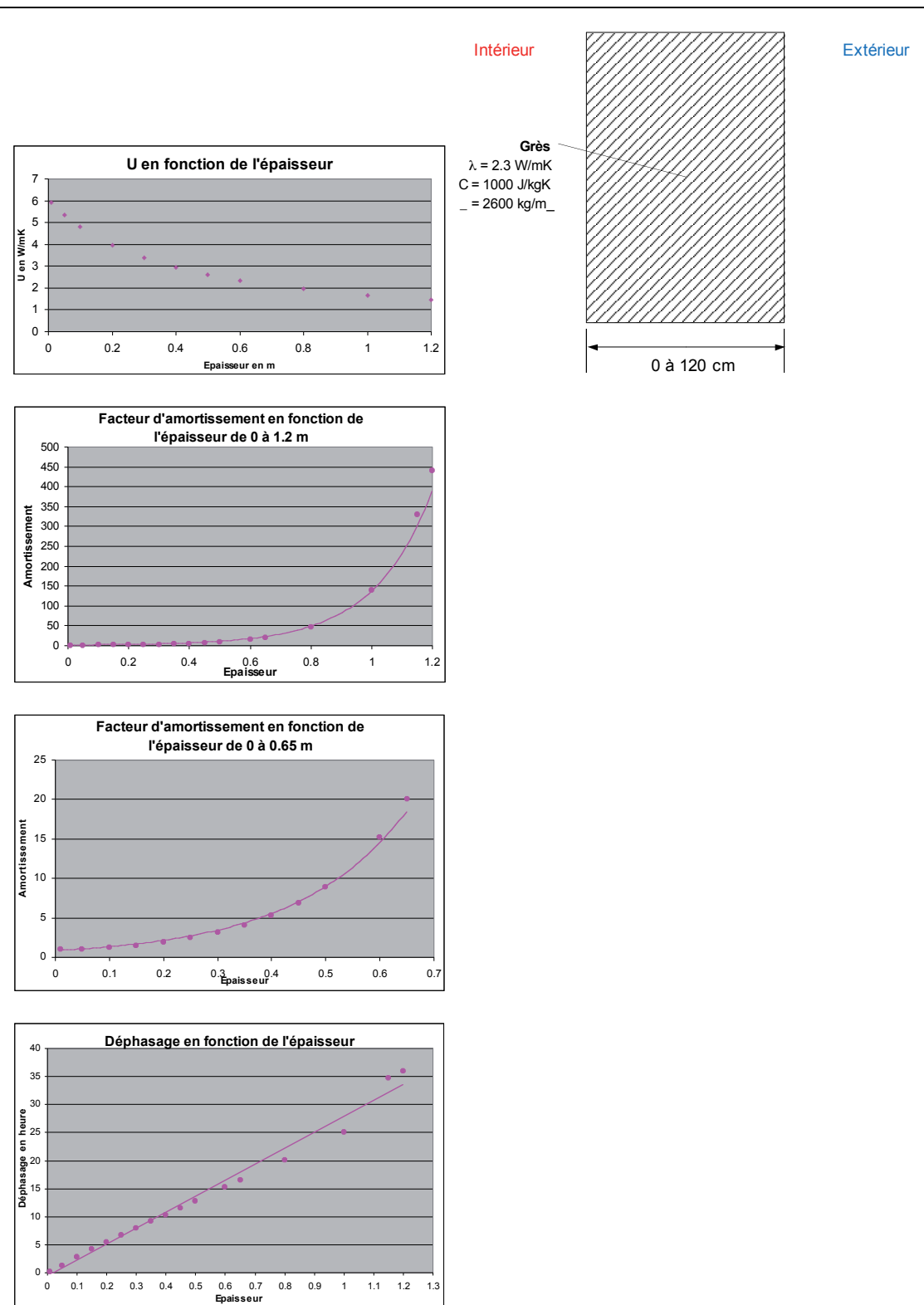
Projet: Inertie thermique des façades en pierre naturelle
Décembre 2009



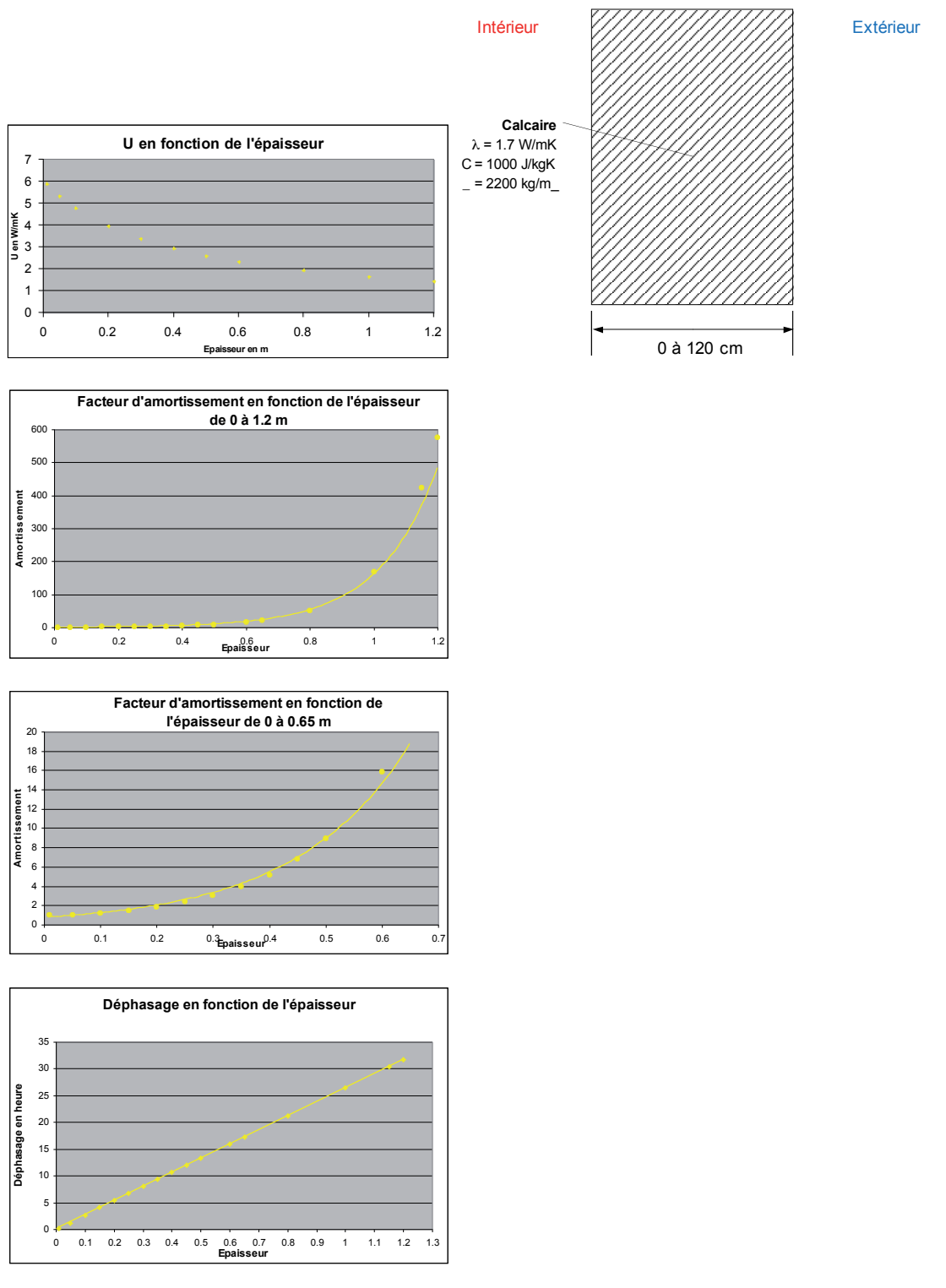
Variante 1
Gneiss



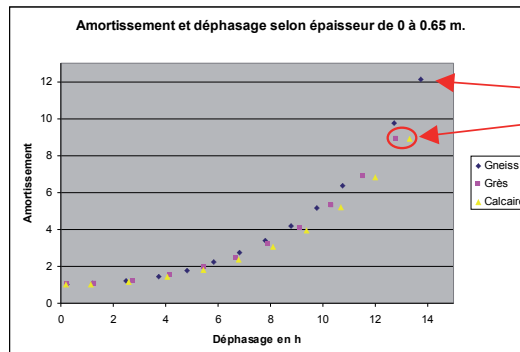
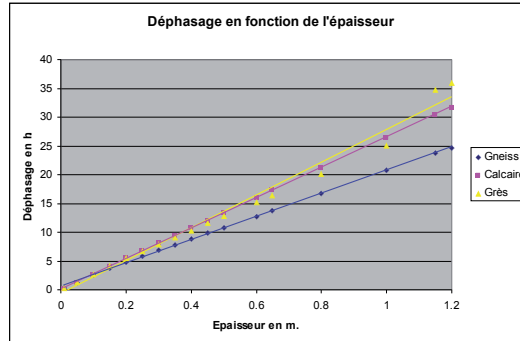
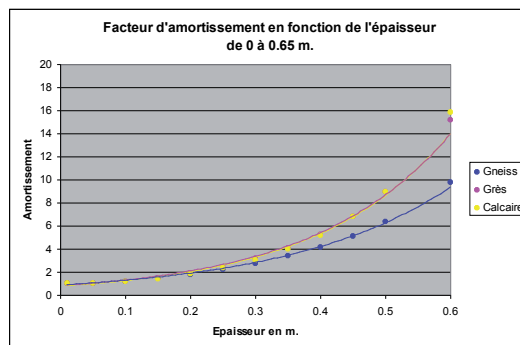
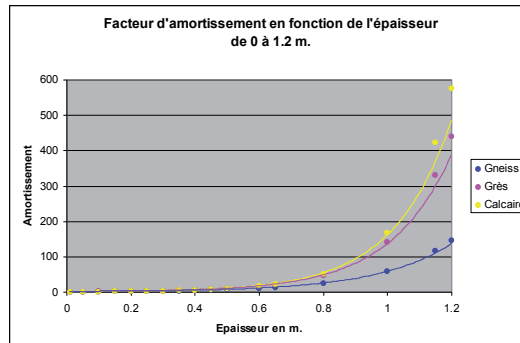
Variante 1
Grès



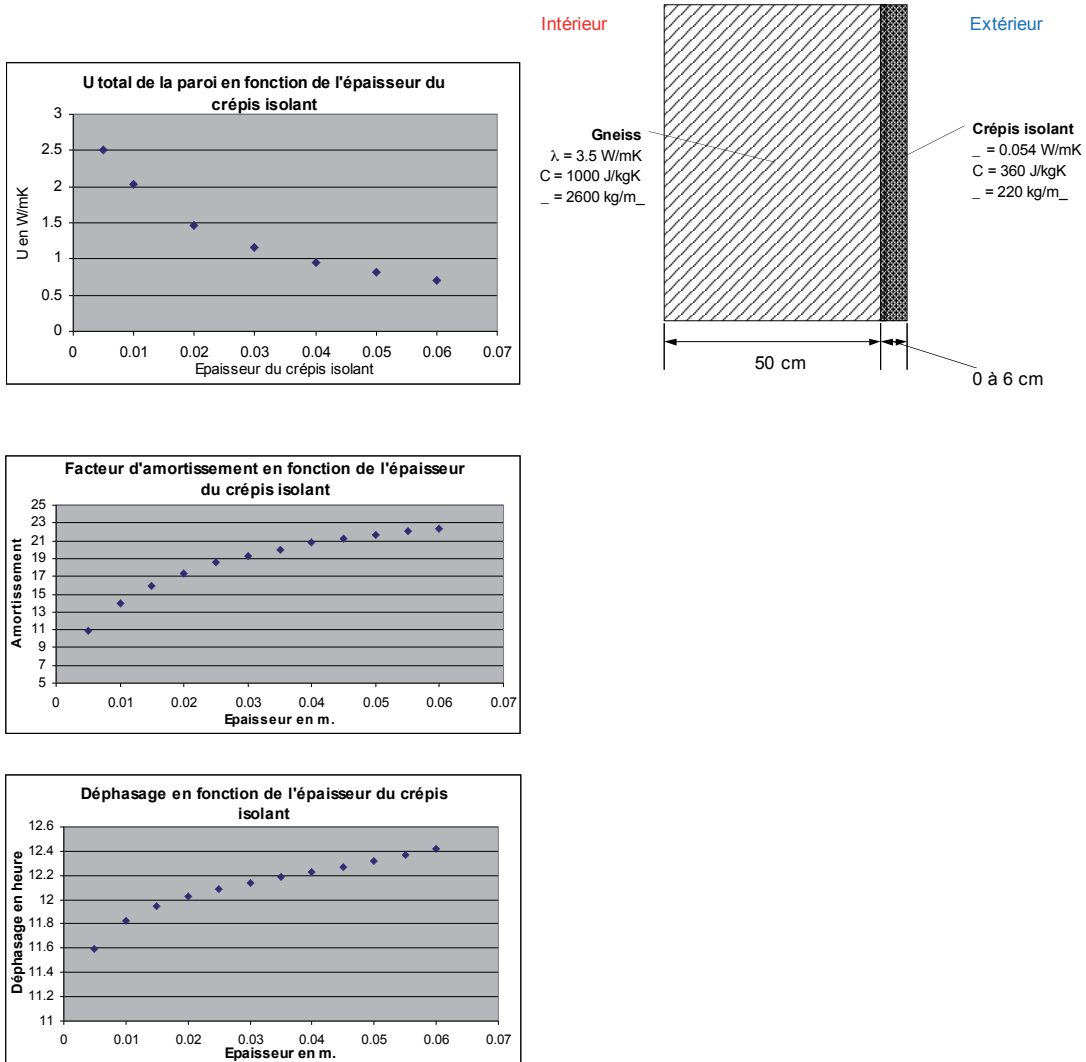
Variante 1
Calcaire



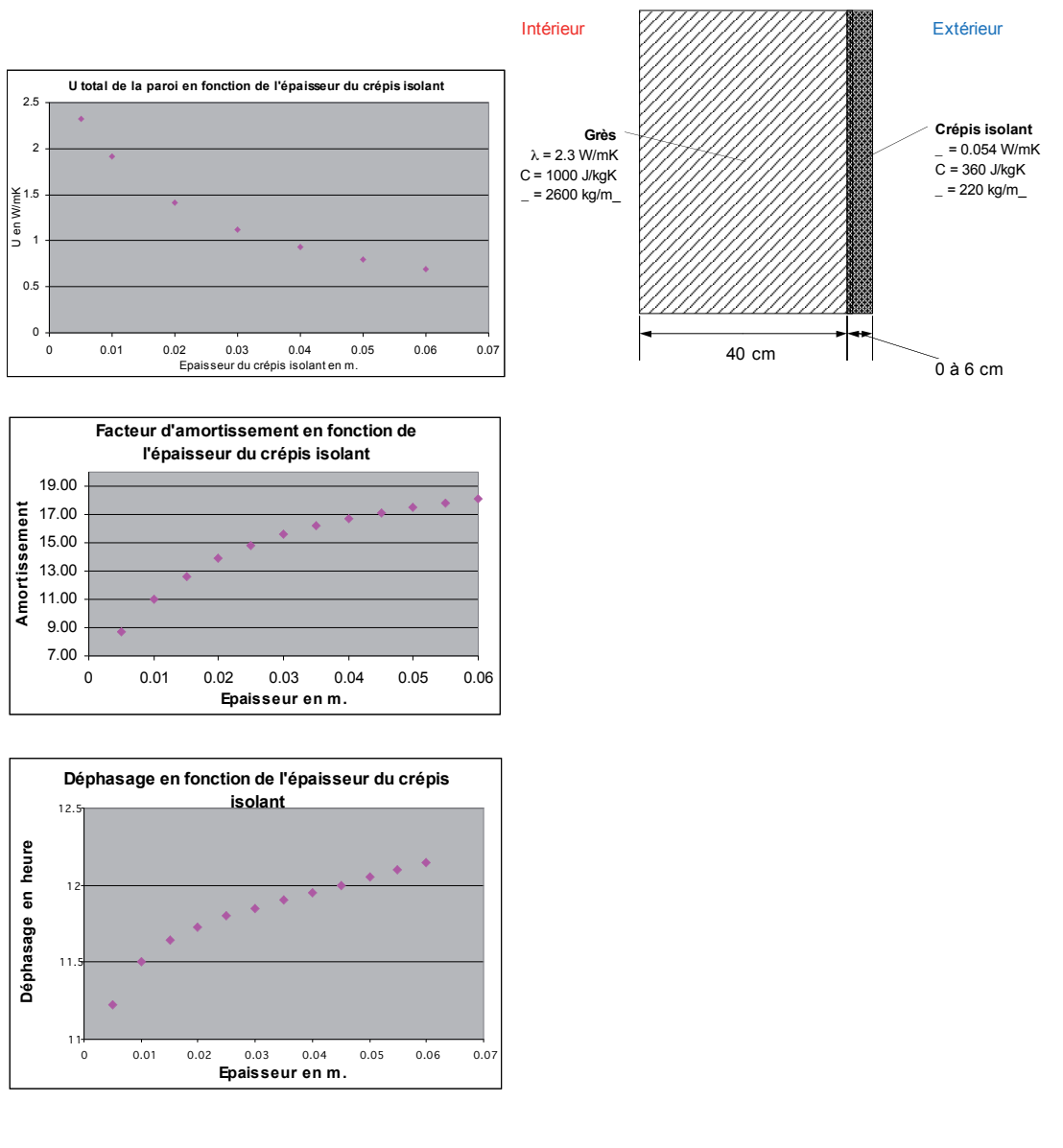
Variante 1
Comparatif Gneiss / Grès / Calcaire



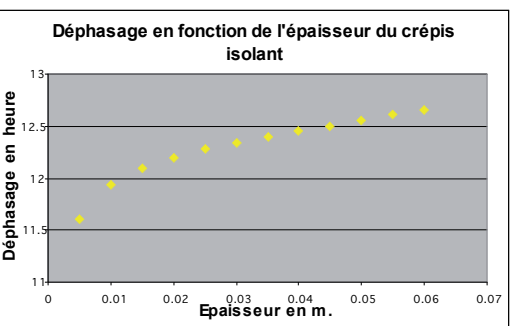
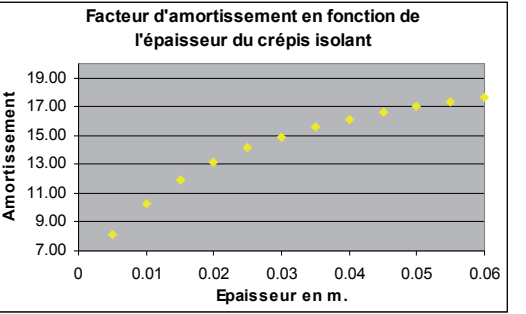
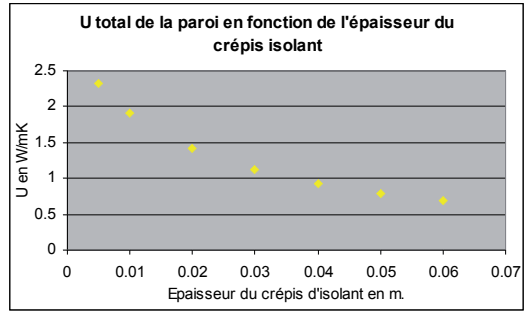
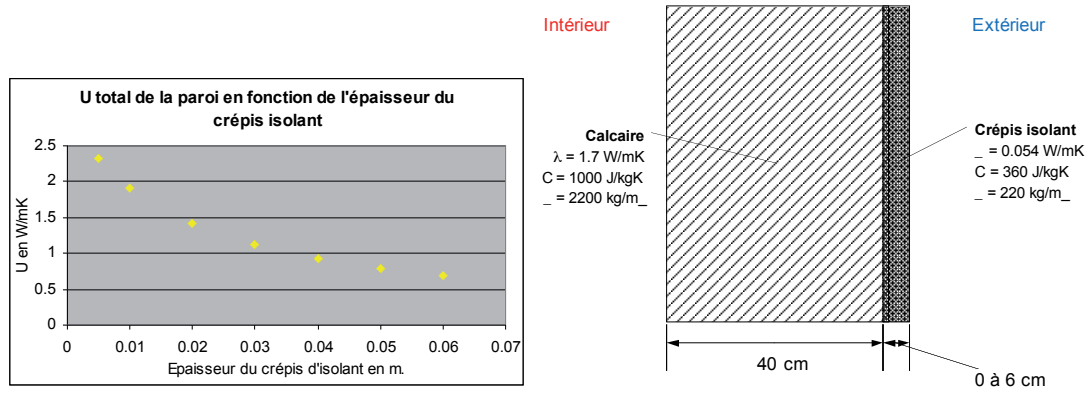
Variante 2
Gneiss + Isolant extérieur



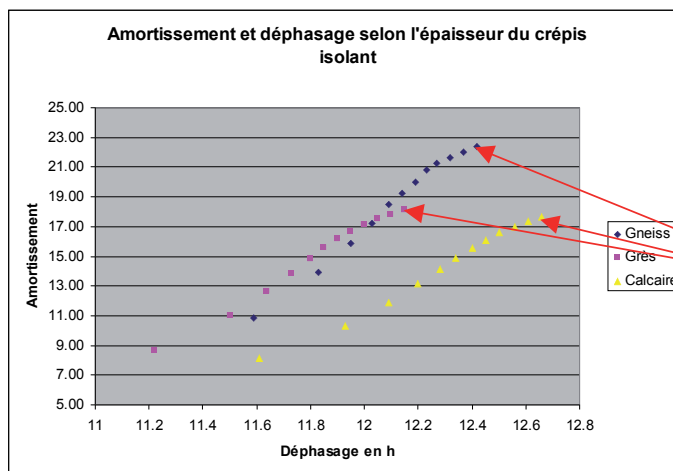
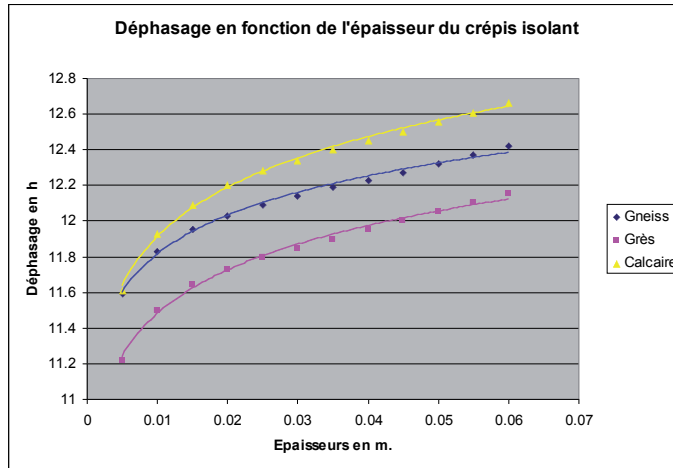
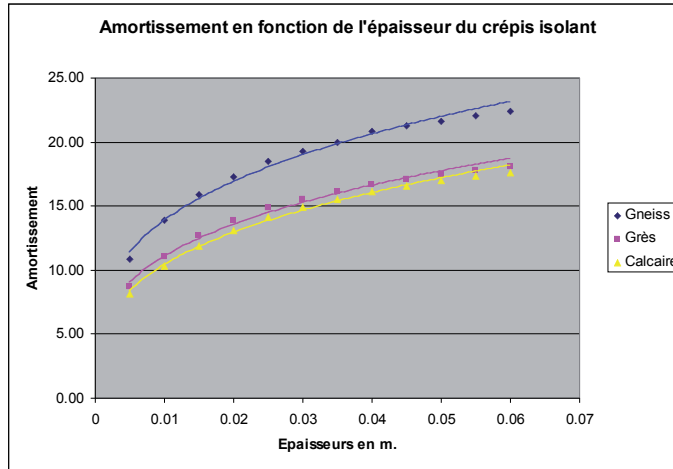
Variante 2
Grès + Isolant extérieur



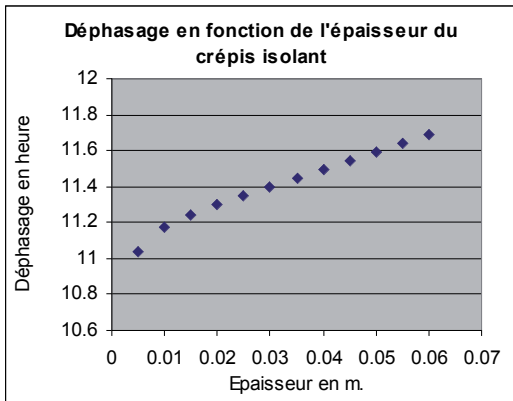
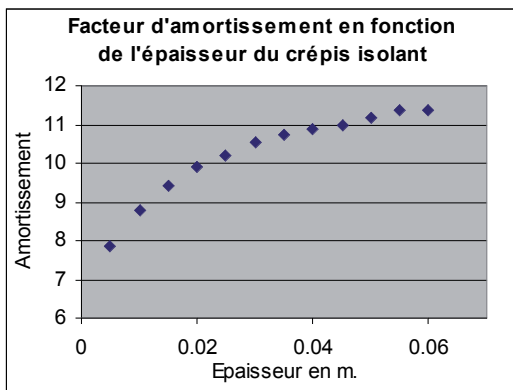
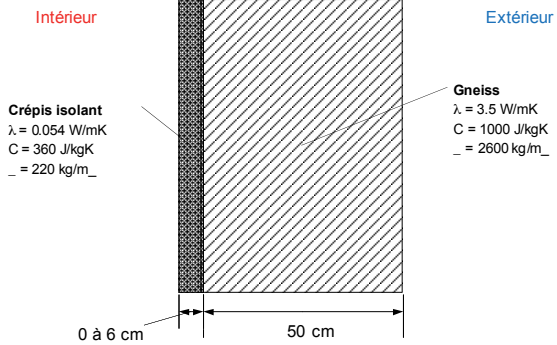
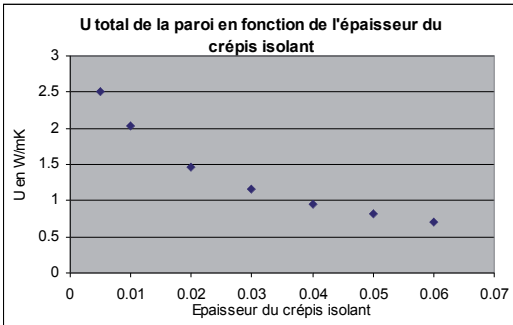
Variante 2
Calcaire + Isolant extérieur



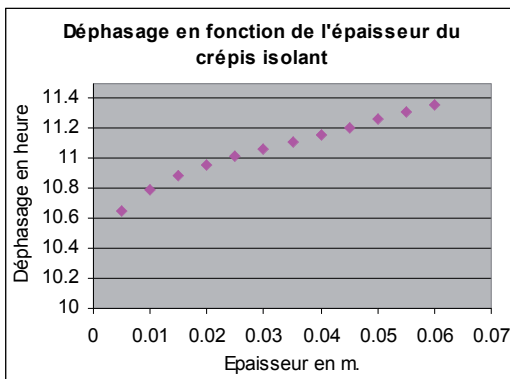
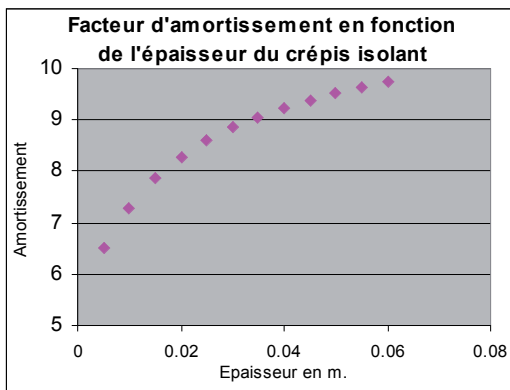
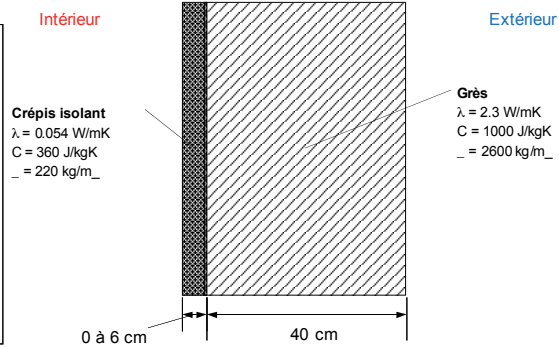
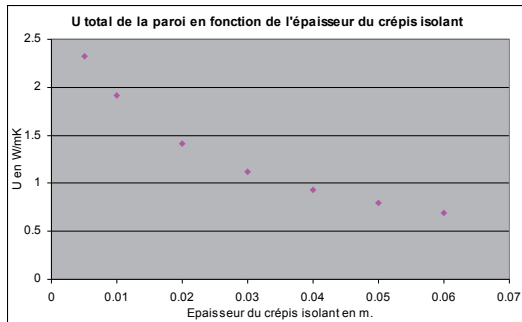
Variante 2
Comparatif Gneiss / Grès / Calcaire + Isolant extérieur



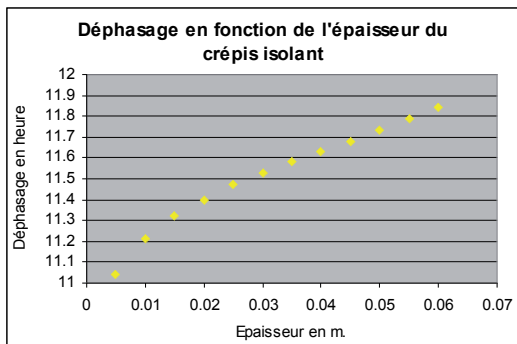
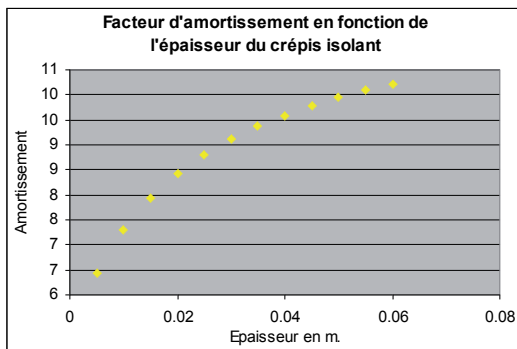
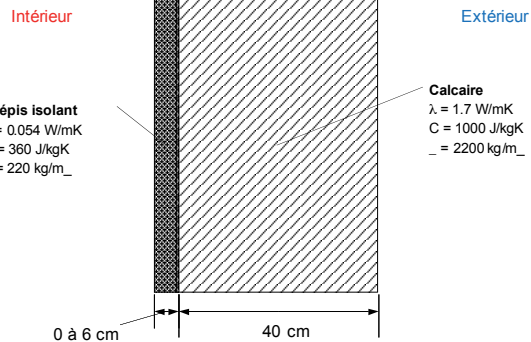
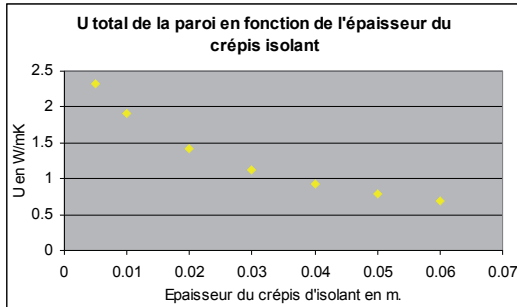
Variante 2
Gneiss + Isolant intérieur



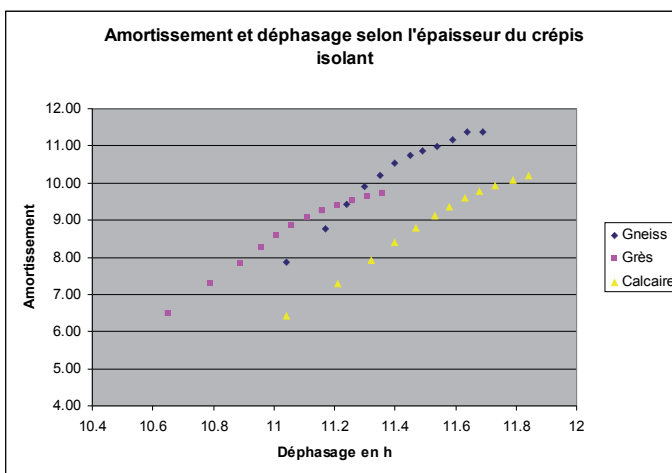
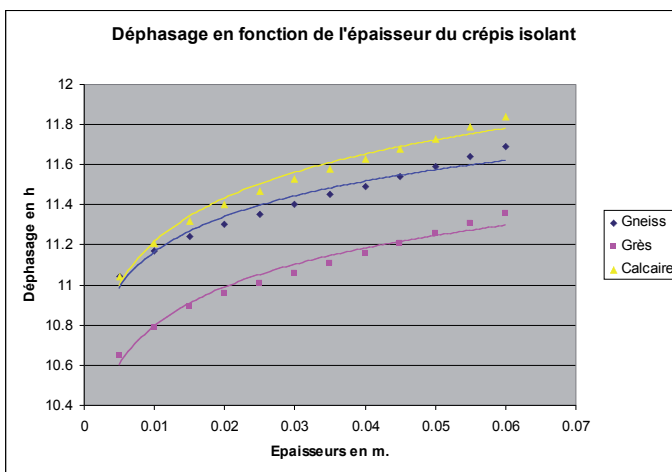
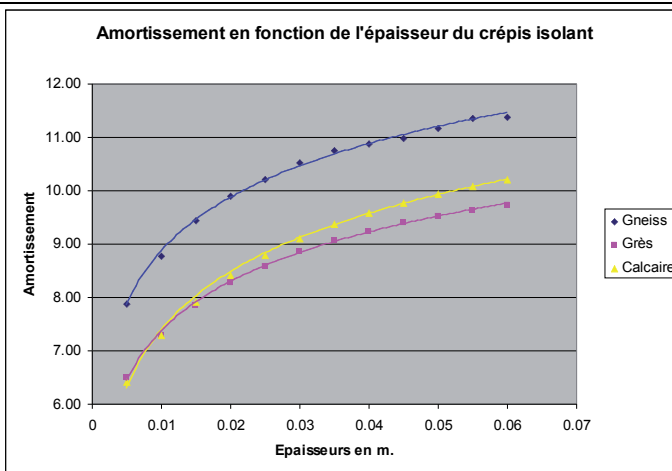
Variante 2
Grès + Isolant intérieur



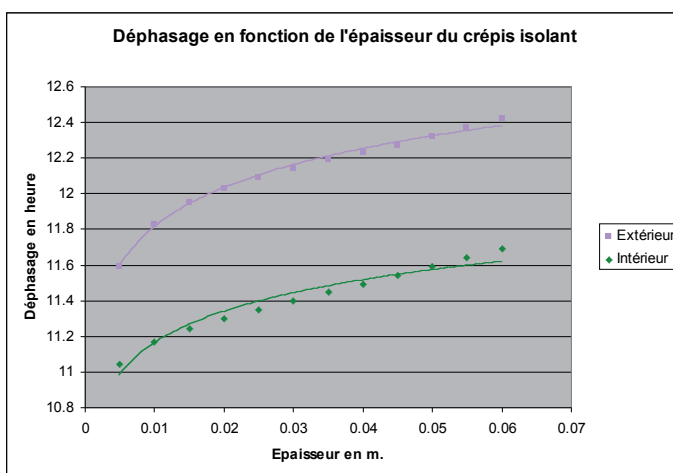
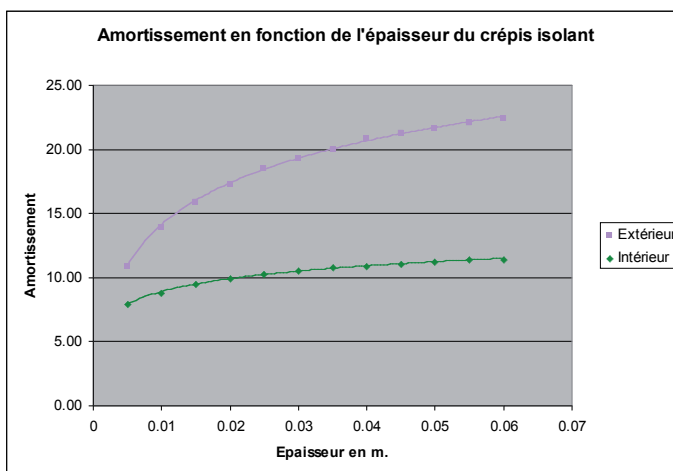
Variante 2
Calcaire + Isolant intérieur



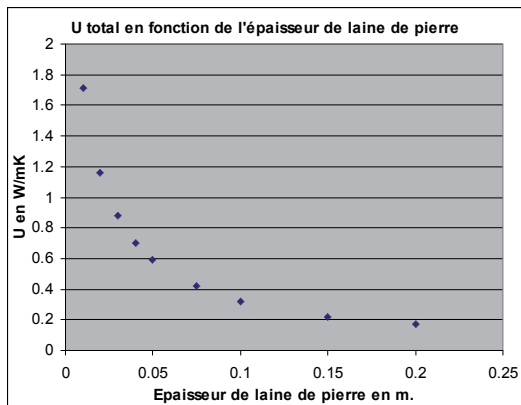
Variante 2
Comparatif Gneiss / Grès / Calcaire + Isolant intérieur



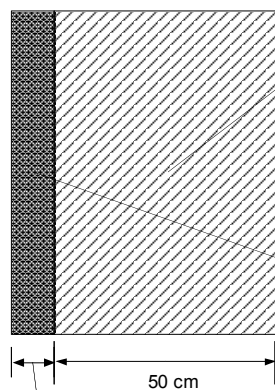
Variante 2
Comparatif crépis isolant Intérieur ou Extérieur avec mur de pierre naturelle Gneiss



Variante 3
Gneiss + Isolant intérieur (laine de pierre)



Intérieur

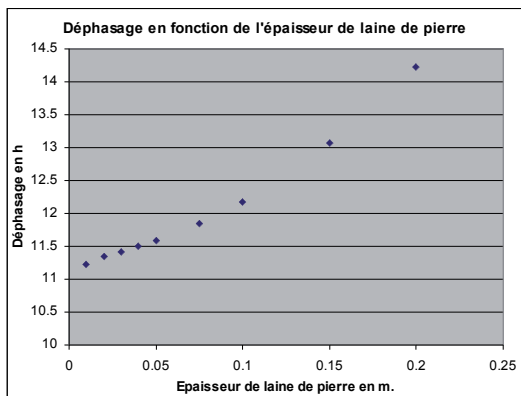
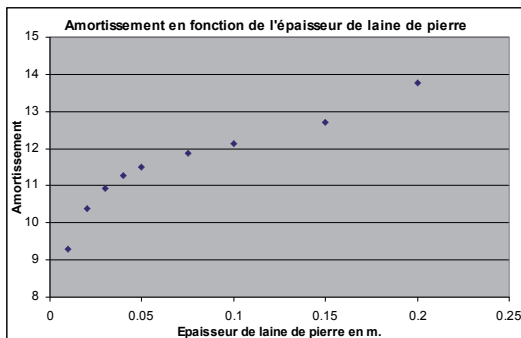


Extérieur

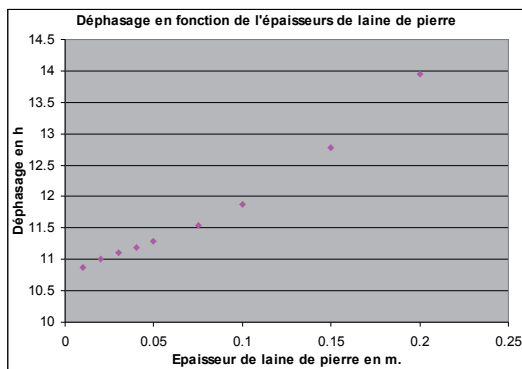
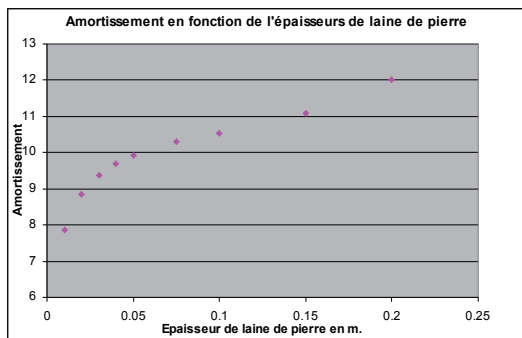
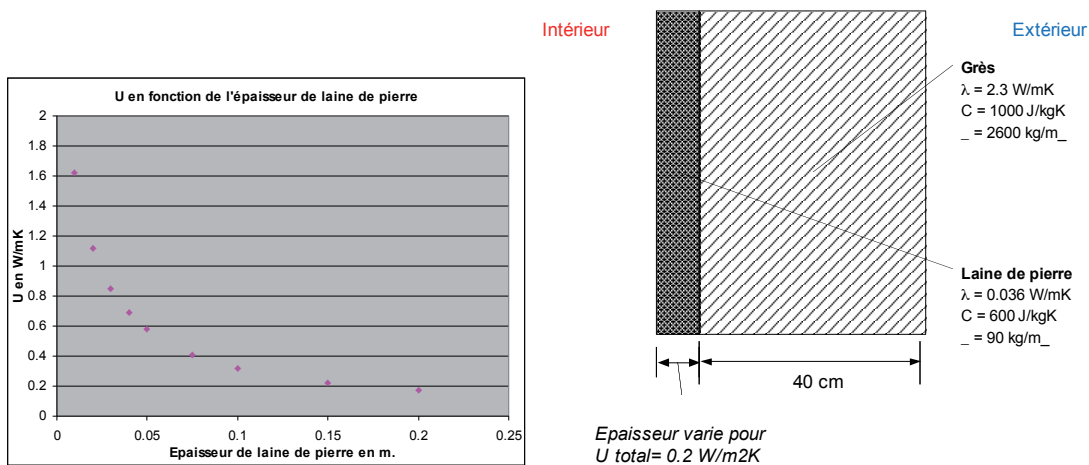
Gneiss
 $\lambda = 3.5 \text{ W/mK}$
 $C = 1000 \text{ J/kgK}$
 $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$

Laine de pierre
 $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$
 $C = 600 \text{ J/kgK}$
 $\rho = 90 \text{ kg/m}^3$

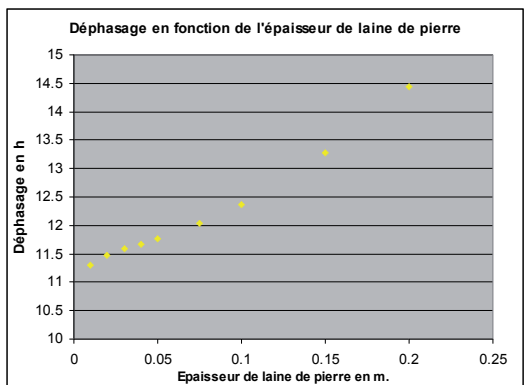
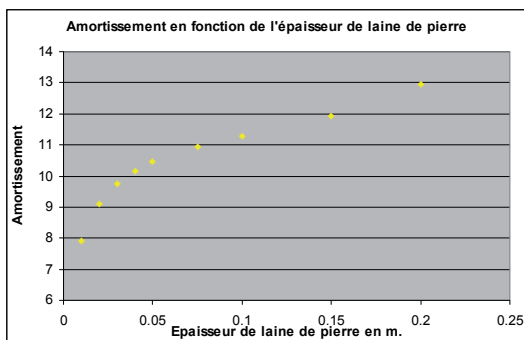
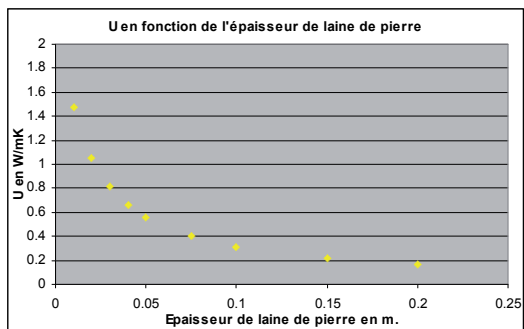
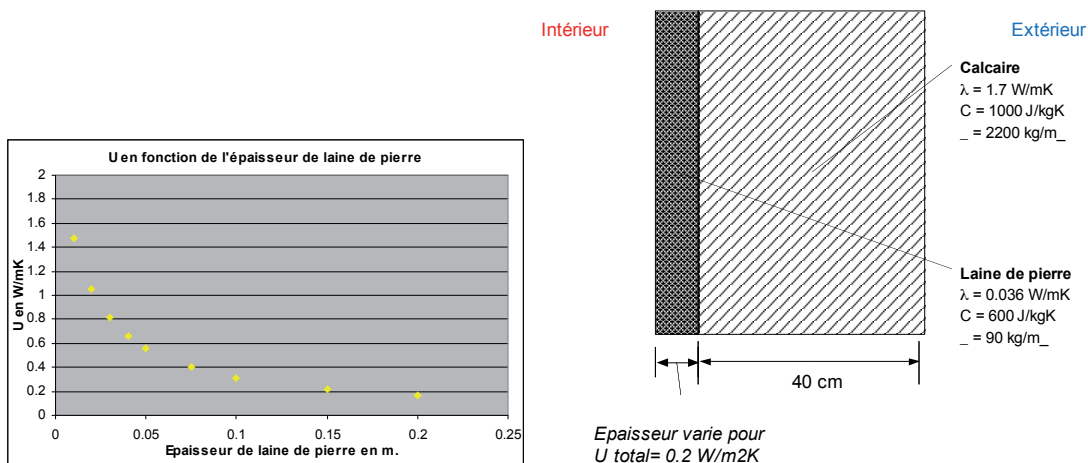
Epaisseur varie pour
 $U_{total} = 0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$



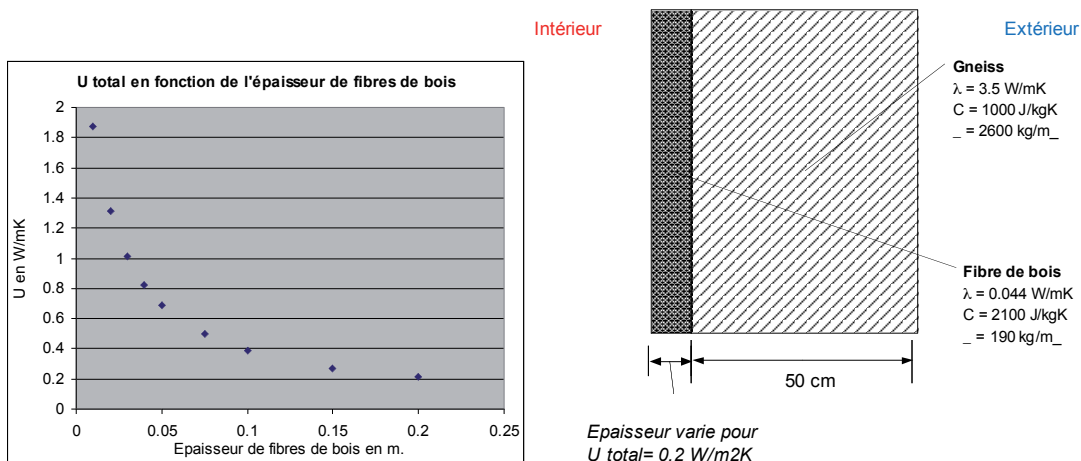
Variante 3
Grès + Isolant intérieur (laine de pierre)



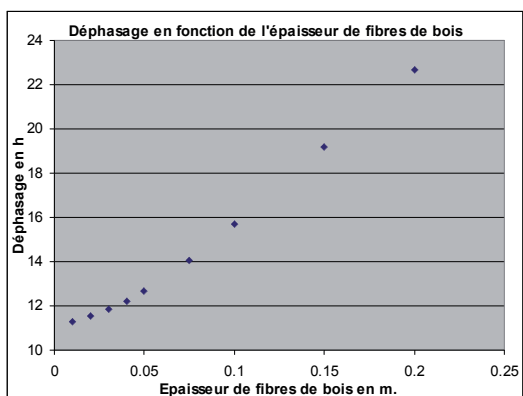
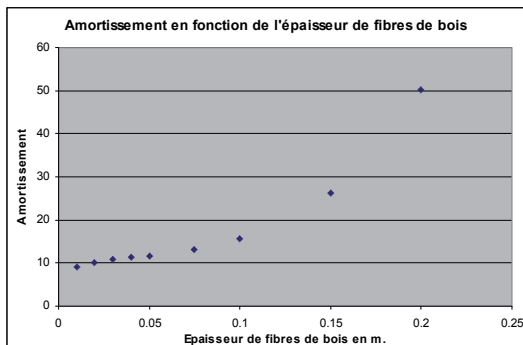
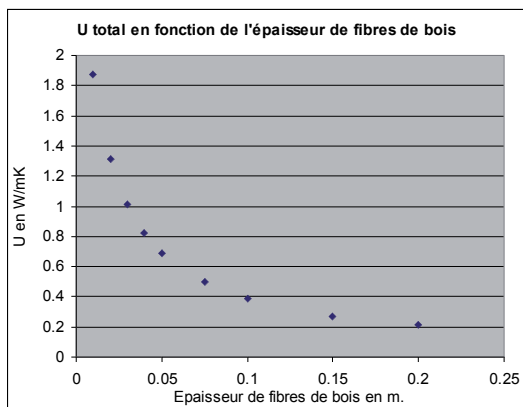
Variante 3
Calcaire + Isolant intérieur (laine de pierre)



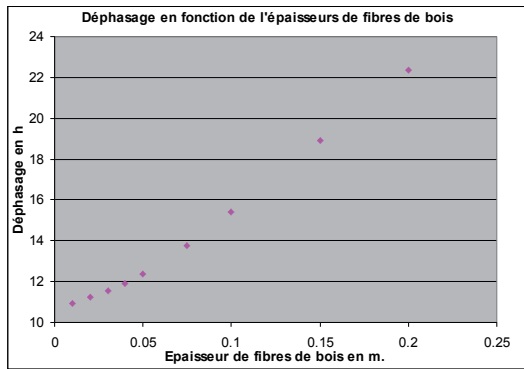
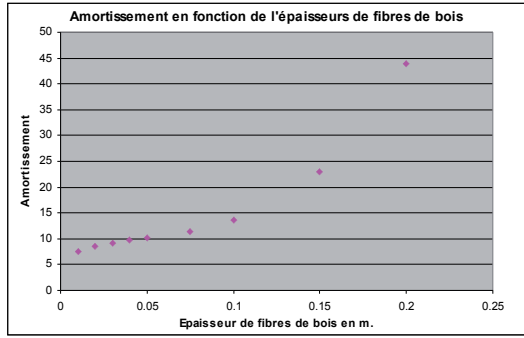
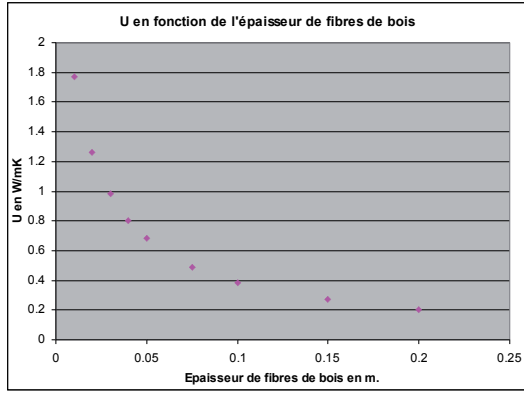
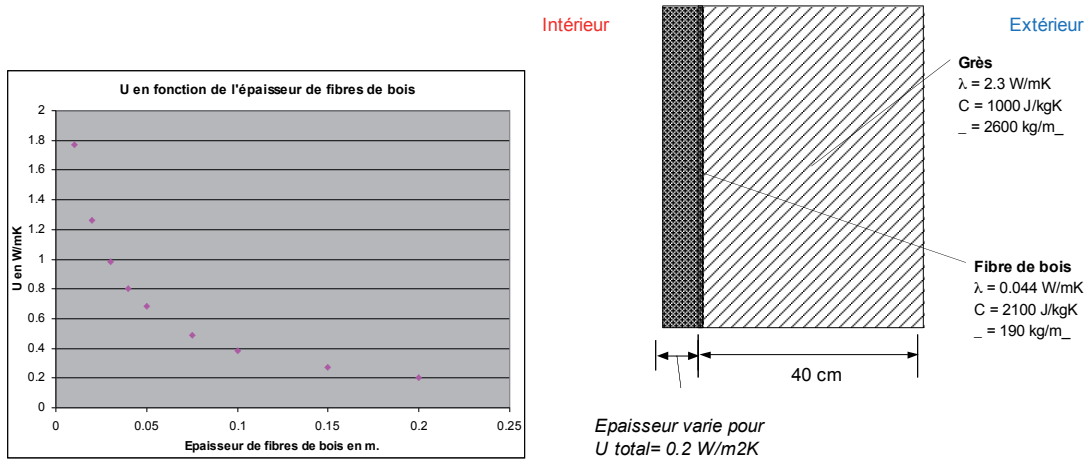
Variante 3
Gneiss + Isolant intérieur (fibres de bois)



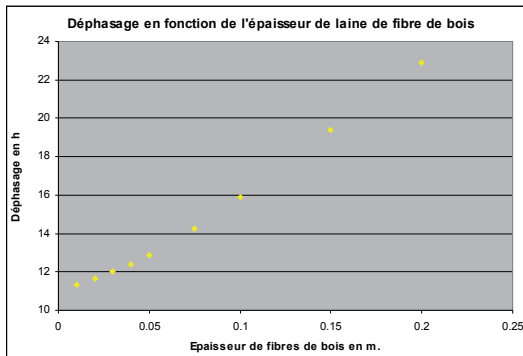
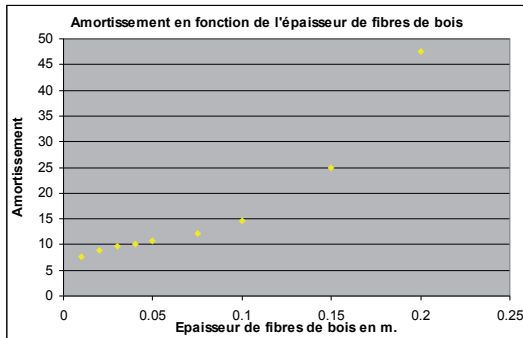
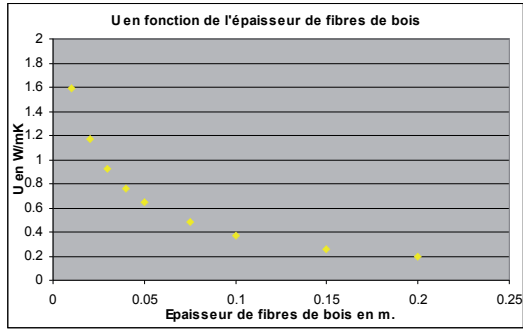
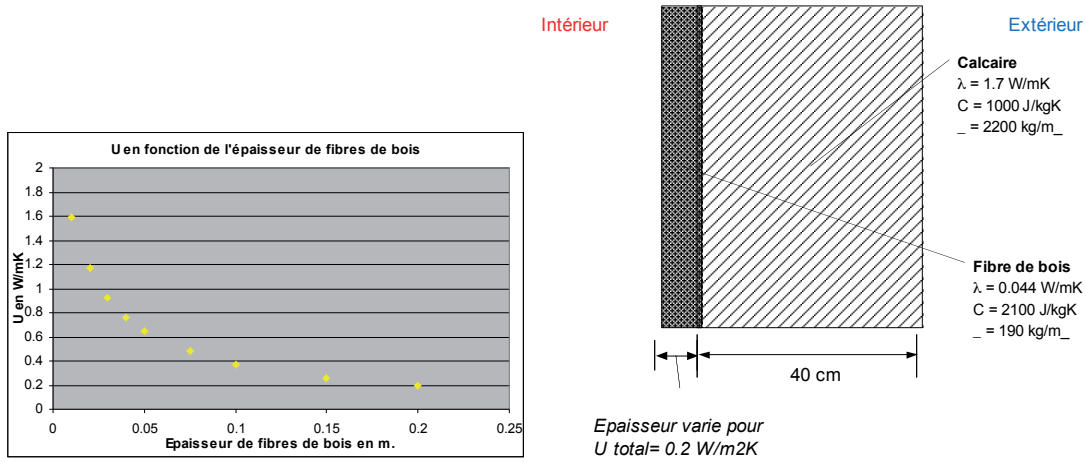
Epaisseur varie pour
 $U_{total} = 0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$



Variante 3
Grès + Isolant intérieur (fibres de bois)



Variante 3
Calcaire + Isolant intérieur (fibres de bois)



INVENTAIRES DE CYCLE DE VIE POUR LA PIERRE NATURELLE MASSIVE

Des Inventaires de Cycle de Vie pour différents éléments en pierre naturelle massive pour la construction ont été réalisés sur la base de ceux présents dans la base de données Ecoinvent (<http://www.ecoinvent.org>), gérée par les Hautes Ecoles Suisses, et qui constitue la référence pour les Inventaires de Cycle de Vie dans notre pays.

Les éléments analysés sont: le bloc en gneiss de 220x55x110 cm; le bloc en gneiss de 120x30x60 cm; le bloc en calcaire de 120x30x60 cm; le bloc en grès de 120x30x60 cm et celui en grès coquillier de 120x30x60 cm.

Nous remercions le comité Ecoinvent pour nous avoir permis d'accéder à sa base de données pendant les années 2009 et 2010.

Nous remercions également: Hans-Joerg Althaus, de l'EMPA de Dübendorf; Chris Foster; Annelore Kleijer et Stéphane Citherlet, de l'HEIG-VD d'Yverdon-les-Bains; Craig Jones de l'University of Bath; François Marechal, de l'EPFL Lausanne; Cecilia Matasci, doctorante à l'EPFL de Lausanne; Grégory Simonnin, de l'entreprise Eointesys Lausanne.

PROCESSUS DE PRODUCTION ET INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE POUR ELEMENTS MASSIFS EN PIERRE NATURELLE

Le présent document est basé sur: Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künninger T., Lehmann M. and Thalmann P. (2007) *Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No.7*. EMPA Dübendorf, Swiss Centre of Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Description de l'élément

Nom	Bloc en gneiss 220x110x55		
Dimensions (m)	Longueur	largeur	Epaisseur
	2,2	1,1	0,55
Densité de la roche	2650 kg/m ³		
Poids d'un élément	3527 kg		
L'unité de référence est le	kg		

1. Emissions dans l'air

Les émissions dans l'air sont constituées surtout par des poussières. Il est assumé que seulement 5% de ces poussières est réellement libéré dans l'air, le restant 95% est fixé dans l'eau de refroidissement. La quantité totale de poussières émises par l'extraction et la découpe est assumée comme étant égal à celle de la découpe.

L'épaisseur de découpage est assumé à: 0,0010 m

Volume de poussière produite 0,0036 m³
[Epaisseur découpe*((E*L)*2+(E*I)*2)]

Quantité de poussière par kg de pierre produit 0,00273 kg/kg pierre
dont 5% émise dans l'air 0,00014 kg/kg pierre

Granulométrie des poussières

15% des particules >10µm; 55% <10µm et >2.5µm et 30%<2.5µm

particules>10µm 0,000020 kg
particules<10µm et >2.5µm 0,000075 kg
particules<2.5µm 0,000041 kg

2. Consommation énergétique

Consommation énergétique de l'industrie de la pierre naturelle selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Il est assumé que 70% de l'énergie utilisée par les machines dans la production; 10% pour la production d'air comprimée; 10% pour le pompage de l'eau et 10% pour d'autres activités.

Consommation totale 0,8 kWh/kg pierre
de ceci 30% est consommé par l'extraction; 40% par la découpe et le 30% restant par les traitements de surface

Energie extraction 0,24 kWh/kg pierre
Energie découpe 0,32 kWh/kg pierre

Il est assumé que toute l'énergie électrique est transformée en énergie thermique (1 kWh = 3.6 MJ)

3. Consommation de carburant diesel à l'intérieur de la carrière

Consommation en carburant diesel selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Consommation totale de 0.05 l par kg de pierre naturelle produit, dont 0.03 l pour l'extraction; 0.01 l pour découpe et 0.01 l pour les traitements de surface.

Valeur énergétique nette	42,8 MJ/kg
Densité	0,84 kg/l

Source: Jungbluth N. (2007) *Erdöl*. In: "Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz" (Ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6-IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Energie dégagée	1,08 MJ
-----------------	---------

4. Transport carrière-stockage (chantier)

Transport à l'intérieur de la suisse sur une distance de 300km avec un camion de 24t

0.3 tkm

5. Consommation d'eau

Pour la découpe au fil diamanté 20l d'eau par minute sont nécessaires.
La surface découpée est de 4m² par heure (ce qui signifie 0.067 m²/min).

Quantité d'eau consommé par kg de pierre	0,2 l/kg
--	----------

6. Pièces de rechange

Calcul de la quantité de diamant consommé par la découpe par kg de pierre

Durée de vie d'un fil diamanté: 12m² de découpe par m de longueur.

La surface de découpe d'un élément est 2,42 m²

Donc il possible de découper 17490 kg

Le fil est équipé avec 40 diamants par mètre.

Le poids d'un diamant est 0,00068 kg

Le quantité de diamant consommé est 0,0000016 kg/kg pierre

TABLEAU RÉCAPITULATIFS DES ÉCHANGES

Input	Output	Catégorie	Valeur	Unité	
Pierre dans gisement		ressource	1,3	kg	env. 30% de chutes en extraction
Electricité pour extraction		électricité	0,24	kWh	
Electricité pour découpe		électricité	0,32	kWh	
Transport en carrière		processus de construction	1,08	MJ	
Transport carrière-stockage		transport	0.3	tkm	
Eau		ressource	0,2	l	
Pertes en diamants			0,0000016	kg	
Infrastructure		matériau de construction	0,000000001		
	Energie	air	2,02	MJ	
	Poussières >10µm	air	2,05E-05	kg	
	Poussières <10µm>2.5µm	air	7,50E-05	kg	
	Poussières <2.5µm	air	4,09E-05	kg	
	Eau usée		0,2	l	même valeur que pour input
	Élément pierre	matériau de construction	1	kg	

PROCESSUS DE PRODUCTION ET INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE POUR ELEMENTS MASSIFS EN PIERRE NATURELLE

Le présent document est basé sur: Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künninger T., Lehmann M. and Thalmann P. (2007) *Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No.7*. EMPA Dübendorf, Swiss Centre of Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Description de l'élément

Nom	Bloc en gneiss 120x60x30		
Dimensions (m)	Longueur	largeur	Epaisseur
	1,2	0,6	0,3
Densité de la roche	2750 kg/m ³		
Poids d'un élément	594 kg		
L'unité de référence est le	kg		

1. Emissions dans l'air

Les émissions dans l'air sont constituées surtout par des poussières. Il est assumé que seulement 5% de ces poussières est réellement libéré dans l'air, le restant 95% est fixé dans l'eau de refroidissement. La quantité totale de poussières émises par l'extraction et la découpe est assumée comme étant égal à celle de la découpe.

L'épaisseur de découpage est assumé à: 0,0010 m

Volume de poussière produite par la découpe des 4 côtés:
[Epaisseur découpe*(E*L)*2+(E*I)*2] 0,0011 m³

Quantité de poussière par kg de pierre produit 0,00500 kg/kg pierre
dont 5% émise dans l'air 0,00025 kg/kg pierre

Granulométrie des poussières

15% des particules >10µm; 55% <10µm et >2.5µm et 30%<2.5µm

particules>10µm 0,000038 kg
particules<10µm et >2.5µm 0,000138 kg
particules<2.5µm 0,000075 kg

2. Consommation énergétique

Consommation énergétique de l'industrie de la pierre naturelle selon www.energie.ch
(<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Il est assumé que 70% de l'énergie utilisée par les machines dans la production; 10% pour la production d'air comprimée; 10% pour le pompage de l'eau et 10% pour d'autres activités.

Consommation totale 0,8 kWh/kg pierre
de ceci 30% est consommé par l'extraction; 40% par la découpe et le 30% restant par les traitements de surface

Energie extraction 0,24 kWh/kg pierre
Energie découpe 0,32 kWh/kg pierre

Il est assumé que toute l'énergie électrique est transformée en énergie thermique (1 kWh = 3.6 MJ)

3. Consommation de carburant diesel à l'intérieur de la carrière

Consommation en carburant diesel selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Consommation totale de 0.05 l par kg de pierre naturelle produit, dont 0.03 l pour l'extraction; 0.01 l pour découpe et 0.01 l pour les traitements de surface.

Valeur énergétique nette	42,8 MJ/kg
Densité	0,84 kg/l

Source: Jungbluth N. (2007) *Erdöl*. In: "Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz" (Ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6-IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Energie dégagée	1,08 MJ
-----------------	---------

4. Transport carrière-stockage (chantier)

Transport à l'intérieur de la suisse sur une distance de 300km avec un camion de 24t

0.3 tkm

5. Consommation d'eau

Pour la découpe au fil diamanté 20l d'eau par minute sont nécessaires.
La surface découpée est de 4m² par heure (ce qui signifie 0.067 m²/min).

Quantité d'eau consommé par kg de pierre	0,36 l/kg
--	-----------

6. Pièces de rechange

Calcul de la quantité de diamant consommé par la découpe par kg de pierre

Durée de vie d'un fil diamanté: 12m² de découpe par m de longueur.

La surface de découpe d'un élément est 0,72 m²

Donc il possible de découper 9900 kg

Le fil est équipé avec 40 diamants par mètre.

Le poids d'un diamant est 0,00068 kg

Le quantité de diamant consommé est 0,0000027 kg/kg pierre

TABLEAU RÉCAPITULATIFS DES ÉCHANGES

Input	Output	Catégorie	Valeur	Unité	
Pierre dans gisement		ressource	1,3	kg	env. 30% de chutes en extraction
Electricité pour extraction		électricité	0,24	kWh	
Electricité pour découpe		électricité	0,32	kWh	
Transport en carrière		processus de construction	1,08	MJ	
Transport carrière-stockage		transport	0.3	tkm	
Eau		ressource	0,36	l	
Pertes en diamants			0,0000027	kg	
Infrastructure		matériau de construction	0,000000001		
	Energie	air	2,02	MJ	
	Poussières >10µm	air	0,000038	kg	
	Poussières <10µm>2.5µm	air	0,000138	kg	
	Poussières <2.5µm	air	0,000075	kg	
	Eau usée		0,36	l	même valeur que pour input
	Élément pierre	matériau de construction	1	kg	

PROCESSUS DE PRODUCTION ET INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE POUR ELEMENTS MASSIFS EN PIERRE NATURELLE

Le présent document est basé sur: Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künninger T., Lehmann M. and Thalmann P. (2007) *Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No.7*. EMPA Dübendorf, Swiss Centre of Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Description de l'élément

Nom	Bloc en calcaire 120x60x30		
Dimensions (m)	Longueur	largeur	Epaisseur
	1,2	0,6	0,3
Densité de la roche	2680 kg/m ³		
Poids d'un élément	579 kg		
L'unité de référence est le	kg		

1. Emissions dans l'air

Les émissions dans l'air sont constituées surtout par des poussières. Il est assumé que seulement 5% de ces poussières est réellement libéré dans l'air, le restant 95% est fixé dans l'eau de refroidissement. La quantité totale de poussières émises par l'extraction et la découpe est assumée comme étant égal à celle de la découpe.

L'épaisseur de découpage est assumé à: 0,0010 m

Volume de poussière produite 0,0011 m³
[Epaisseur découpe*((E*L)*2+(E*I)*2)]

Quantité de poussière par kg de pierre produit 0,00500 kg/kg pierre
dont 5% émise dans l'air 0,00025 kg/kg pierre

Granulométrie des poussières

15% des particules >10µm; 55% <10µm et >2.5µm et 30%<2.5µm

particules>10µm 0,000038 kg
particules<10µm et >2.5µm 0,000138 kg
particules<2.5µm 0,000075 kg

2. Consommation énergétique

Consommation énergétique de l'industrie de la pierre naturelle selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Il est assumé que 70% de l'énergie utilisée par les machines dans la production; 10% pour la production d'air comprimée; 10% pour le pompage de l'eau et 10% pour d'autres activités.

Consommation totale 0,8 kWh/kg pierre
de ceci 30% est consommé par l'extraction; 40% par la découpe et le 30% restant par les traitements de surface

Energie extraction 0,24 kWh/kg pierre
Energie découpe 0,32 kWh/kg pierre

Il est assumé que toute l'énergie électrique est transformée en énergie thermique (1 kWh = 3.6 MJ)

3. Consommation de carburant diesel à l'intérieur de la carrière

Consommation en carburant diesel selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Consommation totale de 0.05 l par kg de pierre naturelle produit, dont 0.03 l pour l'extraction; 0.01 l pour découpe et 0.01 l pour les traitements de surface.

Valeur énergétique nette	42,8 MJ/kg
Densité	0,84 kg/l

Source: Jungbluth N. (2007) *Erdöl*. In: "Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz" (Ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6-IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Energie dégagée	1,08 MJ
-----------------	---------

4. Transport carrière-stockage (chantier)

Transport à l'intérieur de la suisse sur une distance de 300km avec un camion de 24t

0.3 tkm

5. Consommation d'eau

Pour la découpe au fil diamanté 20l d'eau par minute sont nécessaires.
La surface découpée est de 4m² par heure (ce qui signifie 0.067 m²/min).

Quantité d'eau consommé par kg de pierre	0,37 l/kg
--	-----------

6. Pièces de rechange

Calcul de la quantité de diamant consommé par la découpe par kg de pierre

Durée de vie d'un fil diamanté: 12m² de découpe par m de longueur.

La surface de découpe d'un élément est 0,72 m²

Donc il possible de découper 9648 kg

Le fil est équipé avec 40 diamants par mètre.

Le poids d'un diamant est 0,00068 kg

Le quantité de diamant consommé est 0,0000028 kg/kg pierre

TABLEAU RÉCAPITULATIFS DES ÉCHANGES

Input	Output	Catégorie	Valeur	Unité	
Pierre dans gisement		ressource	1,3	kg	env. 30% de chutes en extraction
Electricité pour extraction		électricité	0,24	kWh	
Electricité pour découpe		électricité	0,32	kWh	
Transport en carrière		processus de construction	1,08	MJ	
Transport carrière-stockage		transport	0.3	tkm	
Eau		ressource	0,37	l	
Pertes en diamants			0,0000028	kg	
Infrastructure		matériau de construction	0,000000001		
	Energie	air	2,02	MJ	
	Poussières >10µm	air	0,000038	kg	
	Poussières <10µm>2.5µm	air	0,000138	kg	
	Poussières <2.5µm	air	0,000075	kg	
	Eau usée		0,37	l	même valeur que pour input
	Élément pierre	matériau de construction	1	kg	

PROCESSUS DE PRODUCTION ET INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE POUR ELEMENTS MASSIFS EN PIERRE NATURELLE

Le présent document est basé sur: Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künninger T., Lehmann M. and Thalmann P. (2007) *Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No.7*. EMPA Dübendorf, Swiss Centre of Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Description de l'élément

Nom	Bloc en grès calcaire 120x60x30		
Dimensions (m)	Longueur	largeur	Epaisseur
	1,2	0,6	0,3
Densité de la roche	2502 kg/m3		
Poids d'un élément	540 kg		
L'unité de référence est le	kg		

1. Emissions dans l'air

Les émissions dans l'air sont constituées surtout par des poussières. Il est assumé que seulement 5% de ces poussières est réellement libéré dans l'air, le restant 95% est fixé dans l'eau de refroidissement. La quantité totale de poussières émises par l'extraction et la découpe est assumée comme étant égal à celle de la découpe.

L'épaisseur de découpage est assumé à: 0,0010 m

Volume de poussière produite 0,0011 m3
[Epaisseur découpe*((E*L)*2+(E*I)*2)]

Quantité de poussière par kg de pierre produit 0,00500 kg/kg pierre
dont 5% émise dans l'air 0,00025 kg/kg pierre

Granulométrie des poussières

15% des particules >10µm; 55% <10µm et >2.5µm et 30%<2.5µm

particules>10µm 0,000038 kg
particules<10µm et >2.5µm 0,000138 kg
particules<2.5µm 0,000075 kg

2. Consommation énergétique

Consommation énergétique de l'industrie de la pierre naturelle selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Il est assumé que 70% de l'énergie utilisée par les machines dans la production; 10% pour la production d'air comprimée; 10% pour le pompage de l'eau et 10% pour d'autres activités.

Consommation totale 0,8 kWh/kg pierre
de ceci 30% est consommé par l'extraction; 40% par la découpe et le 30% restant par les traitements de surface

Energie extraction 0,24 kWh/kg pierre
Energie découpe 0,32 kWh/kg pierre

Il est assumé que toute l'énergie électrique est transformée en énergie thermique (1 kWh = 3.6 MJ)

3. Consommation de carburant diesel à l'intérieur de la carrière

Consommation en carburant diesel selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Consommation totale de 0.05 l par kg de pierre naturelle produit, dont 0.03 l pour l'extraction; 0.01 l pour découpe et 0.01 l pour les traitements de surface.

Valeur énergétique nette	42,8 MJ/kg
Densité	0,84 kg/l

Source: Jungbluth N. (2007) *Erdöl*. In: "Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz" (Ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6-IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Energie dégagée	1,08 MJ
-----------------	---------

4. Transport carrière-stockage (chantier)

Transport à l'intérieur de la suisse sur une distance de 300km avec un camion de 24t

0.3 tkm

5. Consommation d'eau

Pour la découpe au fil diamanté 20l d'eau par minute sont nécessaires.
La surface découpée est de 4m² par heure (ce qui signifie 0.067 m²/min).

Quantité d'eau consommé par kg de pierre	0,4 l/kg
--	----------

6. Pièces de rechange

Calcul de la quantité de diamant consommé par la découpe par kg de pierre

Durée de vie d'un fil diamanté: 12m² de découpe par m de longueur.

La surface de découpe d'un élément est 0,72 m²
Donc il possible de découper 9007,2 kg

Le fil est équipé avec 40 diamants par mètre.

Le poids d'un diamant est 0,00068 kg

Le quantité de diamant consommé est 0,0000030 kg/kg pierre

TABLEAU RÉCAPITULATIFS DES ÉCHANGES

Input	Output	Catégorie	Valeur	Unité	
Pierre dans gisement		ressource	1,3	kg	env. 30% de chutes en extraction
Electricité pour extraction		électricité	0,24	kWh	
Electricité pour découpe		électricité	0,32	kWh	
Transport en carrière		processus de construction	1,08	MJ	
Transport carrière-stockage		transport	0.3	tkm	
Eau		ressource	0,4	l	
Pertes en diamants			0,0000030	kg	
Infrastructure		matériau de construction	0,000000001		
	Energie	air	2,02	MJ	
	Poussières >10µm	air	0,000038	kg	
	Poussières <10µm>2.5µm	air	0,000138	kg	
	Poussières <2.5µm	air	0,000075	kg	
	Eau usée		0,4	l	même valeur que pour input
	Élément pierre	matériau de construction	1	kg	

PROCESSUS DE PRODUCTION ET INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE POUR ELEMENTS MASSIFS EN PIERRE NATURELLE

Le présent document est basé sur: Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künninger T., Lehmann M. and Thalmann P. (2007) *Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No.7*. EMPA Dübendorf, Swiss Centre of Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Description de l'élément

Nom	Bloc en grès coquillier 120x60x30		
Dimensions (m)	Longueur	largeur	Epaisseur
	1,2	0,6	0,3
Densité de la roche	2500 kg/m3		
Poids d'un élément	540 kg		
L'unité de référence est le	kg		

1. Emissions dans l'air

Les émissions dans l'air sont constituées surtout par des poussières. Il est assumé que seulement 5% de ces poussières est réellement libéré dans l'air, le restant 95% est fixé dans l'eau de refroidissement. La quantité totale de poussières émises par l'extraction et la découpe est assumée comme étant égal à celle de la découpe.

L'épaisseur de découpage est assumé à: 0,0010 m

Volume de poussière produite 0,0011 m3
 [Epaisseur découpe*((E*L)*2+(E*I)*2)]

Quantité de poussière par kg de pierre produit 0,00500 kg/kg pierre
 dont 5% émise dans l'air 0,00025 kg/kg pierre

Granulométrie des poussières

15% des particules >10µm; 55% <10µm et >2.5µm et 30%<2.5µm

particules>10µm 0,000038 kg
 particules<10µm et >2.5µm 0,000138 kg
 particules<2.5µm 0,000075 kg

2. Consommation énergétique

Consommation énergétique de l'industrie de la pierre naturelle selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Il est assumé que 70% de l'énergie utilisée par les machines dans la production; 10% pour la production d'air comprimée; 10% pour le pompage de l'eau et 10% pour d'autres activités.

Consommation totale 0,8 kWh/kg pierre
 de ceci 30% est consommé par l'extraction; 40% par la découpe et le 30% restant par les traitements de surface

Energie extraction 0,24 kWh/kg pierre
 Energie découpe 0,32 kWh/kg pierre

Il est assumé que toute l'énergie électrique est transformée en énergie thermique (1 kWh = 3.6 MJ)

3. Consommation de carburant diesel à l'intérieur de la carrière

Consommation en carburant diesel selon www.energie.ch (<http://www.energie.ch/daten/branchen/naturstein.htm> consulté le 24.06.2009)

Consommation totale de 0.05 l par kg de pierre naturelle produit, dont 0.03 l pour l'extraction; 0.01 l pour découpe et 0.01 l pour les traitements de surface.

Valeur énergétique nette	42,8 MJ/kg
Densité	0,84 kg/l

Source: Jungbluth N. (2007) *Erdöl*. In: "Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz" (Ed. Dones R.). ecoinvent report No. 6-IV, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, CH, Online-Version under: www.ecoinvent.org.

Energie dégagée	1,08 MJ
-----------------	---------

4. Transport carrière-stockage (chantier)

Transport à l'intérieur de la suisse sur une distance de 300km avec un camion de 24t

0.3 tkm

5. Consommation d'eau

Pour la découpe au fil diamanté 20l d'eau par minute sont nécessaires.
La surface découpée est de 4m² par heure (ce qui signifie 0.067 m²/min).

Quantité d'eau consommé par kg de pierre	0,4 l/kg
--	----------

6. Pièces de rechange

Calcul de la quantité de diamant consommé par la découpe par kg de pierre

Durée de vie d'un fil diamanté: 12m² de découpe par m de longueur.

La surface de découpe d'un élément est 0,72 m²

Donc il possible de découper 9000 kg

Le fil est équipé avec 40 diamants par mètre.

Le poids d'un diamant est 0,00068 kg

Le quantité de diamant consommé est 0,0000030 kg/kg pierre

TABLEAU RÉCAPITULATIFS DES ÉCHANGES

Input	Output	Catégorie	Valeur	Unité	
Pierre dans gisement		ressource	1,3	kg	env. 30% de chutes en extraction
Electricité pour extraction		électricité	0,24	kWh	
Electricité pour découpe		électricité	0,32	kWh	
Transport en carrière		processus de construction	1,08	MJ	
Transport carrière-stockage		transport	0.3	tkm	
Eau		ressource	0,4	l	
Pertes en diamants			0,0000030	kg	
Infrastructure		matériau de construction	0,000000001		
	Energie	air	2,02	MJ	
	Poussières >10µm	air	0,000038	kg	
	Poussières <10µm>2.5µm	air	0,000138	kg	
	Poussières <2.5µm	air	0,000075	kg	
	Eau usée		0,4	l	même valeur que pour input
	Élément pierre	matériau de construction	1	kg	

HABITATIONS INDIVIDUELLES EN PIERRE NATURELLE MASSIVE

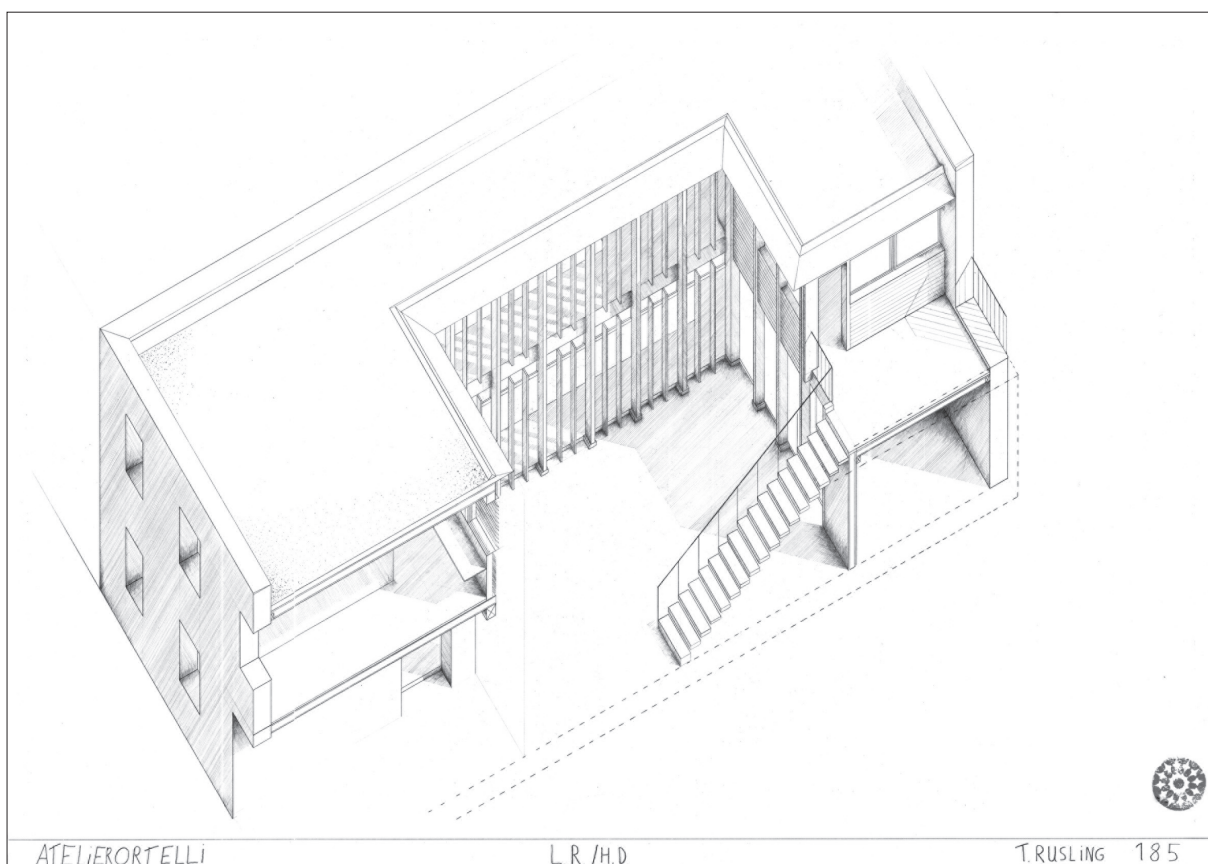
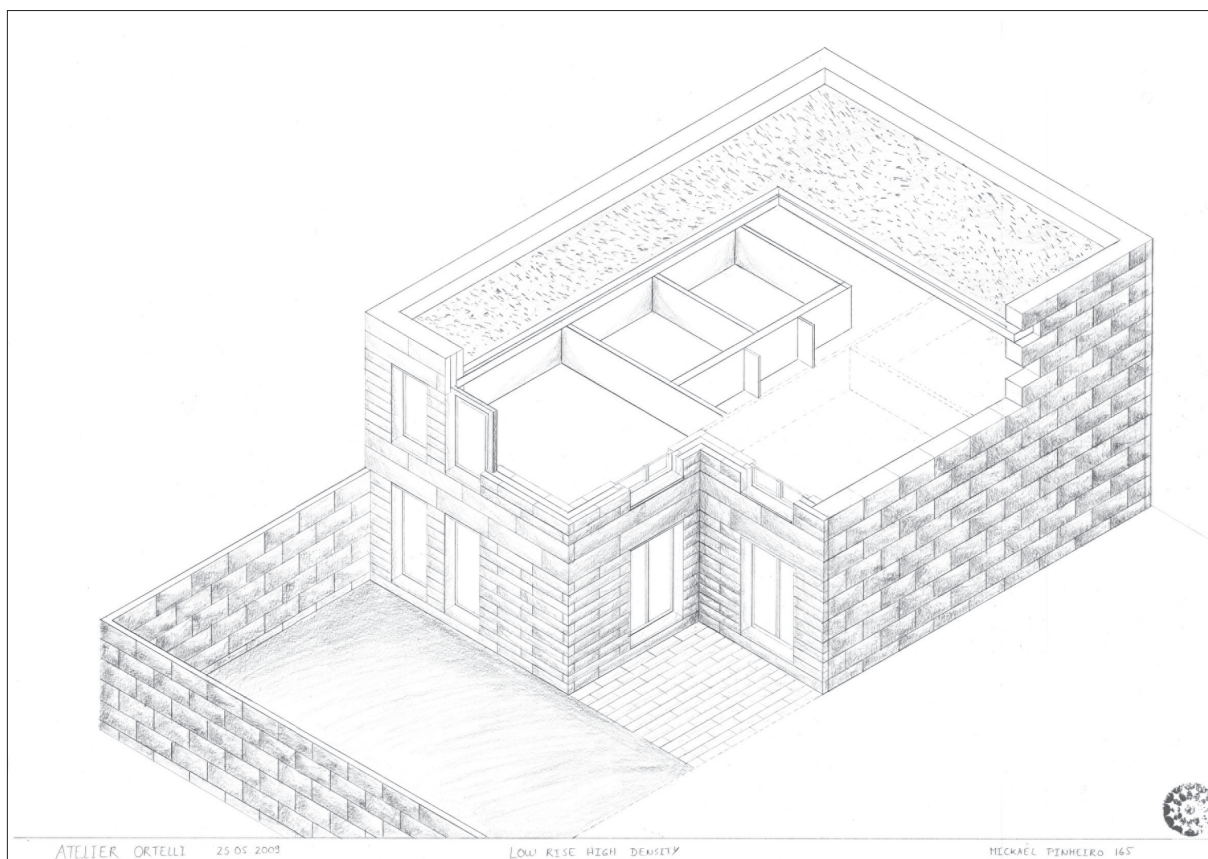
L'enseignement du Prof. Luca Ortelli "Théorie et critique du projet" pour les étudiants d'architecture de la première année (BA 1 et 2), de la Section d'Architecture de la Faculté Enac de l'Epfl de Lausanne, prévoyait, au semestre de printemps, un projet sur le thème de l'habitation individuelle en ordre contigu, appelé "Low Rise - High Density".

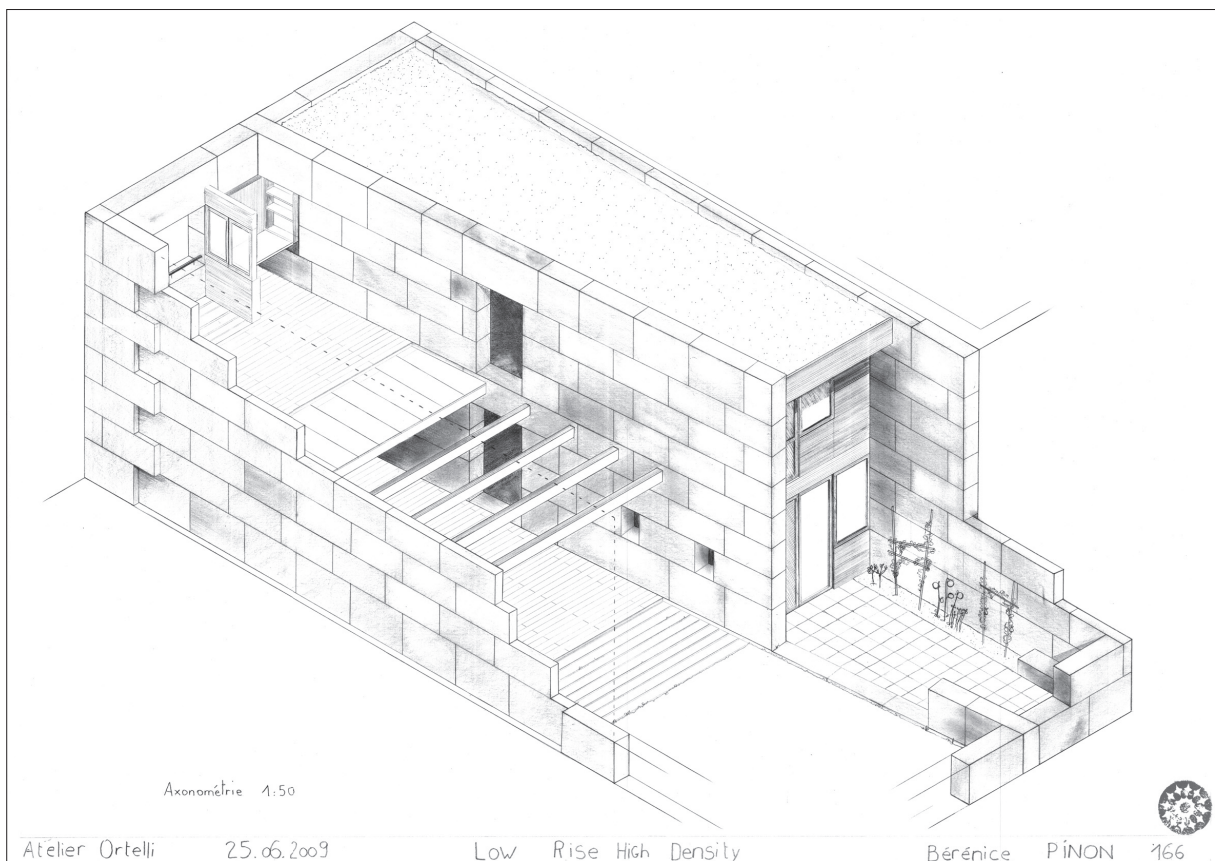
Dans le cadre de ce cours, que j'ai pu suivre en qualité d'assistant depuis 2006, un groupe d'étudiants travaillait sur des projets individuels, la maison, en se donnant un certain nombre de règles communes.

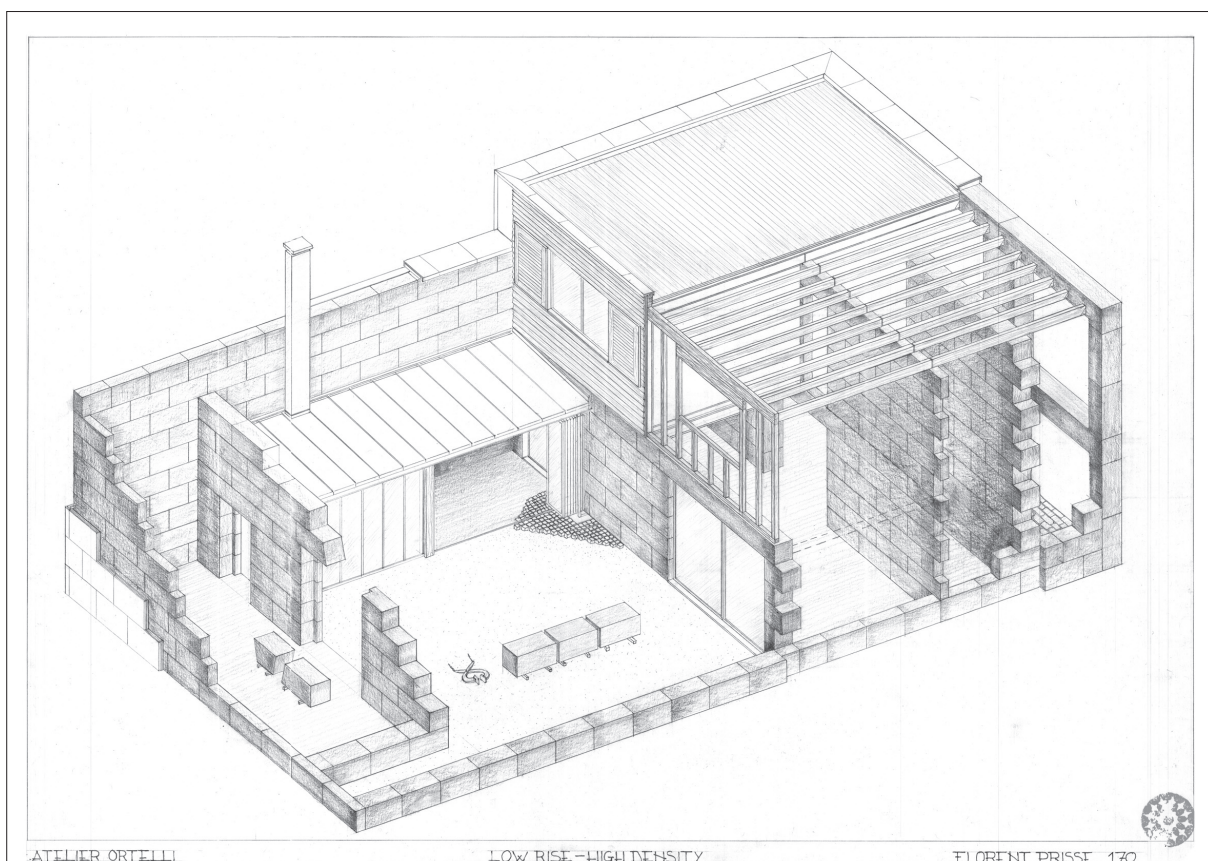
Pendant le semestre de printemps 2009, les étudiants que je suivais me demandèrent de pouvoir se confronter avec l'utilisation de la pierre naturelle de taille. Certains d'entre eux, dont les projets sont présentés ici de suite, travaillèrent sur le thème de son usage massif. Nous montrons leur travaux comme preuve des vertus pédagogiques de ce matériau, qui oblige à respecter ses règles de composition et de construction lors de l'élaboration du projet d'architecture.

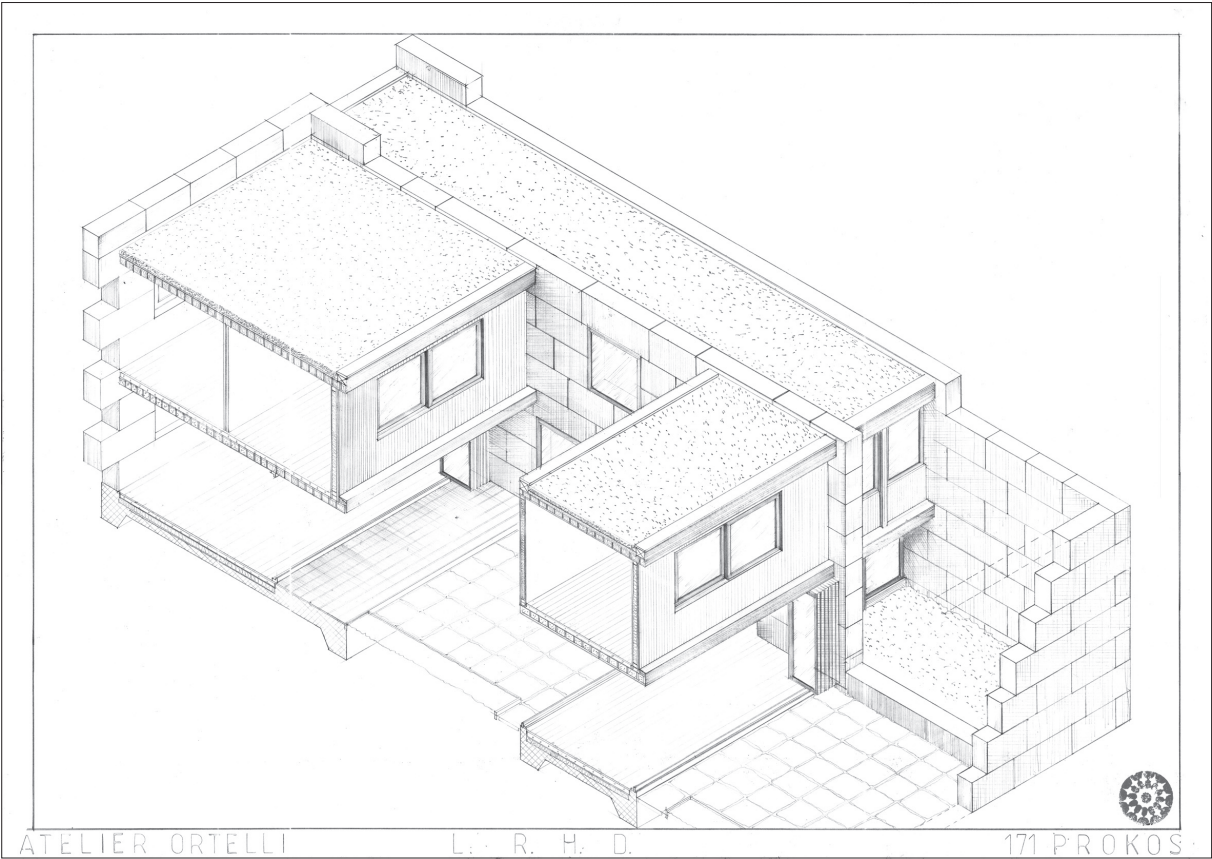
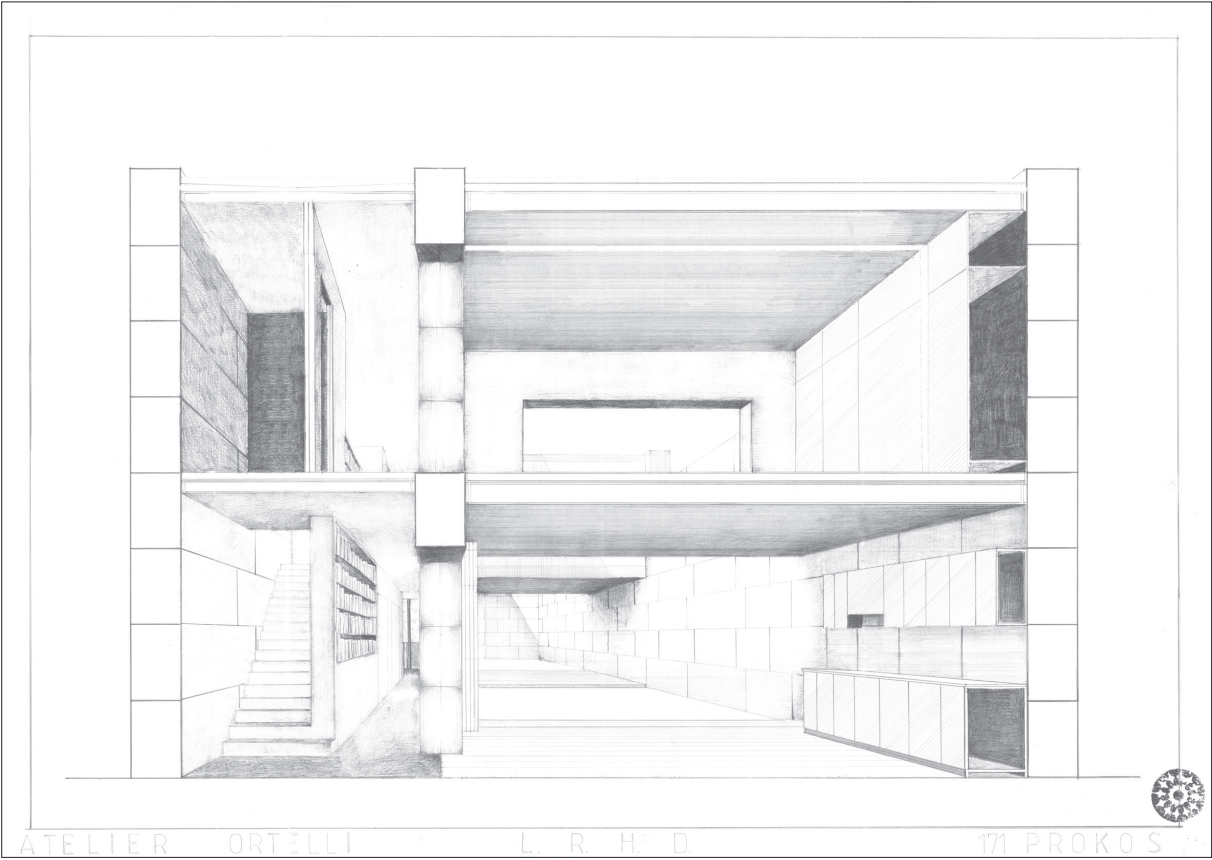
Nous remercions ces étudiants pour leur contribution à notre recherche: Mickaël Pinheiro; Bérénice Pinon; Barbora Pisanova; Simon Pracchinetti; Charlotte Praplan; Florent Prisse; Antonios-Isaak Prokos; Andrea Quaglia; Eva Reka; Mélanie Rouge; Clara Rubin et Thomas Rusling.

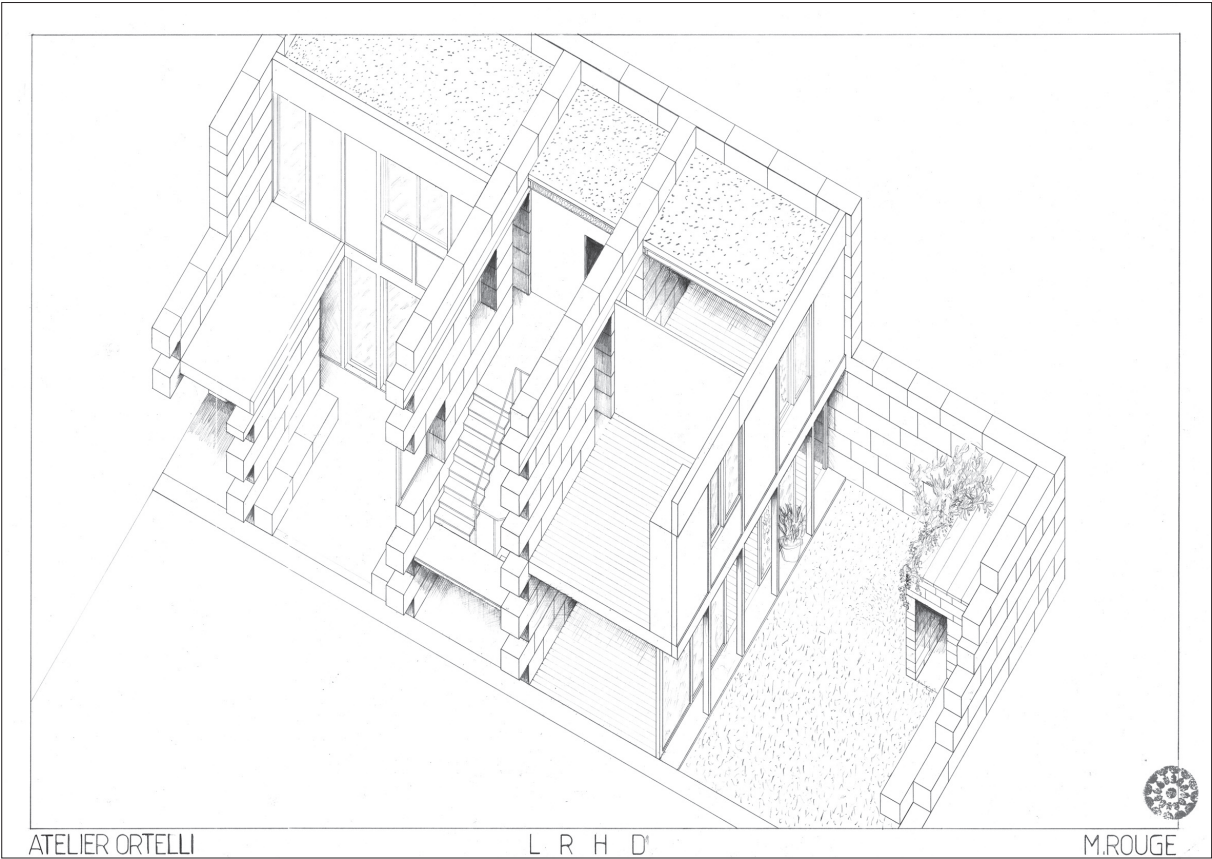
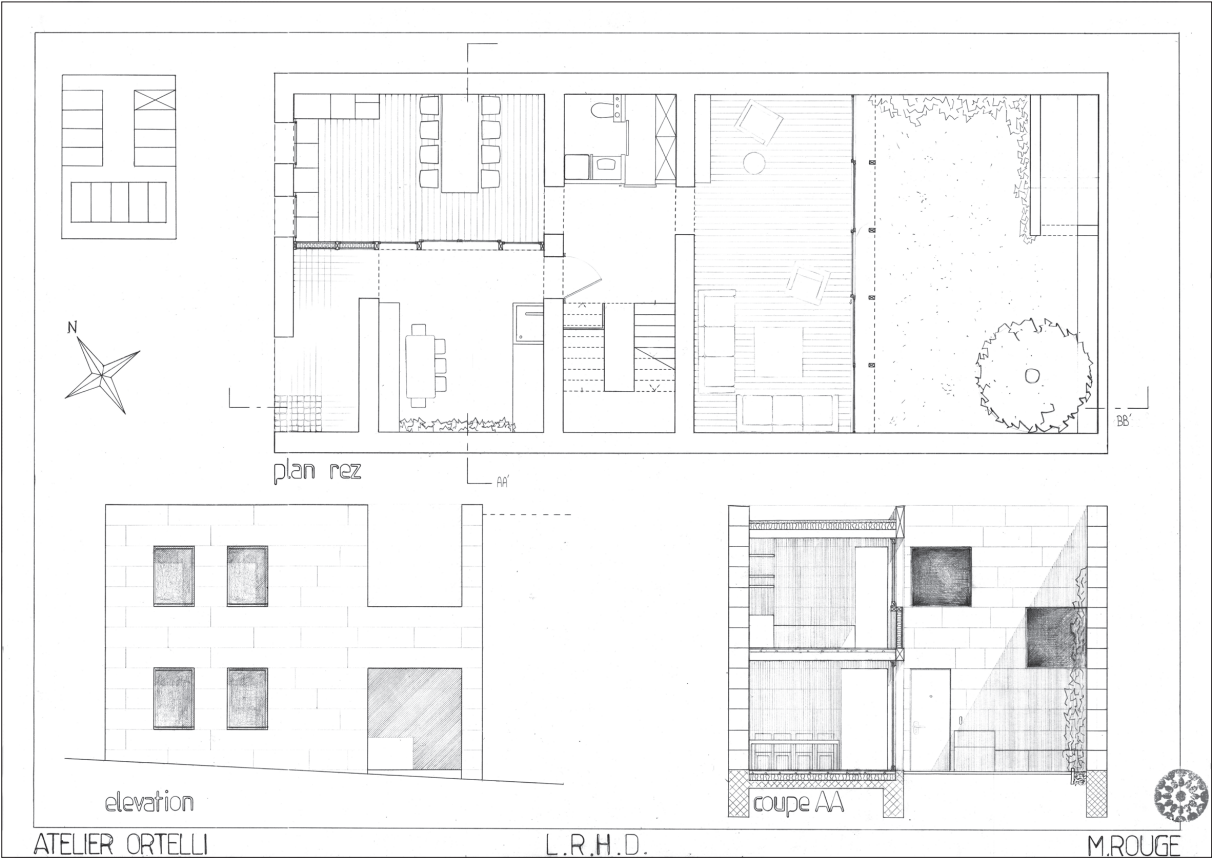
Nous remercions également tous les autres étudiant(e)s de la première année d'architecture qui, entre 2006 et 2010, nous ont permis, chaque semaine, de nous détourner de nos activités de recherche et de nous livrer à la difficile, mais enrichissante, tâche de l'enseignement.











Agglomérat, n.m.

Roche détritique résultant du compactage naturel de morceaux de roches dans un liant quartzeux: les brèches et les poudingues sont des agglomérats. GB: agglomerate.

Agrafage, n.m

Action d'agrafer et mode de fixation par des agrafes. GB: fastening.

Agrafe, n.f.

Accessoire de fixation ou d'assemblage aux nombreuses formes. GB: clip, masonry tie, wall tie, metal cramp, clamp iron, fastener, staple.

Agrafe de pierre de taille: crampon métallique en fer plat à double queue d'aronde, ou en fer carré coudé aux extrémités, servant à solidariser deux pierres d'assise, deux claveaux d'un cintre.

Agrafe de pierre de placage: patte de scellement de revêtements de pierre pelliculaire contre les maçonneries: en fil inoxydable, elles sont fixées à des trous et à des rainures, entrées dans une engravure de pierre à queue d'aronde, ou incluses dans un trou borgne.

Agrégat, n.m.

Assemblage stable des particules du sol naturel. Roche sédimentaire qui résulte d'un assemblage compact de particules de natures différentes: par ex. le granit est un agrégat de feldspath, de mica et de quartz. Par déformation, et par assimilation à l'anglais aggregate, le mot a souvent désigné tout fragment destiné à être mélangé à un mortier pour constituer les granulats d'un béton ou d'un mortier, tels que graviers, gravillons et galets.

En ce sens, le mot granulat est préférable et recommandé, au moins pour les constituants inertes de nature homogène.

Amphibole, n.f.

Nom d'une famille de silicates naturels de minéraux ignés dont la structure cristalline est allongée et lamellaire, et de coloration brune, verte ou noire.

Appareillage, n.m.

Manière de disposer les pierres ou les briques qui composent une maçonnerie. Dessin figurant de la disposition des pierres (syn: calepinage). Se dit aussi de l'ensemble des faux joints qui découpent en panneaux la surface de parement d'un enduit. GB: stonework, masonry design.

Arase, n.f.

Face supérieure dressée ou nivelée d'une assises de pierres ou de briques, d'une semelle de fondations, d'un mur sans couronnement. Pierre ou élément de maçonnerie utilisé pour rectifier l'horizontalité de l'assise supérieure d'un mur. GB: (top) levelling course, crown course.

Assise, n.f.

1. Ensemble des fondations qui assurent la stabilité, l'assiette d'une construction. GB: seating, laying.

2. En maçonnerie, l'assise désigne chacune des rangées horizontales de briques, de moellons, de blocs ou de voussoirs, posés sensiblement au même niveau, et composant un rang homogène d'éléments alignés. GB: course, bed, bedding, layer.

3. En carrière, ensemble des bancs ayant des caractéristiques analogues. GB: bed, stratum.

Banc, n.m.

Dans une carrière de pierre, de marbre, d'ardoise, de sable ..., c'est une couche homogène délimitée par deux délits plus ou moins horizontaux; son épaisseur doit être suffisante pour justifier une exploitation. GB: bed, layer.

Biotite, n.f. -1848; de J.-B. Biot.

Minéralogie. Variété de mica, noire ou vert foncé, présente dans les granites.

Boutisse, n.f

Brique ou moellon dont la plus petite face se présente en parement à la surface de d'un mur. GB: header. Si la boutisse traverse le mur de part en part, c'est alors une boutisse parpaigne, ou un parpaing en boutisse. GB: bonding header.

Brèche, n.f.

Roche naturelle composée d'une agglomération de cailloux anguleux, liés par un ciment calcaire ou siliceux.

Certaines brèches, travaillées comme le marbre, sont susceptibles d'un beau poli. Les plus recherchées sont le grand deuil et le petit deuil (éclats blancs sur fond noir), la brèche d'Aix (fragments jaunes et violets), la brèche de Vérone, la brèche violette, ou abricotine, la brèche de Dourlais (Belgique), etc. GB: breccia.

Calcaire, adj. et n.m. -1751; latin *calcarius*, de *calx* «chaux».

1. Qui contient du carbonate de calcium. Eau calcaire. Pierre calcaire: castine, liais, meulière, travertin, tuf. Géologie. Terrain, roche calcaire, content plus de la moitié de calcite.

2. N.m. Le calcaire: roche sédimentaire constituée de carbonate de calcium. Cipolin, comblanchien, craie.

Ensemble des roches sédimentaires à base de carbonate de calcium (CaCO₃).

Par convention, un matériau calcaire en contient au moins 70%. On reconnaît les calcaires au fait que, sous l'action d'un acide, ils deviennent effervescents. Les dolomies constituent une classe distincte: ce sont des carbonates mixtes (calcium et magnésium). GB: limestone, chalk.

L'origine des roches calcaires est:

-soit organique: calcaires organogènes, accumulations de microanimaux à coquille et végétaux fossilisés, plus ou moins cimentés par un liant naturel: craies, tuffeaux, calcaires tendres à entroques et coquilliers.

-soit chimique: calcaires de précipitation ou de concrétion sous forme de dépôts par les eaux d'infiltration: tufs, travertins, calcaires oolithiques.

-soit détritique: débris rocheux divers, très résistants s'ils sont liés par un ciment calcaire naturel cristallisé: c'est le cas des brèches calcaires.

Les roches calcaires fournissent l'essentiel de la pierre à bâtir; on les classe selon leur difficulté de taille, d'autre part selon leur résistance à l'écrasement, et enfin selon leur aspect.

Calcin, n.m.

Croûte superficielle dure de carbonate de chaux qui se forme par carbonatation à la surface des pierres calcaires, sous l'action de l'air et des intempéries. Sur les surfaces exposées des pierres neuves, l'eau de pluie pénètre sur quelques millimètres de profondeur; le gaz carbonique en dissolution dans l'eau se combine avec le carbonate de chaux de la pierre, puis, lors de son évaporation, l'eau dépose ce carbonate à l'orifice des capillaires ou pores superficiels de la pierre; ainsi se forme peu à peu une pellicule dure et protectrice, le calcin. Lorsqu'il est sain, on doit éviter de l'éliminer par un ravalement mécanique de pierre (grattage, sablage, etc.). Le phénomène de formation de calcin n'est fâcheux que dans le cas de pierres trop poreuses: dans ce cas, si l'eau entrée par une face tend à cheminer vers d'autres faces de la pierre, il risque de s'y former du calcin qui enfermera l'humidité; la poussée de l'eau ainsi enfermée risque de provoquer ensuite un délaminage superficiel, ou exfoliation. GB: cullet.

Clivage, n.m.

Rupture d'un minéral fissile suivant son plan de cassure naturel le plus favorable (dit plan de clivage). Le clivage de certains minéraux ou roches (ardoise, mica) se fait en feuillets minces, ou clivures. GB: cleavage.

Commissure, n.f.

Joint creux entre deux pierres de taille. GB: recessed joint (between stones).

Conglomérat, n.m.

Roche sédimentaire composée de débris de roches, galets, etc., liés par un cimentage naturel. Si les cailloux constituants sont arrondis et de petit format, la roche est dite poudingue. Brèches et poudingues sont des conglomérats. GB: conglomerate.

Délit, n.m.

Plan transversal à la direction générale des lits d'un banc de carrière de pierre ou d'un minéral quelconque. Cassure plus ou moins franche traversant une veine ou un banc. Face d'une pierre perpendiculaire à son lit de carrière. GB: wrong bed.

En délit: "état d'une dalle ou d'un morceau massif scié perpendiculairement aux lits de carrière" (déf. AFNOR). Opp: à passe, en lit. GB: contrary to the stratum.

Poser en délit: c'est placer une pierre sur son délit, de sorte que l'axe de son lit de carrière se trouve vertical; la pose en délit doit être évitée, car les pierres ont une moindre résistance aux compressions dans la direction de leur lit. Syn: pose en contre-lit, ou en contre-passe. GB: to bed stones on the

wrong bed.

Diabase, n.f.

Roche endogène verdâtre, compacte, voisine du gabbro ou de la syénite.

Diorite, n.f.

Roche vert sombre à feldspath, proche de la syénite, contenant du mica et de l'amphibole.

Égriser, v.tr.

Donner à la pierre un parement très plan par ponçage, préalablement à l'adoucissage et au polissage.

GB: to grind off.

Une surface égrisée est "une surface unie, couverte cependant de fines rayures de direction quelconque, et d'une profondeur de 0,5 à 1mm" (déf. AFNOR).

Endogène, adj.

En géologie, qualifie une roche, telle que le basalte, le granit ou le gabbro, dont la cohésion ou la cristallisation s'est effectuée par refroidissement, ou sous une forte pression, sans l'apport de ciments naturels ou d'éléments extérieurs. GB: endogen.

Épannelage ou **Épannellement**, n.m.

Dégrossissage progressif d'un bloc de pierre à ouvrager (douelle, ravalement, moulures...); ébauche grossière de ces reliefs, en ménageant les marges d'épaisseur voulues pour les opérations ultérieures de finissage, par sculpture, moulurage ou bossage. GB: rough cut, roughing out.

Façonnage, n.m.

Mise en forme manuelle et en en général progressive d'un élément quelconque: par ex., cintrage d'un tuyau, découpe et pliage de feuilles métalliques de couverture, mise en forme des armatures d'un ouvrage de béton, réalisation d'une moulure en plâtre...

En carrière, le façonnage est la taille des blocs de pierre visant à leur donner des formes ou des formats commercialisables. Désigne aussi la taille des pavés.

GB: working, forming, shaping...

Feldspath, n.m. -1773; mot allemand «spath des champs (Feld)».

Minéralogie. Alumino-silicate cristallin de calcium, de sodium ou de potassium, qui entre dans la composition de nombreuses roches minérales telles que le granit, le porphyre, etc. L'argile provient de la décomposition de roches feldspathiques (l'argile contient parfois des cristaux de feldspath non décomposés qui constituent des impuretés). Selon leur composition, les feldspaths prennent les noms d'albite, andésine, anorthite, labrador (feldspaths calcosodiques), orthose (potassium), etc. GB: felspar, feldspar.

Gabbro, n.m.

Roche dense, grenue et mouchetée de vert. Les gabbros ont l'aspect du granit, mais ne contiennent pas de quartz.

Gneiss, n.m. -1779; allemand Gneis.

Géologie minéralogie. Roche minérale sédimentaire (parfois endogène) composée de quartz, de feldspath, de minéraux lourds et de micas blancs et/ou noirs; il ne diffère du granit que par sa disposition en strates plus ou moins nettes; il sert, comme le granit, de pierre de construction.

Granit, n.m. Variante didactique Granite -1611; italien granito «grenu».

Roche endogène dure à structure cristalline, composée de feldspath, quartz et mica. Assez peu dense ($d < 3$), le granit est noir, gris moucheté ou rose ou, plus rarement, verdâtre ou rouge.

Les granulites sont des granits qui comportent deux couleurs distinctes de mica.

Sans être stratifiés (contrairement au gneiss), les granits présentent cependant des plans de taille préférentiels.

Selon les proportions respectives de leurs constituants, on distingue quatre familles principales de roches granitiques:

-le granite (parfois la granite) proprement dit, qui contient la plus forte proportion de quartz; il est de ce fait le plus difficile à travailler. Il est blanc à gris-clair bleuté, parfois marqué d'altérations orangées.

-la diorite, caractérisée par une forte proportion de quartz, d'amphibole et de biotite; ses tonalités sont assez foncées.

-la syénite qui, contenant moins de quartz, se travaille plus facilement; ses tonalités sont plus foncées que celles du granit, et elle peut être gris rougeâtre.

Une variété, le labrador, a des moirages caractéristiques blancs, verts et bleus.

-le gabbro, facile à travailler car contenant très peu ou pas de quartz, mais une forte proportion de feldspath; ses tonalités sont toujours sombres.

Granulat, n.m.

Tout constituant inerte d'un mortier ou d'un béton est appelé granulat (plutôt que agrégat, qui est l'appellation ancienne). Selon leurs dimensions, les granulats du béton prennent les noms de cailloux, de gravillons (ou graviers), de sables ou de fillers. GB: aggregate.

Grès, n.m. –vers 1223: «bloc de pierre» 1175; fréquemment «gravier».

1. Roche sédimentaire composée de grains de silice agglomérés par cémentation naturelle (ciment siliceux, argileux ou calcaire). GB: sandstone, gritstone.

Difficile à scier mais assez facile à tailler en moellons, le grès fournit une bonne pierre de construction, et la plupart des pavés de voirie (grès siliceux de Fontainebleau).

La couleur va du gris bleuté au beige.

Parmi les variétés, citons la quartzite (grès compact de quartz), la molasse (grès calcaire argilo-marneux), le grès des Vosges roses ou roux (présence d'oxyde de fer).

2. (1330) Terre glaise mêlée de sable fin dont on fait des poteries.

Liaison, n.f.

Mortier de jointoiment d'un ouvrage en brique, pierres, parpaings, etc.

Une maçonnerie en liaison désigne un appareillage dans lequel chaque joint vertical tombe exactement au milieu du bloc ou de la pierre du lit inférieur. Syn: appareil plein-sur-joint. GB: staggered joints, bonded masonry.

Lit, n.m.

1. Couche horizontale et homogène d'un matériau: lit de briques, lit de sable, lit de mortier, ... GB: bed, bedding, layer.

2. Face horizontale inférieure, ou lit de pose, ou face de lit (GB: bed face) et face horizontale supérieure, ou lit d'attente (GB: top face) d'une pierre de taille, d'un moellon équarri ou d'un bloc maçonné. Le joint de lit d'une maçonnerie est un joint d'assise horizontal.

Marbre, n.m. -1050; latin marmor.

1. Roche métamorphique dérivée de calcaires ou de dolomies, souvent veinée de couleurs variées et pouvant prendre un beau poli. Brocatelle, carrare, cipolin, griotte, ophite, paros, turquin.

2. Bloc, objet de marbre.

Marne, n.f.

Mélange d'argile et de calcaire à l'état naturel, de faible cohésion.

Si le taux de calcaire est inférieur à 10%, la marne est dite argileuse, et peut alors être utilisée pour la fabrication de briques et poteries courantes. GB: marl.

Meulière, n.f. et adj.

Pierre dure, caverneuse, légère et inaltérable, à base de silex ou de silicate de chaux, sans calcaire.

Les meulières, extraites surtout dans le Bassin parisien, sont utilisées comme pierres à bâtir à l'état brut, leur taille ou leur sciage étant à peu près impossibles, vu leur dureté.

Leur imperméabilité les destinait autrefois surtout aux murs de fondations et de soubassement; le début du 20^e siècle a vu leur utilisation massive, en opus incertum, pour les murs en élévations de dizaines de milliers de pavillons, surtout dans la région parisienne, souvent en maçonnerie composite, en association avec la brique. Syn: molaire. GB: gritstone.

Mica, n.m. -1735; latin mica «parcelle».

Silico-aluminate feuilleté qui se détache facilement, par clivage, en petites paillettes flexibles à reflets métalliques plus ou moins colorés. GB: mica.

Le mica est présent dans de nombreuses roches, en particulier les micaschistes, les granits et les sables ou grès de désagrégation granitique.

Très résistant à la chaleur, le mica a longtemps été utilisé, en larges plaquettes, comme vitrage translucide des portes de fours et de poêles (GB: muscovy glass) et, sous forme de paillettes, comme isolant thermique en vrac. (GB: mica flakes).

C'est aussi l'un des meilleures isolants électriques.

Micaschiste, n.m.

Roche cristalline lamellaire et feuilletée, composée de quartz et de mica blanc et/ou noir. Les

micaschistes composent souvent une couche géologique intermédiaire entre les couches de schistes et celles de gneiss. GB: mica shist.

Molasse ou Mollasse, n.f.

1. Pierre proche du grès, de formation sédimentaire détritique, utilisée comme pierre à bâtir surtout dans le Sud-Est de la France et en Suisse. La particularité de cette pierre est le fait que son exposition prolongée à l'air la rend très dure.

Certaines qualités de molasse sont gélives. GB: molasse, sandstone.

2. Veine terreuse constituant un défaut dans une pierre calcaire.

Monolithe ou monolithique, adj.

Fait d'un seul bloc de pierre de taille ou de marbre: linteau monolithe. On dit aussi monobloc. GB: monolithic.

Muscovite, n.f.

Variété de mica blanc en paillettes, qui entre dans la composition des granits. GB: (white) muscovite.

Oolithique, adj.

Qualifie une roche composée de petits grains de calcaire arrondis, gros comme des œufs de poisson (les oolithes), liés par un ciment calcaire naturel. GB: oolitic (limestone).

Panneresse, n.f.

Désigne une brique ou une pierre dont la face intermédiaire entre la plus grande et la plus petite forme parement, par opp. au carreau, dont la plus grande face est disposée en parement, à la boutisse, dont la plus petite face est le parement. GB: stretcher.

Parpaing, n.m

Tout élément de construction taillé ou moulé (pierre, moellon, brique...) qui présente un parement sur chacune des deux face d'un mur. GB: through stone, perpend stone.

Par extension, désigne le bloc de béton de granulats, plein ou creux, dit aggloméré, ou plot. GB: concrete block.

Parpaing, parpaigne, adj.

Qualifie un élément parallélépipédique qui présente un côté sur chacune des faces d'un mur: pierre parpaigne. GB: through (stone, ashlar).

Pegmatite, n.f.

Granit à gros grains, comportant du mica (blanc surtout). GB: pegmatite.

Pierre, n.f. -1080 ; latin petra.

1. La pierre : matière minérale solide, dure, qui se rencontre à l'intérieur ou à la surface de l'écorce terrestre en masses compactes.

2. Variété particulière de cette matière. Roche.

3. Fragment d'une variété de cette matière servant à un usage particulier. (...) Bloc de roche employé pour la construction, la maçonnerie. Moellon.

Plate-bande, n.f. (pl: des plates-bandes)

Ouvrage rectiligne formant le couvrement d'un baie. Si le linteau est en principe monolithique, la plate-bande est composée de claveaux appareillés. GB: lintel course, straight arch.

La plate-bande bombée peut désigner un arc de faible courbure.

Porphyre, n.m.

Roche ignée endogène, compacte et résistante, composée de divers minéraux (surtout feldspath) noyés dans une pâte quartzreuse fine et homogène, plus ou moins vitreuse et colorée.

Très dur, le porphyre est plus difficile à travailler que le marbre ou le granit, mais il prend un très beau poli. Les principales variétés sont les porphyres rouge, brun, vert et rose. On l'utilise aussi sous forme de graviers concassés. GB: porphyry.

Pouzzolane, n.f.

La pouzzolane naturelle est une roche siliceuse légère, d'origine volcanique. Abondante en Auvergne, la pouzzolane naturelle comporte environ 45% de silice, 20% d'alumine et 10 à 15% d'oxyde ferrique (qui lui donne sa coloration rouge), ainsi qu'un peu de chaux et de magnésie. GB: pozzolan, pozzolana.

Quartz, n.m.

Roche sédimentaire dure (dureté 7), composé de silice presque pure cristallisée (SiO₂); le quartz peut être blanc laiteux ou jaunâtre, vitreux et translucide ou opaque. Il se présente soit sous forme de gros cristaux structurés (cristal de roche, agate, aventurine, jaspe, ...), soit sous forme de sable. S'il est très pur et blanc (Fontainebleau), il sert surtout pour la verrerie. GB: quartz.

Quartzite, n.m.

Roche très dure (dureté 9), compacte, composée surtout de cristaux de quartz gris-beige pâle. On l'utilise dans la fabrication d'abrasifs, de verre et d'éléments réfractaires. GB: quartzite.

Queue, n.f.

MACONN: la queue d'un moellon est la partie noyée dans la maçonnerie, et la mesure de la longueur de cette partie, depuis le parement. GB: (stone bedding) depth.

Roche, n.f. -980 ; latin populaire *rocca*.

1. Une, des roches. Bloc important de matière minérale dure.
2. (XVIIIe ; roke « carrière de pierre » 1269) La roche. Matière minérale dure de la surface de la terre.
3. (XVIIIe) Scientifique. Matériau constitutif de l'écorce terrestre formé de minéraux d'une certaine homogénéité, durs et de grain serré (ex. quartz), plastique (ex. argile), meuble (ex. sable) ou liquide (ex. pétrole). Les roches forment le terrain de l'écorce terrestre. Sciences qui étudient les roches : pétrographie, pétrologie ; géologie, minéralogie-.

Schiste, n.m.

Roche métamorphique de silico-aluminates, à texture lamellaire, facilement fissible en feuillets suivant un plan de clivage. Les schistes ardoisiers en sont un exemple typique. GB: shale, schist.

Silice, n.f.

Dioxyde de silicium (SiO₂), en général cristallisé, et présent dans de très nombreux minéraux. Parmi ses variétés naturelles, on trouve le quartz, l'agate, la calcédoine, l'onix, le silex.

Les sables de silice, plus ou moins fondus et agglomérés, donnent les grès et quartzites. La silice, enfin, est le constituant principal du verre. GB: silica (silicon dioxide).

Taille, n.f.

Outre son sens de dimension, la taille désigne la coupe d'un matériau quelconque selon les formes et les dimensions qui conviennent pour sa mise en oeuvre.

En maçonnerie, la taille est "le résultat d'un façonnage donnant à une face (ou à plusieurs) un aspect convenu, au moyen d'outils ou d'abrasifs" (déf. AFNOR).

GB: stone cutting, dressing, stone finish.

De façon plus générale, la taille désigne d'une part la mise en oeuvre de l'art de la stéréotomie et l'action de couper ou de recouper les pierres pour les mettre au format adéquat, d'autre part l'aspect et l'état de surface du parement des pierres en fonction des outils utilisés: ainsi, on parlera de taille bouchardée (à la boucharde), brochée (à la broche), égrisée, layée (à la laye), pointée, rustiquée (au rustique), sciée (brute de sciage au fil ou à la lame), smillée (à la smille), talotée (au talot), têtue (au têtou), etc.

Talc, n.m.

Roche tendre de silicate hydraté de magnésium. Réduit en poudre fine, le talc est utilisé comme charge épaississante dans certains mortiers de résines, mastics, enduits, colles et peintures. GB: talc.

Tectonique, n.f. et adj. -1894 ; allemand *Tektonik*, grec *tektonikos* « propre au charpentier »

1. Ensemble des déformations subies par les couches géologiques déjà formées. Tectonique des plaques : théorie d'après laquelle la lithosphère est formée de plaques rigides flottant sur l'asthénosphère (subduction).

Tête, n.f.

La tête d'un élément de maçonnerie (brique, moellon, pierre, voussoir, etc.) est sa face verticale qui reste visible après la pose, à l'opposé de sa queue.

Trachyte, n.m. (prononcer *trakit*)

Roche éruptive dure, de composition analogue à la syénite, utilisée en Auvergne comme pierre de taille. GB: trachyte.

Tuf, n.m.

Roche calcaire légère, grisâtre, tendre et poreuse. GB: tufa.

Sa formation résulte de l'évaporation d'eaux calcaires. Il tend à durcir au contact de l'air, par carbonatation. Il sert de pierre à bâtir dans le Sud de l'Allemagne, en Autriche et en Italie.

Le *tuf volcanique* est un basalte léger de cendres éruptives, de lave et de ponce, plus ou moins stratifiés; on l'utilise aussi comme pierre à bâtir. GB: tuff.

