ÉNERGIE ET ÉMISSIONS GRISES

DANS L'ARCHITECTURE CONTEMPORAINE

Énoncé théorique de Master d'Architecture
Zisti Haghparast, Noona Noori

Groupe de suivi
Professeur de l'énoncé théorique : Jean-Louis Scartezzini
Directeur pédagogique du PDM : Martin Fröhlich
Maître EPFL : Tiago Borges
Expert : Emmanuele Naboni

EPFL - ENAC - SAR - 2016 - 2017

Résumé

Les années 1950 ont été marquées par une augmentation notable de ce qui est considérée comme le confort. L'abondance et le bas prix des énergies durant les années 50, ont conduit à un gaspillage généralisé dans les pays occidentaux. Plus de 80% de l'énergie consommée dans le monde provient des ressources énergétiques non renouvelables et productrices de gaz à effet de serre. De surcroit, la demande en énergie à l'échelle planétaire ne cesse de croître. Une croissance continue dans un monde infini est impossible. L'épuisement des énergies fossiles nous place donc face à une situation d'urgence. La réalité des impacts environnementaux d'origine humaine ne fait plus de doute. L'utilisation des combustibles fossiles, des carburants et du déboisement des forêts primaires constituent la principale cause de la production des gaz à effet de serre dont le CO_2.

En signant le Protocole de Kyoto, la Suisse s'est engagée à réduire sa consommation d'énergie et ses émissions de CO_2 de 20% par rapport à leur niveau de 1990 d'ici 2020. Il est à souligner que le secteur du bâtiment absorbe près de la moitié de l'énergie que nous consommons. Par conséquent, il est nécessaire de développer un parc immobilier durable et écologique pour atteindre ce but. Aujourd'hui, il ne s'agit plus uniquement d'améliorer les performances énergétiques des ouvrages. Bien sûr la diminution de l'énergie nécessaire à l'exploitation des bâtiments reste un objectif majeur. Toutefois, lorsque cette énergie diminue, l'importance de l'énergie pour la construction et la démolition de l'édifice, soit l'énergie grise, croît significativement et ne peut plus être négligée. De ce fait, les priorités sont d'optimiser l'efficacité énergétique et la protection de l'environnement en s'intéressant à la totalité du cycle de vie du bâtiment. L'objectif de cette recherche est donc de comprendre l'importance de l'énergie grise dans le bilan énergétique global du bâtiment et ses émissions de CO_2 dans sa durée de vie totale.

L'étude présente, dans le premier chapitre, le contexte général, la situation actuelle de la société à 2000 watts et l'objectif intermédiaire de la société SIA "la voie SIA vers l'efficacité énergétique" pour l'année 2050. Les deux sociétés ont pour le but une réduction de la consommation énergétique nuisible pour l'environnement, en indiquant des valeurs cibles en énergie primaire et en émissions de gaz à effet de serre.

La société SIA se concentrant plus sur le secteur de construction, les conditions-cadres de celle-ci ont été retenues pour l'étude. Le chapitre 2, se focalise sur les valeurs cibles en énergie primaire non renouvelable et celles des émissions de gaz à effet de serre pour trois catégories d'ouvrages : "habitation", "bureau" et "école", en considérant trois domaines "construction", "exploitation" et "mobilité".

Le chapitre 3 explique l'évolution du domaine "construction" dans le bâtiment depuis 1970 jusqu'à aujourd'hui pour montrer l'importance de la part de l'énergie grise dans le cycle de vie d'un bâtiment. Pour mieux comprendre l'importance de son impact et la part de l'énergie grise dans toute la durée de vie du bâtiment, nous subdivisions le cycle de vie du bâtiment en plusieurs phases élémentaires afin de redéfinir les limites du système proposé par le modèle SIA. Il est possible de réduire l'énergie grise et les émissions de CO_2 du bâtiment dès le stade de conception du projet. Nous citons quelques facteurs qui peuvent influencer ces énergies et émissions grises.

Pour une étude plus rigoureuse, dans le chapitre 4, nous avons décomposé le bâtiment en différents éléments de constructions et eux même à des matériaux de constructions, pour étudier leurs impacts sur l'environnement depuis leur fabrication jusqu'à leur élimination ainsi que ceux de leur transport et de leur remplacement.

Cette étude s'achève par une analyse de quatre matériaux dits "écologique" : la paille, la terre crue, le bois et le béton de recyclage. Ensuite, à l'aide du logiciel Lesosai, une comparaison qualitative et quantitative est établie pour différentes variantes d'un mur composé par ces matériaux.

Sommaire

Résumé

1. Introduction **8**

2. Conditions-cadres de la SIA vers l'efficacité énergétique **10**
2.1 Catégorie d'ouvrage 12
2.2 Domaines 12
2.3 Valeurs cibles 14

3. Importance du domaine "construction" et de "l'énergie grise" dans le cycle de vie du bâtiment **16**
3.1 Évolution du domaine "construction" dans le bâtiment depuis 1970 jusqu'à aujourd'hui 16
3.2 Energie grise dans le cycle de vie d'un bâtiment 18
3.3 Facteurs d'influence sur l'énergie grise et les émissions de gaz à l'effet de serre 20
3.3.1 Choix du site 20
3.3.2 Grands volumes compacts 20
3.3.3 Flexibilité d'utilisation 21
3.3.4 Séparation de systèmes et conduites accessibles 21
3.3.5 Peu de constructions en sous-sol et les zones non chauffées 22
3.3.6 Choix entre transformation ou construction neuve 23
3.3.7 Mode de construction 23

4. Choix de matériaux et l'énergie grise **31**
4.1 Energie grise et émissions CO_2 d'un matériau et d'un élément de construction 31
4.1.1 Fabrication 33
4.1.2 Transport 33
4.1.3 Mise en œuvre, entretien et remplacement 35
4.1.4 Élimination 35
4.2 Quelques matériaux innovants 36
4.2.1 La paille 37
4.2.2 La terre crue 52
4.2.3 Le bois 79
4.2.4 Le béton de recyclage 111
4.3 Analyse de cycle de vie de différents scénarios de façade 125

Conclusion **129**

Bibliographie **132**

Annexe **136**

1. Introduction

Depuis longtemps, nous reconnaissons l'Homme comme étant responsable du réchauffement de la planète et les impacts sur l'environnement sont un sujet très important pour la société. Mais la sensibilisation du public n'a commencé qu'après le choc pétrolier dans les années 70. Cela a forcé les gouvernements à définir des limites à la consommation d'énergie afin de réduire leur dépendance à l'égard du pétrole et des sources d'énergies non renouvelables.

La protection de l'environnement et des ressources énergétiques est l'un des enjeux importants d'aujourd'hui. Avec le Protocole de Kyoto, la Suisse s'est engagée à diminuer sa consommation d'énergie et ses émissions de gaz à effet de serre de 20% jusqu'en 2020, en comparaison avec son niveau de 1990[1]. Ce défi qui concerne l'ensemble des énergies consommées, tous secteurs confondus, implique particulièrement celui de la construction qui consomme à lui seul plus de 50% de l'énergie fossile[2] et émet également près de 40% des émissions de gaz à effet de serre[3]. Ces chiffres indiquent clairement l'influence déterminante des bâtiments sur la consommation d'énergie.

En Suisse, la politique énergétique de la société à 2000 watts, issue de la stratégie du Conseil fédéral pour le développement durable, vise à diminuer les besoins en énergie renouvelable et non renouvelable à 2000 watts par personne, d'ici à l'horizon 2150[4]. Aujourd'hui, cette valeur est trois fois supérieure et s'élève à près de 6300 watts. Elle vise également à ramener la quantité de CO_2 rejetée par habitant à une tonne, contre 8.6 en 2010[5]. Ces objectifs sont conservés en dépit de la croissance démographique ainsi que des besoin qui tendent à infléchir cette tendance. Pour y parvenir, cette stratégie vise, avant tout, à limiter la consommation en énergies fossiles qui sont les principales responsables des émissions de gaz à effet de serre.

En outre, la société suisse des Ingénieurs et des Architectes, SIA, suit la même direction et objectif que la société à 2000 watts, en se concentrant sur la consommation énergétique du secteur de construction. Elle se donne comme délai intermédiaire l'an 2050 et définit des valeurs cibles et des mesures concrètes. Le but de cet objectif intermédiaire est de réduire les besoin énergétiques non renouvelable jusqu'à 2000 watts par personne, dans le parc immobilier[6]. Par conséquent, la majorité des ouvrages situés sur le territoire suisse doivent être rénovés ou construits à neuf de manière à répondre à ces exigences. A cet effet, la SIA publie, en 2006, un cahier technique, SIA 0216 "Objectifs de performance énergétique SIA" pour définir, sur la même base que la société à 2000 watts, des valeurs cibles pour

1. [33] Politique climatique et énergétique, p. 4

2. [33] Rapport explicatif concernant la Stratégie énergétique 2050, OFEN, Berne, 2012,

3. [33] La Suisse réduit les émissions de gaz à effet de serre, www.admin.ch, 2015

4. [16] Résumé des points principaux, p. 13

5. [20] La voie SIA vers l'efficacité énergétique et la société à 2000 watts

6. [20]

l'énergie primaire non renouvelable pour le domaine "exploitation" ainsi que pour deux autres domaines "énergie grise" et "mobilité". De ce fait, ces deux domaines sont considérés comme étant au même niveau que l'énergie d'exploitation en les incluant dans le calcul du besoin global en énergie primaire.

Plus tard, en 2011, le cahier SIA 2040 "La voie SIA vers l'efficacité énergétique", a également défini une valeur cible pour les émissions de gaz effet de serre produites dans le cycle de vie d'un bâtiment. Ainsi, pour la société à 2000 watts et la SIA, ces deux valeurs constituent les grandeurs cibles déterminantes.

Pendant longtemps, la seule donnée pertinente permettant de déterminer le degré de qualité d'un bâtiment, a été le besoin de chaleur finale pour le chauffage. Mais aujourd'hui cette quantité ne représente que 30% de l'énergie primaire totale[7]. Si nous voulons réduire notre consommation d'énergie d'ici à 2050 et, respectivement, 2150, il est nécessaire de prendre en considération toutes les autres énergies consommées durant le cycle de vie d'un bâtiment, en particulier celles pour l'élaboration des matériaux de construction d'un bâtiment. Cette dernière est appelée l'énergie grise du bâtiment.

En 2008, le label Minergie a aussi ajouté une nouvelle certification environnementale appelée "ECO"[8]. Elle complète le label Minergie et a pour but de diminuer fortement la consommation d'énergie grise et les émissions de CO_2 en exigeant que les constructions soient pensées globalement, de leur genèse jusqu'à leur déconstruction. Les critères relatifs à l'écologie du bâtiment prennent surtout en compte les impacts environnementaux dus aux matériaux de construction, de l'extraction des matières premières, jusqu'à leur démolition. De même, de nombreuses propriétés du bâtiment, telles que l'origine des matériaux, la flexibilité d'utilisation du bâtiment, ou les mesures naturelles de protection contre les intempéries des éléments de construction, limitent cette énergie et les émissions grises du bâtiment. Selon les statistiques, il existe aujourd'hui seulement 510 bâtiments selon Minergie-ECO, 139 selon Minergie-A-ECO et 543 selon Minergie-P-ECO[9]. Ces chiffres restent très modestes dans le parc immobilier suisse et nécessitent d'être valoriser dans le futur.

Au final, la construction à faible énergie grise nécessite de comprendre les évolutions et la tendance de la société à 2000 watts, de la SIA et du label Minergie-ECO. Par rapport à la société à 2000 watts, la société SIA vise plus le secteur de la construction; les conditions-cadres de celle-ci sont expliquées dans le chapitre suivant.

7. [21] Introduction, de la paille pour construire, p. 2

8. [22] Comparison of Energy Standards, p. 7 à 9

9. [55]

2. Conditions-cadres de la SIA vers l'efficacité énergétique

Considérant l'importance des énergies attribuées à la construction des bâtiments, la Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, SIA, oblige toutes les constructions situées sur son territoire à respecter la démarche des développements durables. La SIA se base sur la vision énergétique de la société à 2000 watts pour construire des bâtiments qui respectent des valeurs cibles afin d'atteindre un objectif énergétique globale et limiter les émissions de gaz à effet de serre.

L'objectif de la société à 2000 watts est de plafonner une puissance continue de 2000 watts par personne ainsi que des émissions qui ne dépassent pas l'équivalent d'une tonne de CO_2 par personne par année[1]. Cet objectif devrait être atteint d'ici 2150. Afin de mettre en évidence l'urgence d'une réduction rapide de la consommation énergétique et les impacts environnementaux, la SIA définit également un objectif à moyen-terme sur le chemin de la société à 2000 watts qui doit être achevé jusqu'en 2050. Ce dernier correspond à une réduction de la puissance continue d'énergie primaire à 3500 watts et à 2 tonnes d'émissions CO_2 par personne par année[2]. Ces objectifs à moyen-terme sont ambitieux et nécessitent des solutions dès maintenant sachant que les bâtiments construits aujourd'hui sont encore en exploitation jusqu'en 2050 et que l'énergie liée à leur construction n'est pas encore amortie.

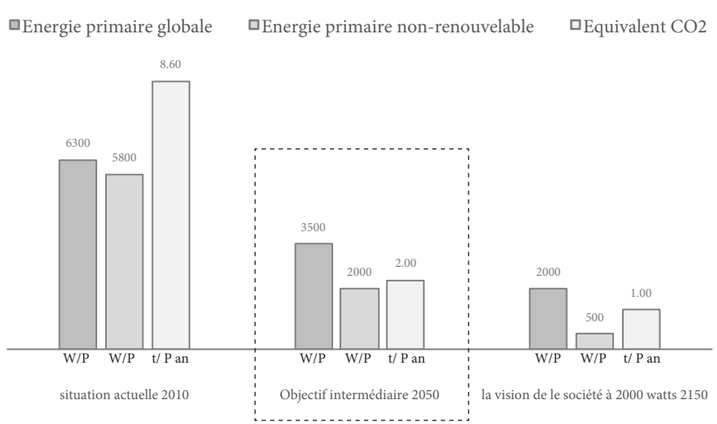
Le diagramme ci-dessous présente l'énergie primaire globale (renouvelable et non renouvelable), l'énergie primaire non renouvelable et les émissions de CO_2 , pour l'année 2010 ainsi que pour les objectifs des années 2050 et 2150.

1. [20] La voie SIA vers l'efficacité énergétique et la société à 2000 watts, p. 6

2. [20] La voie SIA vers l'efficacité énergétique et la société à 2000 watts, p. 6

Diagramme présentant les objectifs de la SIA et de la société à 2000 watts[3]

3. [20] Diagramme tiré du cahier SIA : La voie SIA vers l'efficacité énergétique, p. 6



La SIA se concentre sur l'énergie primaire non renouvelable des objectifs intermédiaires de 2050 alors que la société à 2000 watts englobe aussi l'énergie primaire renouvelable pour ces objectifs de 2150.

Ce diagramme montre ainsi la nécessité d'une réduction de la consommation d'énergie d'ici 2050. Il illustre en particuliers l'importance d'une diminution accrue des émissions de CO_2 au cours de ces 30 prochaine année. Ces dernières doivent passer de 8.6 à 2 tonnes de CO_2 par personne par année jusqu'en 2050.

Cette importance est également très marquée dans le tableau des facteurs de réduction visés jusqu'à 2050. Avec une valeur de 4.3, la nécessité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre est d'autant plus cruciale que l'énergie primaire global et celle non renouvelable.

4. [20] Tableau tiré du cahier SIA : La voie SIA vers l'efficacité énergétique, p. 7

Tableau des facteurs de réduction pour l'objectif intermédiaire 2050[4]

		Facteur de réduction
Puissance annuelle moyenne de l'énergie primaire globale	Réduction de 6300 W à 3500 W par personne	1.8
Puissance annuelle moyenne de l'énergie primaire non renouvelable	Réduction de 5800 W à 2000 W par personne	2.9
Emissions de gaz à effet de serre	Réduction de l'équivalent de 8.6 t à 2 t de CO2 par personne	4.3

La Société à 2000 watts et la SIA, malgré certaines différences au niveau des conditions-cadres, visent une réduction de la consommation énergétique et une diminution des impacts environnementaux, tout en indiquant des valeurs cibles. En principe, les constructions qui atteignent les valeurs cibles des objectifs énergétique SIA satisfont également les conditions-cadres de la société à 2000 watts.

Autrement dit, la SIA complète la société à 2000 watts par des considérations de l'énergie primaire non renouvelable. Par rapport aux conditions-cadres de la SIA, afin d'atteindre ces objectifs, trois catégories d'ouvrage et trois domaines sont définis.

2.1 Catégorie d'ouvrage

Les ouvrages sont divisés en trois catégories : "habitation", "bureaux" et "écoles". Par rapport à la SIA, des valeurs cibles sont définies pour chaque catégorie d'ouvrage. Ces valeurs changent également dans le cas d'une construction neuve ou dans celui d'une transformation.

- Ouvrage "habitation" : Les bâtiments d'habitation représentent 70% des constructions en Suisse[1]. Par conséquent, afin d'atteindre les objectifs de la SIA, l'application des valeurs cibles pour cette catégorie d'ouvrage a une importance centrale. L'ouvrage d'habitation se compose des maisons individuelles, des immeubles collectifs ainsi que d'autres bâtiments habités, par exemple les maisons des étudiants et les résidences pour les personnes âgées.

1. [20] Terminologie, p. 9

- Ouvrage "bureaux" : Les immeubles de bureaux constituent 20% de la construction et ils représentent la deuxième plus grande catégorie d'ouvrages en Suisse[2]. Ces bâtiments, en raison de leurs différents usages, ont des consommations d'énergie variables dans les domaines "exploitation" et "mobilité".

2. [20] Terminologie, p. 9

- Ouvrage "écoles" : une petite partie de l'ensemble des bâtiments en Suisse se compose des bâtiments scolaires. Pourtant, ils ont une importance particulière du fait qu'ils sont construits par les pouvoirs publics et peuvent être représentés comme un bâtiment exemplaire. En plus, ces bâtiments servent à sensibiliser les élèves aux principes d'une construction énergétiquement efficace.

2.2 Domaines

Afin de satisfaire les objectifs de la SIA, l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment doit être pris en compte. Par conséquent, les objectifs énergétiques et environnementaux doivent être appliqués à trois domaines : "construction", "exploitation" et "mobilité".

L'ensemble donne la valeur globale pour atteindre les objectifs. Auparavant, la SIA ne prenait en considération que le domaine "exploitation" mais, au cours de ces dernières années, l'attention se porte de plus en plus sur les domaines "construction" et "mobilité". Aujourd'hui, ces deux derniers ne peuvent plus être négligés et ils jouent un rôle crucial pour atteindre les objectifs de la SIA. A noter que la valeur de chaque domaine dépend de la catégorie d'ouvrage et du fait que la construction est neuve ou transformée.

- Domaine "exploitation" : ce domaine englobe l'énergie primaire non renouvelable et les émissions de gaz à l'effet de serre correspondantes aux besoins de chauffage, d'eau chaude sanitaire, de ventilation, de l'éclairage et celles des équipements d'exploitation.

A l'origine, ce domaine représente la phase la plus gourmande en énergie dans le cycle de vie du bâtiment. Ainsi, il engendre le plus d'impact environnemental. Pourtant, avec les améliorations des techniques constructives, leur besoin en énergie et les émissions sont réduits de manière considérable.

Par rapport à la voie SIA vers l'efficacité énergétique, l'énergie d'exploitation actuelle d'un bâtiment d'habitation ne représente plus que la moitié de l'énergie primaire non renouvelable et seulement un sixième des émissions de gaz à effet de serre[3]. Aujourd'hui, il existe également des "maisons à zéro énergie" qui consomment la même quantité d'énergie que celle qui est produite.

3 [20] Terminologie, p. 10

- Domaine "construction" : ce domaine prend en compte l'énergie primaire non renouvelable et les émissions de gaz pour la fabrication et l'élimination des matériaux et des éléments de construction ainsi que des installations techniques. Ce domaine considère l'ensemble de processus de la construction d'un bâtiment : l'extraction des matières premières, transport, fabrication et leur élimination.

Aujourd'hui, à cause des nouveaux modes de construction, la consommation d'énergie et les émissions de gaz du domaine "construction" sont augmentées. L'utilisation des matériaux de construction gourmands en énergie, des grandes épaisseurs des isolants thermiques, des grandes surfaces des fenêtres, l'utilisation des fenêtres à triple vitrage et la réalisation des installations techniques consomment bien plus d'énergie qu'auparavant.

Par rapport à la voie SIA vers l'efficacité énergétique, actuellement l'énergie primaire non renouvelable du domaine de construction, appelée également l'énergie grise, représente un quart de l'énergie primaire non renouvelable et plus de la moitié des émissions de gaz à l'effet de serre d'un bâtiment d'habitation[4].

4 [20] Terminologie, p. 10

Ceci justifie l'importance accordé au domaine "construction" afin d'atteindre la valeur cible de la société SIA. Ce domaine ne peut pas être négligé, tout particulièrement, pour réduire drastiquement les émissions de gaz à l'effet de serre.

- Domaine "mobilité" : la SIA prend également en considération

le domaine "mobilité". Bien que la mobilité dépende beaucoup du comportement des utilisateurs, le site d'implantation du bâtiment a une grande influence sur les besoins énergétiques de la mobilité. D'après la voie SIA vers l'efficacité énergétique, l'énergie consommée par la mobilité représente un quart de l'énergie primaire non renouvelable et un tiers des émissions de gaz à effet de serre[1]. Par conséquent, aujourd'hui, ce nouveau thème prend de l'importance pour atteindre l'objectif d'efficacité énergétique et pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

1. [20] Terminologie, p. 11

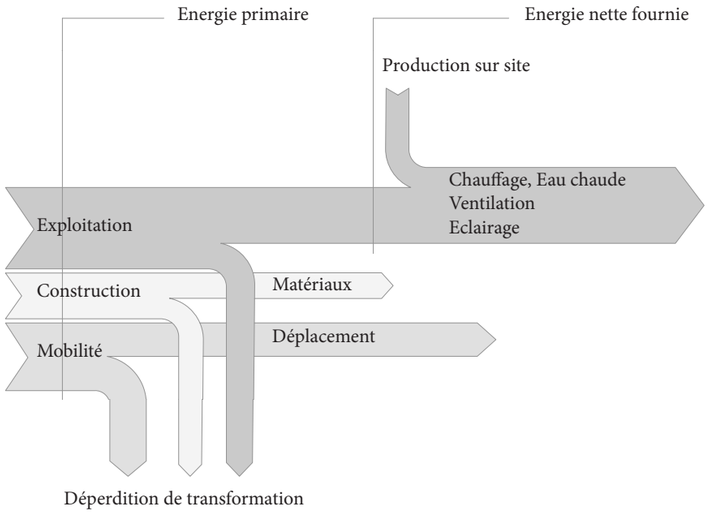
A noter que la valeur énergétique du domaine "mobilité" change par rapport à chaque catégorie d'ouvrage du fait que l'énergie liée à la mobilité se base sur la somme des trajets effectués par les utilisateurs d'un bâtiment.

2.3 Valeurs cibles

La SIA, en se basant sur les exigences de la société à 2000 watts, détermine un budget global énergétique et environnemental pour l'objectif intermédiaire 2050. Ce budget global est défini comme étant la somme des valeurs cibles de trois domaines "construction", "exploitation" et "mobilité". C'est à noter que la valeur cible de chaque domaine est déterminée par l'application des facteurs de réduction à la valeur actuelle de ce domaine.

Schéma de flux d'énergie pour les valeurs cibles de la voie SIA vers l'efficacité énergétique[2]

2. [20] Schéma tiré du cahier SIA : La voie SIA vers l'efficacité énergétique, p. 11



Le schéma de la page précédente illustre la possibilité de compensation entre les trois domaines. Pour comprendre la flexibilité de la SIA, afin d'atteindre le budget global, on peut prendre l'exemple d'un bâtiment neuf et celui d'un édifice transformé :

Dans le cas de la transformation d'un bâtiment, en raison de la protection du patrimoine, le domaine "exploitation" consomme plus d'énergie et génère plus d'émissions que dans le cas d'une nouvelle construction. Cette valeur peut être compensée par le domaine de "construction" qui consomme relativement peu d'énergie et engendre peu d'impact environnemental car la structure primaire du bâtiment est déjà construite.

Pourtant dans le cas d'une construction neuve, le domaine "construction" engendre une quantité remarquable d'émissions de gaz à effet de serre, ainsi le bâtiment doit produire très peu d'émissions dans le domaine "exploitation" pour être capable de compenser le surplus du domaine "construction". Cette flexibilité permet de mieux atteindre les objectifs par une combinaison appropriée des mesures sociales et économiques.

En conclusion, un bâtiment, pour être compatible avec les objectifs de la SIA, doit respecter les valeurs cibles pour l'énergie primaire non renouvelable et les émissions de gaz à effet de serre. Il doit aussi satisfaire la valeur limite définie par la SIA, pour les besoins en énergie de chauffage.

3. Importance du domaine "construction" et de "l'énergie grise" dans le cycle de vie du bâtiment

Ce chapitre vise à expliquer l'intérêt du calcul de l'énergie liée au domaine "construction". Après le secteur du transport, l'industrie du bâtiment fait partie des activités humaines qui ont un fort impact sur l'écosystème. Les bâtiments anciens sont particulièrement énergivores puisqu'ils ont été réalisés à une époque d'insouciance énergétique. Suite aux enjeux climatiques, l'efficacité énergétique est devenue incontournable, allant de pair avec une utilisation modérée de nos ressources.

Depuis le choc pétrolier, en moins de trente ans, la production mondiale d'énergie a augmenté d'environ 50% et a triplé dans les pays développés pour lesquels l'énergie fossile représente plus de 90% de leur consommation totale[1]. Les efforts visant à réduire l'impact environnemental du bâtiment se sont concentrés principalement sur la réduction de la consommation d'énergie au cours de la phase d'exploitation. En réduisant les besoins de cette étape, nous constatons que les conséquences liées à la construction restent importantes. Ces derniers temps, à cause des préoccupations écologiques, l'accent a donc été mis sur les impacts environnementaux générés par les éléments et les matériaux de construction[2].

1. [7] Modern time, p. 8

2. [3] Le bâtiment de la société 2000 watts, p.18

3.1 Évolution du domaine "construction" dans le bâtiment depuis 1970 jusqu'à aujourd'hui

Comparons deux bâtiments : un des années 1970 avec un actuel[3]. Dans la variante de 1970, l'énergie primaire consommée dans le domaine "exploitation" (chauffage, eau chaude, électricité, etc.) est environ 20 fois supérieure à celle nécessaire à sa construction. Dans la seconde variante, qu'il soit neuf ou rénové, l'énergie liée à son exploitation ne représente plus que 2 fois la valeur de celle de la construction. On observe également que la proportion d'énergie pour la construction par rapport à la consommation totale d'énergie primaire tend à augmenter pour les constructions à venir.

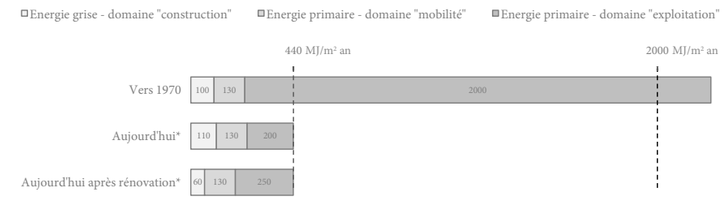
3. [37] Bilan global des bâtiments, p. 16

Alors que les nouvelles technologies permettent de fortement réduire l'énergie d'exploitation des bâtiments, l'énergie pour la production des matériaux et des éléments de construction ne va pas se réduire autant puisqu'une grande part de leur fabrication exige actuellement des processus à haute température presque exclusivement exploitables avec des énergies fossiles.

4. [37] Tableau tiré du livre Bois et réhabilitation de l'enveloppe, Bilan global des bâtiments, p.16

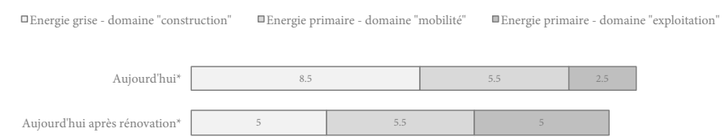
*Valeurs de référence selon cahier technique SIA 2040

Comparatif de la consommation de l'énergie primaire non renouvelable (MJ/m² an) dans les trois bâtiments ; anciens, neufs et rénovés[4]



Dans le tableau ci-dessous, une comparaison similaire des émissions de CO_2 des trois différents domaines ayant un impact majeur sur le réchauffement global de l'atmosphère, peut aussi montrer l'importance de l'impact du domaine "construction" dans le temps.

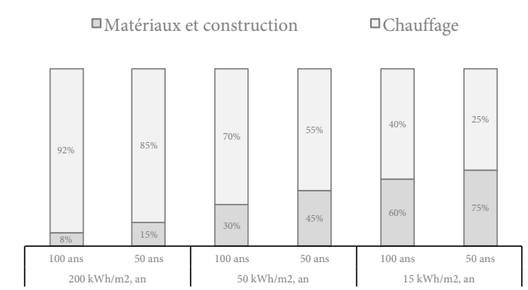
Comparatif des émissions de CO_2 (kg/m² an) dans les bâtiments neufs et rénovés



Le graphique suivant, issu des "Grenelles de l'environnement" en France, confirme également que l'évaluation de l'énergie grise des matériaux utilisés dans une construction n'est réellement pertinente que dans le cadre d'une réflexion sur la performance globale de la construction. Plus un bâtiment sera performant en termes d'économie d'énergie, plus la proportion d'énergie grise des matériaux sera significative. En outre, plus la durée de vie de cette construction sera courte, plus l'impact de l'énergie grise des matériaux sera important.

5 [40] Source : "Grenelles de l'environnement"

Energie grise des matériaux et énergie pour le chauffage d'une habitation moyenne[5]



En résumé, la consommation d'énergie et les émissions de CO_2 liées au domaine "construction" prennent une part de plus en plus importantes durant toute la durée de vie d'un bâtiment. Il devient donc primordial de mettre l'accent sur la thématique "matériaux de construction" pour considérer l'efficacité énergétique et réfléchir à l'impact des éléments et des matériaux de constructions sur la totalité du cycle de vie d'un bâtiment et de favoriser des matériaux renouvelables pour diminuer à la fois cette consommation et celle globale.

3.2 Energie grise dans le cycle de vie d'un bâtiment

L'énergie grise désigne toutes les énergies consommées durant le cycle de vie d'un bâtiment à l'exception de celles destinées à l'exploitation (chauffage, ventilation, éclairage, etc.). En d'autres termes, ce sont toutes les énergies consommées dans le domaine "construction" défini par la SIA.

L'énergie grise est une grandeur permettant de mesurer des ressources énergétiques non renouvelables consommées depuis la fabrication jusqu'à l'élimination d'un matériau.

Il est possible de diviser le cycle de vie d'un bâtiment en phases élémentaires pour permettre une analyse plus rigoureuse de l'énergie primaire consommée. En effet, il est caractérisé par des étapes successives : la confection des matériaux, la préfabrication en usine ou la réalisation sur le chantier, l'utilisation optimisée par des entretiens adéquats, des transformations éventuelles, le recyclage en fin de vie, etc. Une première décomposition du cycle de vie d'un bâtiment comprend 3 phases principales : "construction", "utilisation" et "élimination". Ensuite elles sont divisées une fois de plus en étapes encore plus élémentaires liées aux trois domaines de la SIA.

Phases principales	Phases élémentaires	Domaines de la SIA
Construction	1. Fabrication du matériau (y compris l'énergie nécessaire pour l'extraction des matières premières et le transport de l'énergie primaire nécessaire à la fabrication matériau) 2. Transport vers le site d'assemblage (en cas de préfabrication) 3. Montage et assemblage (en cas de préfabrication) 4. Transport sur le chantier 5. Assemblage sur le chantier	Construction
Utilisation	*6. Exploitation* 7. Entretion 8. Remplacement	*Exploitation* Construction
Elimination	9. Désassemblage 10. Transport jusqu'à site d'éliminitation 11. Gestion de l'élimination	Construction

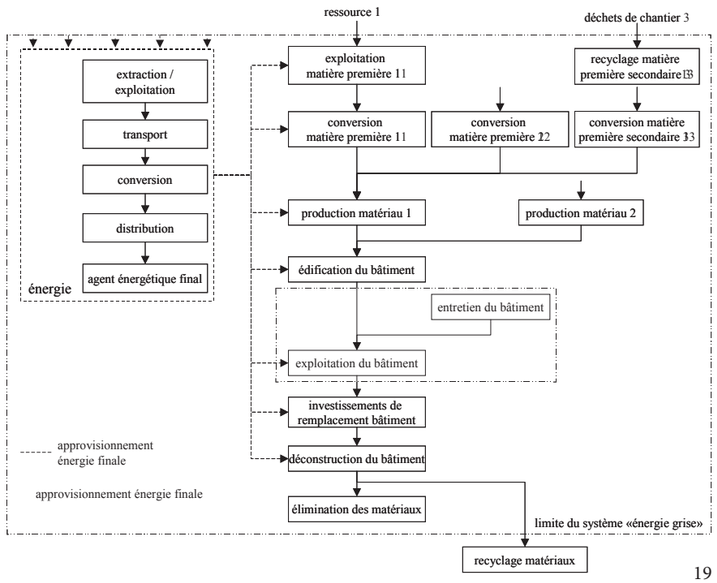
Cette découpe permet une évaluation détaillée des impacts environnementaux potentiels générés par un bâtiment pendant sa durée de vie entière, du berceau à la tombe. Nous constatons que l'énergie consommée au cours de la phase "utilisation" n'est pas le principal danger pour l'environnement car elle ne représente qu'une part minime dans tout le cycle de vie du bâtiment. L'objectif est de mettre l'accent sur les impacts liés aux deux autres phases car celles-ci sont souvent négligées.

Pour que le calcul de l'énergie grise d'un cycle de vie d'un bâtiment soit correct, il est nécessaire de définir une limite du système incluant toutes les énergies pour la production de ce bâtiment. En effet, pendant le calcul de l'énergie grise, il est possible d'inclure toutes les dépenses énergétiques annexes ; comme par exemple, pour le transport, il est également possible de considérer la construction du véhicule de transport ou la cuisson du repas du chauffeur, etc. Mais dans un contexte aussi étendu, cette analyse pourrait inclure le monde entier. Par conséquent, il est nécessaire de définir une limite.

Comme base pour la limite de notre système, nous allons utiliser la même que celle utilisée dans le cahier technique SIA 2040[1]. Même si les deux parties "entretien du bâtiment" et "recyclage des matériaux de constructions" ne sont pas comprises dans le calcul, nous les impliquons dans notre étude en tant que phases ayant une influence sur l'énergie grise du bâtiment.

1. [18] Diagramme tirée du cahier SIA 2032, L'énergie grise d'un bâtiment, p. 11

Limite du système pour le calcul de l'énergie grise d'un bâtiment



3.3 Facteurs d'influence sur l'énergie grise et les émissions de gaz à l'effet de serre

Toutes les phases du cycle de vie d'un bâtiment ont un impact sur l'environnement mais il ne faut pas oublier que les décisions prises au stade de la conception du bâtiment ont aussi une conséquence directe sur la quantité d'énergie qui va être consommée. Certains facteurs importants influençant le bilan énergétique global sont cités ci-dessous[1].

1. [19], [20] Facteurs d'influences

3.3.1 Choix du site

Le premier facteur qui influence le domaine "construction" et l'énergie grise est le choix du site. Un bâtiment construit près d'un centre-ville, utilise indirectement moins d'énergie grise. De même, les parcelles autorisant une densité de construction élevée consomment moins de matériaux et donc moins d'énergie lors de la construction. En outre, il faut aussi évaluer l'importance des nuisances éventuelles comme le niveau du bruit ou les ombres portées sur le bâtiment. Une habitation dans un milieu calme, diminue les exigences au niveau de l'aménagement du confort acoustique.

De manière général, le choix du site a la plus grande influence sur le domaine "mobilité". Un bâtiment bien situé bénéficie en général d'une bonne infrastructure de transports publics. Un site défavorable sur le plan de la mobilité, et surtout la mobilité publique, consomme une plus grande quantité d'énergie et génère plus d'émissions de gaz à effet de serre, qui sont difficilement compensés par les domaines "exploitation" et "construction".

En résumé, il faut considérer les besoins en infrastructures et les équipements publics existants lors du choix du site. Les habitants ayant un accès rapide aux commerces, écoles, travail ou loisir à proximité, ont besoin de parcourir une plus petite distance quotidiennement et donc dépensent moins d'énergie pour le transport.

Fig. 1, 2, 3 [54] Sihlbogen, Dachtler Partner Architekten, Zürich

(Exemple : Fig. 1, 2 et 3)

3.3.2 Grands volumes compacts

Plus un bâtiment est grand et compact, moins il nécessite de matériaux de construction pour sa réalisation, et moins il consomme d'énergie et donc réduit les émissions grises qui sont produites lors de la fabrication.

La compacité d'un bâtiment dépend du rapport entre la surface de son enveloppe et sa surface de référence énergétique. Il est favorable

de réaliser une grande surface de référence énergétique avec une moindre surface d'enveloppe car elle représente environ 40% de l'énergie grise d'un bâtiment[1]. Cependant, il est important de savoir qu'un grand ouvrage compact n'entraîne en aucun cas une baisse de la qualité à l'échelle d'un quartier. Une solution possible est de considérer la réalisation des pièces partagées pendant la conception du bâtiment et d'encourager l'habitat groupé.

1. [16] Catalogue des entrées par ordre alphabétique, enveloppe, p. 85

La taille et la compacité des bâtiments ont également un impact majeur sur le domaine "exploitation"; un bâtiment avec un petit volume et peu dense possède une enveloppe proportionnellement plus grande par rapport à la surface de plancher et donc plus de chaleur est perdue à travers de sa grande enveloppe.

Au final, un volume grand et compact bénéficie d'une condition de départ très favorable, tandis qu'un ouvrage de petit taille et peu compact nécessite une compensation énergétique par d'autres facteurs pour atteindre les valeurs cibles. Par exemple, un bon emplacement du site par rapport aux infrastructures urbaines, peut compenser l'énergie et les émissions supplémentaires liées à la forme du bâtiment.

Fig. 4, 5 [54] Le développement commercial et résidentiel ROY, Dachtler Partner Architekten, Winterthur, Suisse

(Exemple : Fig. 4 et 5)

3.3.3 Flexibilité d'utilisation

La flexibilité d'un ouvrage permet de répondre plus rapidement aux nouveaux besoins du marché sans modifications majeures. En règle générale, la rénovation des bâtiments est relativement plus lente par rapport aux changements des besoins et des technologies. A noter que la flexibilité d'utilisation est aussi importante pour les ouvrages "habitations" que pour des "bureaux" et des "écoles".

Une grande flexibilité permet de diminuer la consommation d'énergie grise et les émissions de CO_2 lors du changement d'affectation. En principe, la flexibilité d'utilisation est liée au type de construction porteuse et aux installations techniques. Par exemple, la transformation d'un bâtiment à poteaux-poutres et cloisons, ou avec des systèmes modulaires, ou les systèmes de construction légère, sont plus favorables.

Fig. 6, 7, 8 [64] Herdernstrasse, Lütjens padmanabhan architekten, Zurich, Suisse

(Exemple : Fig. 6, 7 et 8)

3.3.4 Séparation de systèmes et conduites accessibles

Dû au fait que les systèmes de bâtiment ont des durées de vie différentes, il faut assurer un accès simple et rapide pour un remplacement aisé de

chaque système. La séparation des systèmes garantit une réalisation facile des travaux d'entretiens. Par conséquent, ce facteur joue un rôle non négligeable sur la réduction de la consommation d'énergie et des émissions grises.

En principe, les systèmes de bâtiment sont classés en trois catégories par rapport à leur durée d'utilisation : le système primaire, qui comprend toutes les structures porteuses du bâtiment et qui ont la même duré de vie que le bâtiment. Le deuxième est le système secondaire qui inclut toutes les installations techniques et qui sont remplacées deux à trois fois pendant la vie de bâtiment[1]. Et enfin, système tertiaire qui comprend les aménagements intérieurs ; par exemple, les installations de cuisine, de salle de bain, les revêtements, etc. Ces derniers ont une durée d'utilisation encore plus courte que celles des installations techniques.

1. [16] Catalogue des entrées par ordre alphabétique, structure porteuse, p. 100

Aujourd'hui, certains systèmes constructifs tendent à intégrer les installations techniques (système secondaire) dans la construction porteuse (système primaire). Nous pouvons prendre l'exemple des conduites de ventilation ou de chauffage qui sont souvent installées dans les dalles de béton. Cela est à l'opposé du facteur de séparation de système et peut engendrer des difficultés lors des travaux d'entretien et de remplacement.

3.3.5 Peu de constructions en sous-sol et les zones non chauffées

La construction des zones non chauffées et surtout la réalisation du sous-sol peut considérablement influencer le domaine "construction". La construction en sous-sol nécessite de grands travaux d'extraction et, en plus, les éléments de construction souterrains consomment plus d'énergie et produisent donc plus de CO_2. Par exemple, tous les éléments des fondations, des radiers et des dalles de couverture souterraines sont souvent réalisés en béton armé et ils exigent d'importantes mesures d'étanchéité. En outre, en limitant les places de stationnement et les parkings souterrains, on favorise l'utilisation des transports publics.

De plus, pour satisfaire les objectifs énergétiques, il faut réduire la construction des zones non chauffées comme celles des locaux en sous-sols, des cages d'escalier et des parkings. En effet, lors de leur réalisation, elles consomment beaucoup d'énergie et elles augmentent également l'utilisation de l'énergie liée à l'exploitation due aux éclairages et à la ventilation. Par conséquent, il est plus favorable de placer les cages d'escaliers ou les coursives à l'extérieur, et les places de stationnements des véhicules en surface. (Exemple : Fig. 9)

Fig. 9 [63] Residence Avellana, Edelaar Mosayebi Inderbitzin architekten, Zurich, Suisse

3.3.6 Choix entre transformation ou construction neuve

Le choix entre une transformation ou une construction neuve influence beaucoup le domaine "construction".

Dans le cas d'une transformation, la structure porteuse qui est la plus énergivore et émettrice d'émissions grises, reste inchangée. De plus, lors d'une transformation, les parties souterraines, nécessitant beaucoup d'énergie lors de leur réalisation, sont conservées.

Par conséquent, pour un projet de transformation, les niveaux d'énergie grise et d'émissions de CO_2 sont généralement nettement moins importants que pour une construction neuve. Pourtant, il faut garder à l'esprit que l'enveloppe d'un bâtiment transformé ne peut pas être autant performante que celle d'un nouvel ouvrage. Donc, un bâtiment rénové remplit moins bien les exigences de la phase d'exploitation et a besoin de plus d'énergie pour le chauffage que dans le cas d'une construction neuve.

Au final, il faut retenir que chaque projet est spécifique et a besoin d'être analysé de façon minutieuse. Au noms des aspects énergétiques et environnementaux, une construction doit être conservée sauf si elle ne peut pas satisfaire les valeurs limites du besoin de chauffage, ou si le nouveau bâtiment présente un volume compact qui revalorise l'aspect social des habitants à l'échelle d'un quartier.

(Exemple : Fig. 10 et 11)

Fig. 10, 11 [50] la halle bleue, Lutz architectes, Fribourg, Suisse

3.3.7 Mode de construction

Le mode de construction a un rapport direct avec le domaine "construction". Il est généralement classé en trois catégories :

- La construction lourde qui est la plus grande consommatrice d'énergie grise et émettrice de CO_2 ; par exemple, un bâtiment avec des murs en brique et des dalles en béton.
- La construction légère utilise moins d'énergie grise et engendre moins d'émissions, comme par exemple, un bâtiment avec une ossature bois. Pourtant, les constructions légères possèdent quelques inconvénients : elles n'ont pas une forte inertie thermique et donc, leur besoin en énergie de chauffage est plus élevé par rapport aux constructions lourdes. De plus, elles n'ont pas une bonne isolation phonique et ont besoin de protection acoustique supplémentaire.
- Enfin, la construction mixte qui se place entre les deux autres modes de constructions. Par exemple, un bâtiment composé de dalles en béton et une façade en bois.

Afin de mieux comprendre la consommation d'énergie des différentes parties dans une construction, l'analyse énergétique de la structure porteuse et l'enveloppe d'un bâtiment peuvent être étudiées séparément :

a. Structure porteuse simple
La structure porteuse représente plus de 60% de l'énergie grise d'un bâtiment[1]. Aujourd'hui, elle est évaluée par rapport aux critères de la sécurité, de l'esthétique et des coûts. Il faut également que la structure porteuse soit pensée en fonction des critères de l'énergie grise et surtout de ceux des émissions de gaz à effet de serre. En règle générale, une construction avec un système structurel simple nécessite moins de ressources pour sa réalisation.

1. [16] Catalogue des entrées par ordre alphabétique, structure porteuse, p. 104

b. L'enveloppe et son choix de matériaux
L'enveloppe représente entre 30 à 40% de l'énergie grise d'un bâtiment[2]. Le choix des matériaux de façade joue un rôle important afin d'économiser l'énergie grise. En principe, une construction légère ou même mixte nécessite moins de ressources pour la réalisation de son enveloppe et, par conséquent, consomme moins d'énergie grise et produit moins d'émissions grises.

2. [16] Catalogue des entrées par ordre alphabétique, éclairage, p. 84

Les fenêtres font partie des éléments de la façade et leur fabrication nécessite une quantité importante d'énergie grise. Cependant, avec un bon choix pour les vitrages et de bons matériaux utilisés pour les cadres, leur consommation d'énergie peut être diminuée. Par exemple, une fenêtre avec un cadrage en bois nécessite moins d'énergie que celle en métal. Également, plus la proportion des cadres par rapport à la surface de fenêtre est grande, plus l'énergie grise est importante.

En plus, les fenêtres possèdent une durée de vie courte et il faut que ces éléments consomment moins d'énergie grise que les autres éléments de construction qui ont une durée de vie plus longue. Les éléments de la fenêtre ont également une grande importance sur l'énergie d'exploitation.

En principe, le choix et l'épaisseur des matériaux de la façade doivent non seulement satisfaire le label de Minergie-ECO mais il faut qu'ils atteignent également le standard de Minergie-P. Le standard Minergie-P pour les éléments de construction opaque exige une valeur U d'environ 0.15 W/m²k dans le cas d'une construction neuve et une valeur U d'environ 0.2 W/m²k dans le cas d'une rénovation[3]. Par conséquent, le choix de matériaux est un compromis entre différents facteurs afin de remplir toutes les exigences.

3. [33] Performance concernant des parties de l'enveloppe

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 4

Fig. 5

Fig. 6

Fig. 7

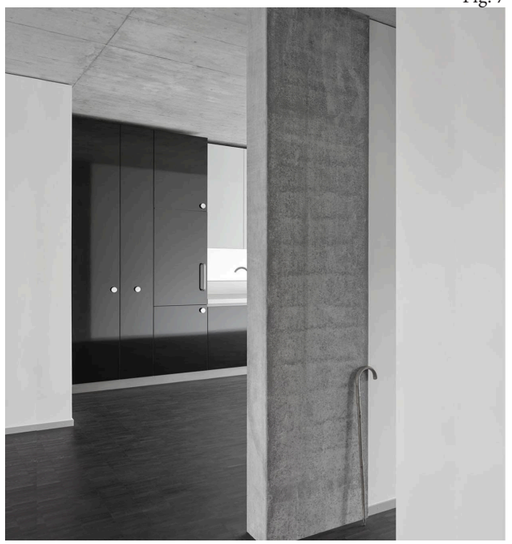


Fig. 8

Fig. 9

Fig. 10

Fig. 11

4. Choix de matériaux et l'énergie grise

Un bâtiment est fabriqué au moyen de plusieurs éléments de construction. Pour calculer l'énergie grise du bâtiment et pour une analyse rigoureuse, il est nécessaire de simplifier ce dernier à des éléments de construction. Chacun de ces éléments peuvent avoir des impacts environnementaux. En effet, l'énergie grise d'un bâtiment dans son cycle de vie, est la somme des énergies grises de tous les éléments de construction utilisés dans ce bâtiment. Les éléments de construction peuvent être très complexes et être composés eux même de plusieurs matériaux. Par exemple, un mur extérieur est généralement constitué de plusieurs matériaux : le parement, l'isolant, le mur porteur et la finition intérieure. De ce fait, la création d'un matériau de construction comme le béton depuis une carrière de pierre, nécessite également un apport d'énergie. Les processus de création eux-mêmes ont des effets sur l'environnement, à savoir, des émissions de polluants ou une production de déchets.

4.1 Energie grise et émissions CO_2 d'un matériau et d'un élément de construction

L'énergie grise d'un matériau de construction tient compte de la quantité totale d'énergie primaire non renouvelable nécessaire pour tous les processus depuis l'extraction de la matière primaire jusqu'à son élimination, y compris les transports et les moyens auxiliaires nécessaires à cet effet. En résumé, les impacts environnementaux totaux de l'énergie grise d'un bâtiment au cours de sa durée de vie sont égaux à la somme de l'énergie générée par tous les matériaux et les éléments de construction durant les différente
s phases du cycle de vie de ce bâtiment.

La fabrication d'un matériau jusqu'à son élimination entraîne également des émissions de gaz à effet de serre. En raison du réchauffement climatique, ces émissions de gaz à effet de serre ont une influence environnementale importante. Dans les objectifs de la société à 2000 watts et celle de la SIA, après l'énergie grise, ces émissions grises constituent la deuxième valeur à évaluer. A ce jour, peu de calculs sur ces émissions pour les bâtiments ont été effectués. Pour simplifier, nous allons prendre la quantité cumulée des émissions de dioxyde de carbone CO_2, ayant le même effet que l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre.

Pour le calcul des émissions de CO_2, la même limite de système que l'énergie grise est prise. Nous savons que la phase exploitation du

bâtiment n'est pas comprise dans la limite ni dans le calcul. Cependant le caractère physique d'un matériau, par exemple, la valeur U d'un isolant composant le mur, va toujours influencer la consommation de l'énergie et les émissions pendant la phase d'exploitation. Il est donc nécessaire de faire attention non seulement à l'énergie grise d'un matériau mais aussi à son influence sur la phase exploitation.
Alors qu'il y avait environ 50 matériaux différents pendant des siècles précédents, il en existe aujourd'hui plus d'un millier, ce qui complique le choix. Ce chapitre nous permet de comprendre quelle sont les facteurs à prendre en compte lors du choix du matériau : il s'agit d'une démarche multicritère qui peut être résumée ainsi :

- Leur expression architecturale caractérisée surtout par l'enveloppe ; Il est la partie expressive du bâtiment pour lequel les matériaux jouent un rôle important. Le choix de ceux-ci est influencé par la forme, les reliefs, les textures, les teintes et l'expression que nous voulons donner à un ouvrage. Les matériaux par leur technique de construction, soit local et traditionnel soit moderne, couleur, texture, opacité et transparence participent à créer des différentes qualités d'espaces.
- Leurs caractéristiques physiques ; par exemple, la résistance mécanique, thermique, acoustique mais également à l'eau et au feu.
- L'aspect économique ;
- Et enfin, selon leurs impacts environnementaux durant l'ensemble de leur cycle de vie.

Depuis longtemps, le prix et le caractère physique étaient deux facteurs décisifs lors du choix de matériaux, mais aujourd'hui, afin d'engager efficacement dans un monde durable, ces facteurs ne sont plus suffisants. Désormais, l'utilisation des matériaux de construction s'accompagne d'un nouvel objectif destiné à répondre aux enjeux environnementaux planétaires. Maintenant qu'il est possible d'avoir une amélioration significative de la performance thermique des bâtiments, grâce aux matériaux de haute performance, il reste nécessaire de soulever la question de la durabilité de ces matériaux et une évaluation de leurs impacts sur l'environnement.

Tout approvisionnement d'un matériau nécessite une dépense d'énergie. Pour produire la tuile posée sur le toit, par exemple, il faut extraire l'argile, la mélanger et la mouler dans la tuilerie. Les tuiles sont ensuite cuites et refroidies progressivement et emballées pour le transport. La tuile est ensuite transportée jusqu'à un entrepôt de matériaux de construction ou livrée directement sur le chantier. À tous ces processus sont associées des consommations d'énergie et les émissions de CO_2 qui n'apparaissent pas lorsqu'on pose la tuile sur le toit. L'énergie grise considère donc l'ensemble des consommations

d'énergie nécessaires à l'exploitation des ressources, pour transformer les matières primaires à des matériaux de construction. Les dépenses énergétiques occasionnées pour éliminer les déchets de production et les éléments de construction à la fin de leur durée d'utilisation sont également prises en compte dans la quantification de l'énergie grise.

Pour comprendre mieux l'impact des matériaux sur l'environnement, on résume 4 étapes importantes dans leur cycle de vie :

4.1.1 Fabrication

Dans le cycle de vie d'un matériau, une grande partie des ressources et de l'énergie est consommée à l'étape de sa fabrication. Elle regroupe l'extraction des matières premières, leur transport jusqu'à l'usine ainsi que leur transformation en matériaux utilisables pour la construction.

La connaissance sur la manière de la fabrication des matériaux nous donne des informations sur sa qualité et ainsi que la quantité d'énergie nécessaire à la production. Cette information est utile pour comprendre l'impact de la production du matériau aussi bien au niveau local que global.

Les techniques de fabrication contemporaine des matériaux se sont diversifiées de façon très importante et tendent à s'améliorer. Par exemple, la fabrication du ciment consiste en l'extraction puis la cuisson de calcaire et d'argile, produisant ainsi du clinker, qui sera ensuite broyé finement avec du gypse. La cuisson de calcaire et d'argile à très haute température génère une quantité très importante des émissions de CO_2[1]. Pour diminuer cette quantité, il est possible de jouer sur la performance énergétique des machines de la chaine de production, de remplacer une partie du clinker en enrichissant le ciment grâce à des coproduits ou d'utiliser des combustibles alternatifs neutres en CO_2.

1. [9] Approche environnementale, dégagement CO_2, p.128

4.1.2 Transport

Les produits finis doivent être acheminés de l'usine de fabrication jusqu'au site de construction. Divers moyens de transports tels les camions ou les trains peuvent être utilisés. Les données concernant le transport de marchandises sont évaluées par tonnes transportées et par kilomètres parcourus. Les résultats sont directement proportionnels à ces deux paramètres ainsi qu'au type de véhicule utilisé. Chaque matériau peut provenir d'une usine différente et être acheminé par un ou plusieurs moyens de transports différents.

La distance parcourue par un matériau depuis la fabrique jusqu'au chantier diffère en fonction de la localisation des usines. Il est toutefois difficile de traiter chaque situation au cas par cas sans demander à l'utilisateur un nombre considérable d'informations qu'il ne sait pas toujours.

Les étapes du transport des matériaux de constructions entre l'extraction et le chantier sont simplifiés ainsi :

- Le premier étape inclut le transport des matières primaires vers le site de fabrication pour en produire des matériaux de constructions ;
- En cas de préfabrication des éléments de constructions, il faut ajouter le transport du matériau de son propre site de fabrication vers le site d'assemblage où il est assemblé avec d'autres matériaux. L'impact généré par cette étape tient compte de la distance de déplacement et des moyens de transport utilisés pour chacun de ces matériaux. Pour les matériaux qui sont transportés directement du site de fabrication sur le site du chantier, cette étape n'existe pas.
- Le dernier étape consiste au transport d'un matériau ou d'un élément de construction depuis son site d'assemblage sur le chantier où il va être monté. En général, les transports finaux vers le chantier peuvent être négligés dans les calculs de l'énergie et les émissions grises, à moins qu'ils nécessitent une très forte consommation d'énergie, par ex. transports par hélicoptère. Les données des écobilans KBOB prennent en compte l'énergie consommée pendant le transport jusqu'à un éventuel entrepôt régional mais pas depuis cet entrepôt jusqu'au chantier définitif[1].

1. [18] Données des écobilans dans la construction, version 2016, p. 18 à 19

De plus, l'énergie utilisée pendant le transport tient compte non seulement de l'utilisation du véhicule mais aussi de sa fabrication, de sa maintenance et de son élimination une fois sa vie terminée. L'aménagement et l'entretien des routes et des voies ferrées sont également pris en compte. Mais par contre, les flux nécessaires à la construction des infrastructures de transport, par exemple, le transport routier, l'asphalte et le rouleau de route peuvent être négligé car l'infrastructure n'est pas utilisée que pour le transport des produits. En effet, il est aussi destiné par des tiers sans rapport avec la construction, comme des particuliers, les transports publics, etc[2].

2. [18] Données des écobilans dans la construction, version 2016, p. 19

L'impact lié au transport peut représenter une part importante pour certains matériaux de construction, en particulier ceux qui viennent de l'étranger et parcourent une très longue distance par des moyens de transport énergivore. Elle peut aussi être importante lorsqu'il faut transporter des éléments de construction encombrants comme les constructions de fenêtres sur de longues distances. Actuellement, les

grandes masses des matériaux d'un bâtiment en Suisse (béton, bois, briques, tuiles) proviennent des fabrications et des matières premières indigènes. L'énergie de transport de ces éléments de construction massifs ne représente en général qu'un faible pourcentage.

4.1.3 Mise en œuvre, entretien et remplacement

Le type de mise en œuvre de chaque matériau est différent ; il doit être directement réfléchi dès le début de la conception du projet par rapport à son emplacement et par rapport aux conditions géographiques du site. Par exemple, dans le cas de terrains en altitude ou de ceux en pente, ceux-ci nécessitent un degré élevé de préfabrication. Ceci génère un assemblage plus rapide et plus facile. Par contre, une préfabrication demande de l'énergie pour le transport des matériaux jusqu'aux entreprises de préfabrication.

Lorsque la construction du bâtiment est terminée, celui-ci peut alors être occupé et a besoin d'être entretenu. Par exemple, une enveloppe vitrée a besoin de nettoyage de temps en temps, pour préserver son aspect primaire esthétique. Certains autres éléments de construction, comme une façade, vont se dégrader ou être obsolètes avec le temps. Afin de garder le bâtiment en bon état, les éléments peuvent être remplacés après un certain nombre d'années. Un cas fréquent consiste à améliorer la performance thermique de l'enveloppe en remplaçant sa partie isolante par des nouveaux matériaux à haute performance. Les matériaux de remplacement passent eux aussi par les phases de fabrication et de transport.

Il est important de rappeler que l'énergie consommée lors de l'entretien des matériaux, ainsi que les émissions de CO_2 liées ne sont pas comprises dans la limite du système et donc non plus dans le calcul final[3]. Mais à nos yeux, elles sont suffisamment importantes pour être mentionnées dans notre étude.

3. [18] Limite du système SIA pour le calcul de l'énergie grise et la base de donnée KBOB utilisée par Lesosai

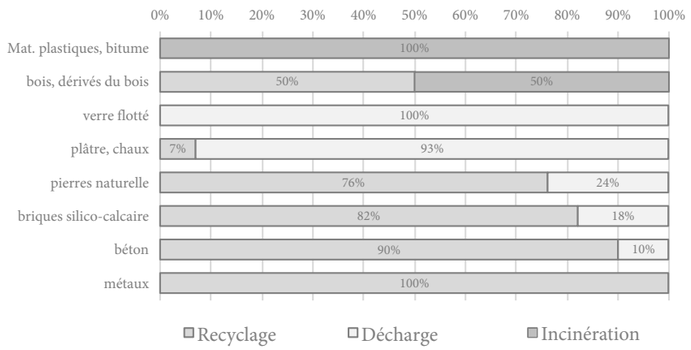
4.1.4 Élimination

Aucun bâtiment n'est éternel. A la fin de sa vie, il doit être démonté et les éléments de construction en sont dissociés. Cette étape va engendrer des déchets qu'il faut éliminer. Cela est aussi le cas des rénovations; les matériaux retirés doivent également être pris en compte pour les éliminer. Lors du démontage, les éléments de construction se décomposent en matériaux ou en mélange de matériaux. La phase d'élimination comporte l'énergie pour la démolition du bâtiment et l'acheminement des déchets vers des sites de tri avec différentes filières d'élimination : recyclage, décharge et usine d'incinération[4].

4 [18] Annexe 10, élimination, p. 20

Chacune de ses filières ont des dépenses énergétiques différentes. Il n'est pas rare aujourd'hui d'effectuer une déconstruction sélective du bâtiment, au cours de laquelle chaque matériau est séparé sur le chantier selon son type d'élimination. Dans tous les cas, il faut prévoir de l'énergie pour transporter les déchets vers leur site approprié. Comme pour le système de mise en œuvre du bâtiment, l'élimination des déchets du bâtiment doit aussi être anticipée dès la conception du projet en facilitant son démontage et en favorisant la réutilisation des matériaux de construction.

Les filières d'élimination pour les principaux matériaux de la construction[1]



1. Tableau tiré du cahier technique SIA 2032, Élimination, p. 20

Pour les matériaux issus du recyclage, l'impact lié à la phase de fabrication est différent mais les autres phases comme le transport ou le montage ne sont pas affectées. Le recyclage permet une revalorisation des déchets et se révèle moins polluant pour l'environnement qu'une autre méthode d'élimination. De cette manière, les atteintes à la nature sont moins nombreuses puisque beaucoup moins de matériaux doit être extraits et que moins d'espace est utilisé pour les décharges. Ainsi, il limite aussi l'incidence du transport pour la transformation et l'approvisionnement des matières premières. La paille des céréales, employée à la confection d'isolations, est un bon exemple de revalorisation de déchets agricoles.

4.2 Quelques matériaux innovants

Dans ce chapitre, nous avons choisi 4 matériaux qui deviennent de plus en plus courants dans les constructions écologiques en Suisse. Selon un plan qui rend compte des critères décrits précédemment, ils se traduisent en caractéristiques, propriétés et comportements selon les différents points de vue, de l'architecture, de la construction et de l'environnement.

4.2.1 La paille

I. Caractéristique architecturale

Historique
L'utilisation de la paille est très ancienne, principalement en association avec la terre et sous la forme de "torchis", est un matériau de la construction. La paille est connue depuis toujours comme un matériau de couverture et d'isolation.

Avec le développement des techniques agricoles vers l'an 1750, les bottes de paille présentent une forme plus régulière, compacte et facile à entasser. Ce matériau, en comparaison avec le torchis, est plus isolant et plus simple à mettre en œuvre. Les premières apparitions des maisons avec une structure porteuse en bottes de paille se trouve en 1800 dans la région de Nebraska aux États-Unis. Les bottes de paille, par manque des matières premières et en tant que résultat de la culture agricole, sont utilisées dans la construction. Pourtant avec le développement des différents modes de transport, les constructions en paille ont été substituées par des matériaux conventionnels qui utilisent plus d'énergie. En France, quelques maisons témoins en paille sont apparues vers 1921 mais par la faute des matériaux modernes de l'époque, ces constructions ont rapidement disparu.

Pourtant, depuis 1990, à cause des problèmes énergétiques et environnementaux, l'utilisation de la paille en tant que matériau de la construction tend à être revalorisée. Les nouveaux paradigmes du développement durable encouragent la ré-application de cette isolation naturelle. En principe, la construction en paille s'est d'abord développée aux États-Unis, puis en Australie, au Canada et en Europe[2]. Aujourd'hui, il y a de plus en plus d'architectes et de professionnels qui s'intéressent à concevoir des bâtiments en paille.
En Europe, depuis ces dernières années, des nombreuses recherches et investigations sur la construction en paille sont en cours de processus. L'Autriche est un pionnier dans l'étude et la réalisation des bâtiments en paille. Par exemple, le projet de S-Hause près de Vienne est un prototype d'un bâtiment en bottes de paille[3].

2. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 2

3. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 23

Utilisation en suisse
En Suisse, les maisons en paille sont apparues vers l'an 2000. Ces constructions sont en nombres limités et ont été réalisées plus en Suisse alémanique qu'en Suisse romande. Pourtant, depuis 2010, grâce aux réseaux d'information, ces projets sont en cours de développement, notamment dans la commune de Lausanne[4].

4. [22] Construction en paille en Suisse, p. 11

Fig. 1, 2 [44] Maisons en bottes de paille, W. Schmidt, Lana, Italie

Par exemple, le bâtiment administratif ECO46 à Lausanne permet d'évaluer les performances d'un bâtiment en bottes de paille.
A noter qu'en Suisse, les bâtiments en paille se sont développés malgré le manque des réglementations propres à ce type de construction. Avec les demandes accrues, la situation est en cours de progression. Récemment, dans le Canton de Vaud, une autorisation de construction pour une maison en paille est acceptée[1].

1. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 23

L'architecte Werner Schmidt est un précurseur dans la technique de construction de paille en suisse. Il essaie de trouver une nouvelle conception architecturale avec la caractéristique distinctive de la paille, afin de réaliser des bâtiments remarquables.

La disponibilité de la paille dépend de la réserve de céréales. De ce fait, pour une considération de la production à l'échelle régionale, il est intéressant de voir la disponibilité de ce matériau dans le pays. Généralement, la paille est utilisée pour l'élevage et, à cause d'un grand nombre d'élevage en suisse, sa production ne suffit pas et nécessite une importation depuis des pays voisins, comme la France et l'Allemagne. Pourtant, l'utilisation de la paille en tant que matériau de construction ne demande qu'une moindre proportion de la réserve nationale. Le Canton de Vaud est actuellement le plus grand producteur de la paille en suisse[2].

2. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 16

Carte montrant le volume de blé produit par région en Suisse[3]

3. [21] Carte Suisse

Techniques de mise en œuvre

Le choix des techniques de mis en œuvre dépend de la hauteur du bâtiment, le savoir-faire local, les ressources régionales, la réglementation constructible et le choix esthétique.
La technique constructive en bottes de paille se subdivise en deux grandes catégories :

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 1 [21] Schéma de technique bottes de paille porteuses

Fig. 2 [21] Schéma de technique bottes de paille non-porteuses (CST)

1. Technique bottes de paille porteuses :
Cette technique est également appelée la méthode de Nebraska car elle se réfère aux premières maisons construites en paille. Les murs sont constitués des grosses bottes de paille, comme un mur de brique sans le mortier. Les bottes sont comprimées entre les lisses du soubassement et les pannes sablières, puis elles sont protégées par un enduit à l'extérieur et à l'intérieur.

Parfois, des tiges de bois ou de métal peuvent être disposées dans les murs pour empêcher les mouvements. Dans la technique de paille porteuse, il est important de construire les cadres de portes et de fenêtres suffisamment rigides pour qu'ils puissent supporter le poids. Cette méthode est souvent utilisée pour des bâtiments de petites hauteurs de 3 étages[1]. Avec cette technique, des ouvrages remarquables sont réalisés par l'Atelier Werner Schmidt.

1. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 8

2. Technique bottes de paille non-porteuses :
a. La paille qui a un rôle isolant, est placée entre les montants de la structure en bois. L'avantage est qu'avec cette technique, des bâtiments jusqu'à 6 étages peuvent être construits[2]. C'est la technique la plus utilisée pour la construction en paille aujourd'hui. Il existe autant de variations de constructions que de types d'ossature en bois.

2. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 9

Deux fameuses méthodes dérivées de cette technique ont été définies:

- La technique CST (Cellule sous tension) : cette méthode a été développée principalement en France[3]. Les bottes de paille sont placées en force entre des tasseaux verticaux, puis pressées par des tasseaux horizontaux. Dans cette structure, la paille est semi-porteuse et donne l'avantage de réduire la quantité de bois nécessaire pour la technique non porteuse, tout en fournissant une structure plus forte que la technique du Nebraska.
- La technique du GREB : cette technique s'est développée au Canada[4]. C'est une construction à doubles ossatures de bois légères qui sont liaisonnées par des tiges métalliques et les bottes se placent entre ces deux ossatures.

3. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 6

4. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 6

b. Cette méthode constructive permet également la préfabrication. Les panneaux de mur qui sont dimensionnés par rapport aux largeurs des bottes, sont préparés en entreprise puis transportés sur le chantier. Les bottes de paille sont placées en force dans les panneaux en atelier ou directement sur le site. C'est la méthode industrialisée de la construction en paille. L'avantage est que ces éléments déjà fabriqués peuvent être plus facilement assemblés en chantier, tout en réduisant le temps de montage. Les variations constructives sont nombreuses.

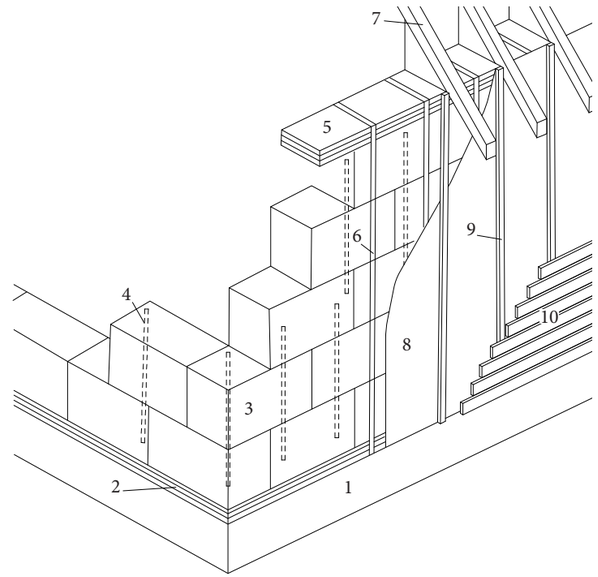


Fig. 1

Composition du mur

1 Soubassement de 50 cm sur fondation avec barrière d'étanchéité

2 Planches en bois renforcées (lisse basse)

3 Bottes de paille de 80 x 40 x 50 cm

4 Tiges de liaison des bottes de paille avec lisses hautes et basses

5 Planches en bois renforcées (lisse haute)

6 Sangles de compression

7 Chevrons de toiture

8 Enduit terre

9 Sous-construction du bardage (contre-lattes)

10 Bardage bois

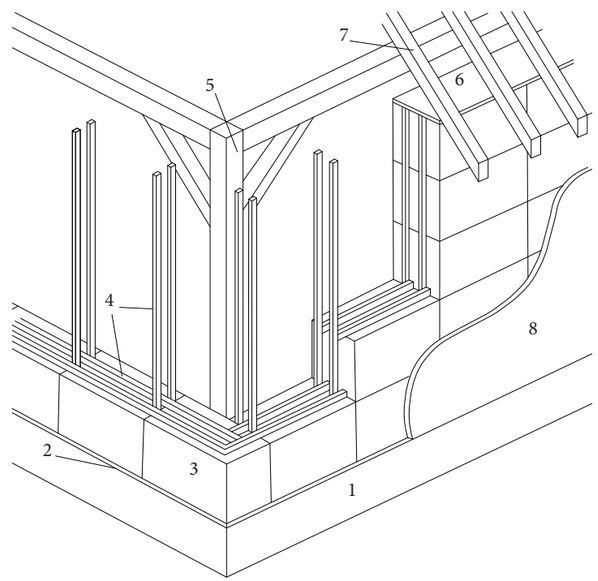


Fig. 2

Composition du mur

1 Soubassement de 50 cm sur fondation avec barrière capillaire

2 Planche en bois (lisse basse)

3 Bottes de paille de 80 x 40 x 50 cm

4 Tasseaux de 4 x 4 cm pour compression horizontale et verticale

5 Structure porteuse en bois

6 Caisson isolé de finition sous-toiture

7 Chevrons de toiture

8 Crépis à la chaux extérieur

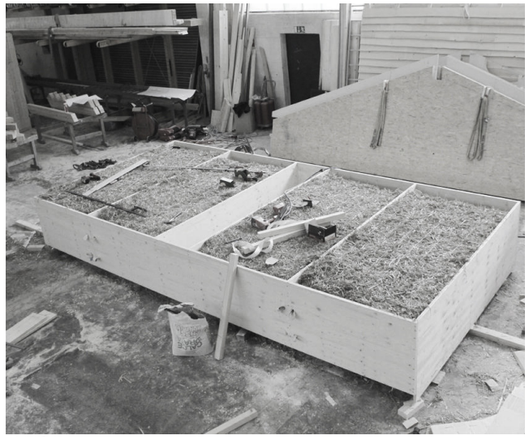


Fig. 1

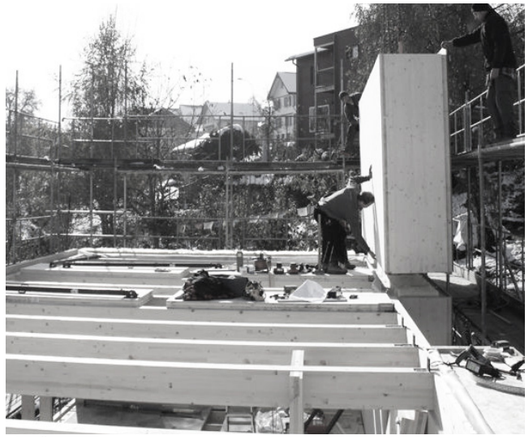


Fig. 2

Fig. 3

Fig. 1, 2, 3 [44] Élément de construction en bottes de paille, W. Schmidt, Knutwil, Suisse

1. [22] Techniques de construction, p. 15

Aujourd'hui, quelques entreprises en Autriche, en Belgique, en France et en Angleterre offrent une étude de faisabilité et ensuite une production des panneaux préfabriqués[1].

Architecture

Étant donné que la construction en bottes nécessite un revêtement contre les agents atmosphériques, un bâtiment en paille peut apparaître comme une construction conventionnelle. Pourtant, ce type de construction est réalisé selon des règles spécifiques qui peut le distinguer des autres bâtiments :

Les revêtements de construction en paille doivent non seulement garantir la protection du mur contre des eaux de ruissellement mais ils doivent également avoir une caractéristique perspirante remarquable pour éviter une possible condensation. Car, lors d'exposition à une humidité élevée, les bottes doivent être séchées rapidement. Trois types de revêtements sont spécifiquement accordés à la construction en paille : les enduits en terre crue, les revêtements à la chaux qui sont appliqués généralement à l'extérieur et les bardages en bois qui sont appliqués sur l'enduit en terre ou en chaux. Ces enduits souples répondent à l'élasticité des bottes et assurent une protection sans fissures, elles offrent également une expression particulière aux constructions en paille. Parfois, ces revêtements exposent la flexibilité des bottes de paille placées au-dessous.

La règle essentielle pour construire avec des bottes de paille est de concevoir une toiture et une fondation bien appropriée. L'avant toit est obligatoire pour la protection du haut des murs contre l'écoulement d'eau. Ainsi le soubassement doit être suffisamment haut et constitué d'un matériau imperméable, afin de protéger le mur en paille des remontées d'humidité du sol. En plus, la forme des linteaux et des appuis des fenêtres doit être bien adaptée à la construction en paille. Ces principes de base changent le visage du bâtiment en lui offrant une base et une finition relativement expressive.

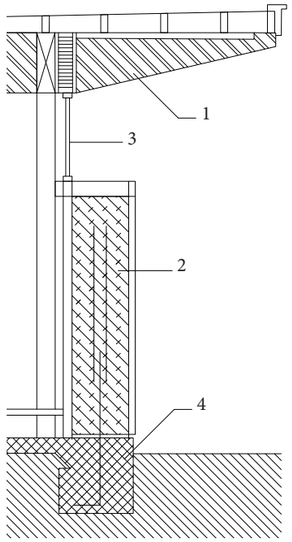
Dans la construction en paille, il faut être également attentif à la question de surchauffe pendant l'été. Pourtant, il existe des méthodes constructives et architecturales pour répondre à ce problème. Un moyen est de concevoir un mur central en pisé afin d'augmenter l'inertie thermique du bâtiment. Cette méthode est utilisée dans le bâtiment administratif ECO46[2]. Le mur épais en pisé est à la fois fonctionnel et expressif. II existe également d'autres alternatives pour diminuer la surchauffe d'une construction en bottes, comme l'utilisation de la terre battue dans les dalles, la gestion des stores, le choix de type de vitrage et la ventilation contrôlée.

2. [22] Impact de la paroi centrale sur l'inertie et la température du bâtiment, p. 33

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3



1 Structure en bois
2 Fenêtre
3 Mur en Bottes de paille
4 Socle en béton

Fig. 4

Fig. 5

Fig. 1, 2 [42] Bottes de paille porteur, Georg Bechter Architektur+Design, Dornbirn, Autriche

Fig. 3 [43] Installation de maintenance en transit, HOK, Californie, États Unis

Fig. 4 [43] Détail constructif de la coupe d'Installation de maintenance en transit

Fig. 5 [44] Maison en bottes de paille, W. Schmidt, Kurtatsch, Italie

Fig. 6 [42] Simma House, G. Bechter, Atelier Heimatstunden et Hittisau, Egg, Autriche

Fig. 7 [44] Elément de construction en bottes de paille, W. Schmidt, Knutwil, Suisse

Un autre caractère spécifique de ces bâtiments est la grande épaisseur des bottes. Ils peuvent occuper une bonne surface du sol et de ce fait, les constructions en paille ne sont pas bien adaptées aux architectures complexes. Pourtant, les épais murs en paille peuvent offrir certaines caractéristiques spatiales à l'intérieur du bâtiment ; ils peuvent même servir de bancs dans l'espace salon. Également dans certain cas, pour que la grande épaisseur des murs ne crée pas d'ombres à l'intérieur, les cadres des fenêtres sont formés de manière à maximiser les apports solaires naturels.

Aujourd'hui, la construction en paille ne se limite pas à des maisons individuelles mais elle permet aussi la réalisation de logements collectifs, des écoles, des bâtiments administratifs et des autres bâtiments publics. En plus, les bottes de paille peuvent même être utilisées pour la rénovation de la façade.

II. Caractéristique physique

Comportement structurel

A l'opposé des matériaux industriels, les bottes de paille ne sont pas homogènes. Par conséquent, leur comportement mécanique varie selon l'orientation des fibres, la compression, la dimension, le taux d'humidité, etc. Bien que cette façon de construire est très simple, il est essentiel d'utiliser des bottes homogènes et de bonne qualité, surtout quand elles sont sèches et bien compressées.

La paille est un matériau flexible, par conséquent, elle résiste mal à la charge ponctuelle et nécessite une prévention au tassement différencié. Généralement, dans la construction en paille, après application des revêtements sur les deux faces des bottes, les enduits, proportionnellement rigides, peuvent supporter quasiment toutes les charges de compressions et toutes les forces de contreventement.

En plus, de nouvelles études montrent que même un mur en bottes de paille sans application d'enduit peut supporter une quantité remarquable de charges verticales et de forces horizontales[1]. Par conséquent, en cas de défaut dans les enduits, la paroi peut garantir la résistance mécanique. Grâce à ses propriétés élastiques, les bottes de paille offrent également de bonnes résistances au séisme.

1. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 11

Comportement thermique

Du fait que l'air reste enfermé dans les bottes de pailles bien densifiées, ce matériau constitue une bonne isolation thermique. Pour les bottes

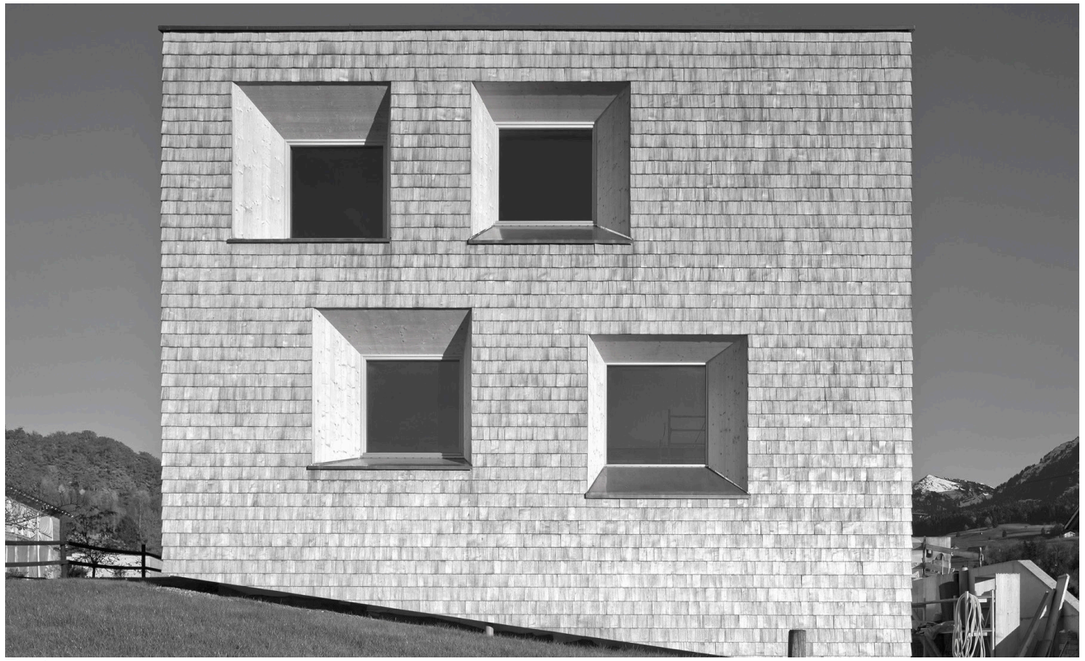


Fig. 6

Fig. 7

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 1, 2, 3 [44] Rénovation de façade avec des bottes de paille, W. Schmidt, Susch, Suisse

1. [22] Controverse de la conductivité et de la capacité thermique de la paille, p. 20

2. [22] Épaisseur des murs en paille, p. 35

de haute densité de 250 kg/m^3, le coefficient de conductivité thermique est d'environ 0.07 W/mK[1]. L'étude sur les aspects économiques et la capacité thermique des bottes de paille montre que l'épaisseur parfaite pour un mur en paille est de 80 cm[2]. Avec cette épaisseur, le standard Minergie-P est atteint, autrement dit la consommation de chauffage est pratiquement nulle.
En conséquence, dans la technique de bottes porteuses, l'avantage est que la grande épaisseur de paille peut servir à la fois à la structure et à l'isolation du bâtiment. En ce qui concerne la technique de bottes non porteuses, la paille bien comprimée crée un pont thermique et peut résoudre le problème de la faible inertie thermique de l'ossature en bois. Pourtant, dans les deux techniques, il est important d'être attentif aux ponts de froid entre les bottes, ces vides peuvent être remplis avec de la paille en vrac ou un mortier léger.

Comportement à l'humidité
Les protections contre l'humidité et l'écoulement d'eau influencent grandement l'expression de la façade d'un bâtiment. La résistance à l'humidité est expliquée plus en détail dans la phase de "caractéristique architecturale" dans les pages précédentes.

En principe, les bottes de paille doivent rester sèches durant toute la vie du bâtiment. Dans la plupart des cas, les problèmes qui sont engendrés par l'humidité sont dus aux faiblesses de la conception dans la construction. Si les règles générales de la construction en paille sont respectées, le bâtiment peut rester en bonne état. Les détails constructifs principaux sont : un avant toit bien adapté, un socle de minimum 30 cm et un revêtement perspirant[3].

3. [21] Étude de faisabilité de la construction en bottes de paille, p. 19

En ce qui concerne les rongeurs et les insectes, une fois que la paille est bien sèche et compressée, il n'y a plus de risques face à ces agents extérieurs.

Résistance au feu
Les potentiels risques au feu existent seulement pendant la phase du chantier car les vracs en paille sont très inflammables. Pourtant, une fois que les murs sont montés et que les enduits sont appliqués, cette construction a le même comportement contre le feu qu'une ossature en bois.

Les études sur une façade en ossatures bois, isolée en paille et revêtue d'enduits, montrent que cette construction est conforme au règlement de sécurité contre l'incendie[4].

4. [9] La paille, Comportement au feu, p. 78

III. Impact environnemental

Production

La paille est considérée comme un déchet dans le domaine de l'agriculture. Sa revalorisation en matériau de construction aux cours de ces dernières années est une véritable démarche dans le développement durable. Ce matériau absorbe le CO_2 pendant son élaboration et nécessite très peu de transformations. Par conséquent, dès la phase de production, elle aide à diminuer considérablement les impacts environnementaux. Aujourd'hui, les processus de fabrication de paille comme matériau de construction tendent à être industrialisés. Il existe des entreprises qui transforment des bottes de paille en blocs standards et homogènes[1]. Ces fabricants, avec les nouvelles techniques de compression, tout en contrôlant l'hygrométrie du matériau, offrent des blocs en paille avec des dimensions et des densités égales. Cependant, ces processus peuvent augmenter l'impact environnemental dans la phase de production.

1. [9] La paille, Industrialisation du procédé et avis technique, p. 77

Transport

Parce que la production de paille dépend du marché des céréales, la disponibilité de ce matériau varie selon chaque région et chaque pays. En général, il est préférable de considérer la production à l'échelle régionale afin de réduire les impacts environnementaux liés aux transports. Si la construction en paille est réalisée par la technique de bottes non porteuses, il faut également considérer les ressources locales de bois. En principe, dans les régions peu boisées, la technique de Nebraska est mieux appréciée.

Mise en œuvre et entretien

En principe, la phase de montage du chantier n'engendre aucuns impacts environnementaux. En général, le coût de la construction en paille est le même que pour une construction conventionnelle. Par contre, si la phase de montage est issue d'une auto-construction, le coût peut baisser.
Pour ce qui est de l'entretien, la construction en paille est durable, une fois que les détails constructifs principaux sont bien appliqués. Même si, faute de précision, il existe des problèmes dans la construction, la réparation est simple. C'est pour cela qu'il faut choisir des revêtements appropriés mais également facile à réparer.

Fin de vie

Le recyclage des déchets, en fin de vie d'un bâtiment en paille, démontre également beaucoup d'intérêts ; dans la phase d'élimination, la paille peut être utilisée comme un combustible et se substitue à un carburant conventionnel. Ainsi, il est même possible d'engendrer un impact positif sur le CO_2 et les ressources.

VI. Conclusion

Avantages

En conclusion, la paille démontre beaucoup d'avantages et offre un nouveau champ d'application dans le domaine de la construction et de l'architecture, avec des objectifs à la fois environnementaux et économiques. Il s'agit d'une ressource naturelle et disponible localement avec une mise en œuvre simple qui favorise l'auto-construction. Elle présente également des nouveaux concepts architecturaux distinctifs, tout en offrant un lieu de vie confortable et sain.
Une étude montre que le choix de la paille comme un matériau dans la construction a de très faibles impacts environnementaux et en particulier, son utilisation comme un combustible à la fin de sa vie, stocke plus de CO_2 qu'elle n'en émet[2]. En plus, ce matériau offre une isolation thermique remarquable qui garantit le confort intérieur. Dès lors, la paille peut être considérée comme une réponse concrète pour diminuer l'énergie grise et peut même avoir un aspect positif sur l'absorption de CO_2.

2. [22] Analyse détaillée du cycle de vie ECO46, p. 55

Désavantages

Malgré cela, la construction en paille souffre de plusieurs handicaps dans son développement :
-La surface utilisée par les murs dans les bâtiments en paille est difficilement justifiée dans les villes avec les restrictions de densification.
-La paille a du mal à trouver sa place dans le domaine de construction en raison de son caractère agricole et de son image trompeuse d'être un matériau inflammable et non durable. Aujourd'hui, le marché des bottes de paille est en expansion. Cependant, il n'existe pas beaucoup de fabricants s'intéressant à la construction en paille. De ce fait, le manque d'industrie pour la production et la construction de ce matériau conduit à des complications en termes de faisabilité des bâtiments. Afin de développer le marché des bottes de paille en tant que matériau de construction, il faut bien informer les professionnels et le grand public des bénéfices de la paille et de la présenter comme une alternative intéressante de matériau constructif qui peut satisfaire le standard Minergie-P-ECO.

Fig. 1 [49] Domaine de la Terre, S. Jaure, F. Confino et J-P. Duval, L'Isle d'Abeau, France

Fig. 2 [49] Domaine de la Terre, J-V. Berlottier, L'Isle d'Abeau, France

Fig. 3 [49] Domaine de la Terre, G. Perraudin et F. Jourda, L'Isle d'Abeau, France

4.2.2 La terre crue

I. Caractéristique architecturale

Historique

La terre crue, qui est disponible en quantité quasi illimitée, est utilisée comme le matériau de construction depuis les premières heures de l'humanité. Les constructions traditionnelles en terre sont présentes dans le monde entier. Ce sont des bâtiments domestiques aussi bien que des édifices prestigieux. Ces constructions, avec leurs différentes techniques de mise en œuvre, sont adaptées aux qualités des matériaux disponibles. Il existe même des villes qui sont construites entièrement en terre crue. En Europe, la technique de torchis s'est développée au Moyen âge. Aujourd'hui de nombreuses constructions en terre sont toujours présentes dans les centres-villes.

Les recherches scientifiques sur la construction et la stabilisation de la terre commencent à se développer à partir des années 1920 et se sont intensifiées entre les années 1940 à 1960. Néanmoins, la construction en terre disparaît à cause de l'évolution industrielle avec le développement de la technologie du béton qui permet de construire plus rapidement.

Ensuite, dans les année 1980, en raison des enjeux environnementaux, ce matériau est à nouveau réutilisé. C'est à cette époque, qu'avec des recherches et des expérimentations, les performances du matériau de terre et les savoirs constructifs sont améliorés.

Par exemple, la réalisation du Domaine de la Terre en 1982, dans la ville de l'Isle-D'abeau en Isère, est une opération expérimentale sur la construction en terre crue[1]. Le Domaine de la Terre est un quartier d'habitations sociales qui montre la volonté de réemployer l'architecture de terre. En effet, il s'agit d'une démonstration technique de son potentiel mais aussi des problèmes de la construction en terre.

Aux cours des dernières années, à cause des impacts environnementaux accrus sur la planète, plus d'attention est portée au développement durable. Par conséquent, la construction écologique en terre trouve une nouvelle importance dans l'architecture contemporaine. Aujourd'hui, les réseaux associatifs qui fournissent des informations pratiques participent également au développement du mode constructif de la terre. De plus en plus de sociétés commerciales se sont spécialisées dans la production d'éléments préfabriqués et favorisent la mise en œuvre de construction en terre. Il est à noter que cette progression est encore très limitée malgré son évolution.

1. [25] Une dynamique sans précédent au début des années 1980, p. 6

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Utilisation en suisse

En Suisse, le manuel de construction en pisé de l'architecte d'Alfred Zschokke, publié en 1849, a une influence remarquable sur la construction en terre[1]. Le manuel raconte la technique et l'expérience de la réalisation de huit fermes dans le canton d'Argovie qui ont été réalisées rigoureusement par Zschokke. Le travail scientifique de l'architecte sur la technique de mise en œuvre de la construction en terre, porte un succès important dans cet ouvrage. Zschokke, passionné par la possibilité de l'auto-construction de construction en pisé et son aspect économique, démontre dans son document que ses bâtiments coûtent trois fois moins cher que ceux en maçonnerie de pierre.

L'artiste autrichien, Martin Rauch, a également réalisé des œuvres remarquables en Suisse. Il a fait de nombreuses recherches sur les combinaisons possibles de la terre avec d'autres matériaux et sur l'optimisation de la mise en œuvre. Il porte également de l'importance au travail de finition. L'artiste joue avec la couleur et les proportions de grains dans la terre pour lui donner un aspect brut. Par exemple, le projet de Sihlhölzli à Zurich, en collaboration avec l'architecte Roger Boltshauser, est une construction combinée de béton armé et de terre battue. Le socle est une dalle en béton et les murs en pisé sont montés avec des couches successives. Les murs en terre contiennent des barres armées qui prennent la dalle en béton de l'étage au-dessus. Ce processus est répété pour l'étage supérieur. La toiture, également faite en béton armé, contient un puits de lumière pour éclairer la cage de l'escalier.

L'expression de pisé se trouve également à l'intérieur du bâtiment. En 2008, le bureau d'architecte s2vd, réalise un projet de transformation d'une ancienne maison à Grand-Saconnex tout en densifiant la parcelle et en y construisant trois maisons mitoyennes[2]. Ce projet, avec une expression contemporaine, présente rigoureusement des cultures constructives locales et une logique fonctionnelle. En effet, cette logique vernaculaire assure la régulation thermique du bâtiment par l'inertie de la construction en masse dans les parties basses et une ossature en bois bien isolée dans les parties hautes. Dans ces nouvelles maisons, le mur en pisé central satisfait le confort thermique et hygrométrique tout en offrant un revêtement intérieur expressif en terre crue.

1. [24] L'influence d'Alfred Zschokke, p. 15

Fig. 1 [47] Sihlhölzli, M. Rauch et Boltshauser Architekten AG, Zürich, Suisse

Fig. 2 [47] Pavillon d'école Allenmoos II, M. Rauch et Boltshauser Architekten AG, Zürich, Suisse

2. [24] Trois murs trumeaux pour trois villas contiguës, p. 23

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 1 [47] Ecole d'agriculture de Mezzana, M. Rauch et Conte Pianetti Zanetta Architetti, Mezzana, Suisse

Fig. 2 [23] Maison à Flims, M. Rauch et FeBruAr, Flims, Suisse

Techniques de mise en œuvre
La première étape de la construction en terre, avant la définition de la mise en œuvre, est d'identifier les propriétés du matériau puisque le choix de la technique constructive dépend de la caractéristique du matériau utilisé. La caractéristique de la terre varie à chaque endroit. Le pourcentage de graviers et leur taille détermine la solidité de la terre et le pourcentage d'argile renseigne sa cohésion et sa plasticité.

La qualité de matériau de terre peut être améliorée par le processus de stabilisation. Ce procédé est réalisé selon différentes techniques: la compression augmente la densité et la résistance de la terre, l'ajout de fibres végétales renforce la résistance de la terre à diverses sollicitations et dilatation thermique et l'ajout de substances, comme la chaux et le ciment, améliore la stabilisation de la terre. Pourtant, cette dernière méthode supprime la qualité naturelle et la capacité de recyclage complète de la terre. La qualité du matériau de la terre a un impact majeur sur la durabilité de la construction en terre, De ce fait, les connaissances sur le matériau sont tout autant importantes que la technique de construction.

Les techniques de mise en œuvre de la terre sont classées en trois grandes catégories :

1. Construction monolithique :
a. La première technique dans cette catégorie est celle du pisé. Elle est le plus fameux mode de mise en œuvre de la construction actuelle en terre crue. Les murs en pisé sont des murs porteurs qui peuvent supporter plusieurs étages. Ils sont souvent montés par la terre d'excavation du bâtiment. Le pisé est un béton naturel et écologique. Dans cette technique, la terre crue est compactée dans un coffrage en couches successives à l'aide des outillages de compresseur. A noter que le béton est né de la technique du pisé. Dans un mur en pisé, les graviers et les cailloux restent associés à l'aide de la partie sableuse et argileuse de la terre. Le premier béton est constitué de la même manière, cette fois la terre graveleuse est stabilisée au ciment, puis le mélange est coulé dans des coffrage à pisé et compacté à l'état humide. Après l'amélioration du béton, son mélange passe d'un état plastique à liquide.

b. La seconde technique est celle de la bauge ; les murs massifs et souvent porteurs, sont montés sans l'aide de coffrage avec une terre suffisamment plastique. Les murs de la bauge sont construits par des succession de couches de terre, généralement d'une soixantaine de centimètres d'épaisseur.
2. Construction maçonnée :

Ce mode de mise en œuvre ressemble à celui de la maçonnerie en brique. Deux fameuses techniques de construction maçonnés existent. D'abord, celle d'Adobe pour laquelle les brique de terre crue sont moulées soit à la main soit à l'aide de machine. La deuxième technique est celle de bloc comprimé ; les blocs sont comprimés dans des moules ou avec une presse.

3. Construction mixtes :
Dans cette catégorie, la technique de torchis est la plus connue. Le torchis est une technique de remplissage d'ossature de bois avec un mélange de terre. La terre est généralement mélangée avec des fibres végétales comme la paille. Il existe deux types de mélange : le torchis lourd qui est constitué de beaucoup de terre et d'un peu de paille formant une armature. Ce torchis a une capacité d'inertie thermique élevée. Le deuxième est le torchis allégé qui est formé avec beaucoup de paille et peu de terre. Le torchis allégé est privilégié à cause d'une isolation thermique remarquable. Les deux types de torchis peuvent être utilisés ensemble et forment une double paroi : un torchis allégé à l'extérieur et un torchis lourd à l'intérieur.

La technique du pisé
Aujourd'hui, parmi tous les type de mises en œuvre de terre crue, la technique de pisé a une grande importance dans la construction en terre et l'architecture contemporaine. Le mur en pisé, au contraire de la technique maçonnée, est un élément monolithique. De ce fait, il nécessite moins de travail de fabrication. Et, en le comparant avec la technique du torchis, la terre se ne cache pas derrière des éléments de structure et elle s'expose soit en façade, soit à l'intérieur du bâtiment.

En plus, aujourd'hui, les recherches qui portent sur la connaissance du matériau et sur la mécanisation de la production ont modifié la nature des chantiers de construction en pisé. Ces nouvelles innovations sont réalisées pour réduire la quantité de travail physique de la fabrication et la mise en œuvre de la construction en terre. Par conséquent, ces progressions minimisent également le temps du processus. La phase de compression de la terre est la phase la plus difficile et lente de la construction en pisé. Les murs en pisé ne peuvent pas être coulés étages par étages, comme celui du béton.

La terre doit être compactée couche par couche et cela ne peut impliquer qu'une certaine hauteur de coffrage. Ce processus a également besoin d'une énorme main d'œuvre. Dès lors, la modernisation des outils de compactage est cruciale. Les procédés de compactage avec des plaques vibrantes permettent une plus forte

compression. Les techniques mécanisées conduisent un succès grandissant pour la réalisation de murs en pisé, surtout en Suisse, France, Allemagne, Autriche, États-Unis et Australie[1]. Par exemple, pour augmenter le rendement de la technique du pisé, l'artiste Martin Rauch a beaucoup travaillé sur les méthodes de la compression du matériau. Il a trouvé une nouvelle technique pour damer la terre avec un rouleau compresseur en remplaçant la technique à la main. Cela permet une compression de la terre plus rapide et moins pénible. En plus, l'évolution des techniques de coffrage offre une résistance accrue, une variété de formes et des facilités de manutention. Les fabricants proposent également des intégrations de gaines techniques dans les murs en pisé.

1. [46] Pisé moderne

De nouvelles techniques de mise en œuvre se sont développées au cours de ces dernières années et à l'aide de celles-ci, la construction en terre est favorisée par rapport aux conditions de chantier d'aujourd'hui :

1. Terre coulée ou pisé coulé :
La terre coulée, qui a été mise au point par le laboratoire CRATerre, est un béton de terre[2]. Sa mise en œuvre se fait comme le béton ; il est coulé humide avec un peu de ciment. Au lieu de 18% de ciment pour du béton, la terre est stabilisée avec 2 à 5% de ciment[3]. Il est nécessaire que la terre soit constituée de la bonne granulaire. Soit, il faut la tamiser si elle est déjà graveleuse, soit il faut y ajouter des granulats si elle est trop fine. L'objectif de cette technique est de reprendre la technologie du béton pour l'adapter à la mise en œuvre de la terre battue afin de réduire les coûts de la main d'œuvre élevés dans la mise en œuvre du pisé, tout en améliorant la stabilisation.

2. [45] Cultures constructives et développement durable

3. [25] Tour d'horizon des recherches en France, p. 15

2. Technique des éléments préfabriqués :
La préfabrication représente un nouveau paradigme dans la construction en pisé, autant sur le plan quantitatif que sur celui qualitatif. Ainsi, il donne plus d'options pour trouver des projets qui peuvent être exécutés avec la terre battue. C'est notamment le cas des projets à grand échelle.

Aujourd'hui le nombre de projets construits avec des éléments préfabriqués a considérablement augmenté. En comparaison avec les murs construits directement sur le site, ces éléments peuvent être produits indépendamment des conditions climatiques. Il est également plus économique car, plutôt que d'employer une équipe d'ouvriers pour préparer la terre sur place, les éléments de mur sont fabriqués à l'aide de machines et ensuite les grues peuvent rapidement

les monter sur le site. De ce fait, leur mise en œuvre est beaucoup plus rapide et mieux accordée avec le temps de chantier d'aujourd'hui. Autrement dit, l'importance de la technique de préfabrication pourrait remplacer le travail humain par les machines.

Par contre, les détails de la construction deviennent de plus en plus complexes car les murs doivent être divisés en éléments. Cela implique une liaison étroite entre le processus de fabrication et celui du chantier. Parce qu'au contraire du pisé, qui est construit sur site, une fois que les éléments sont fabriqués, il n'y a plus la possibilité de déterminer les détails de construction sur le chantier.

Le défi consiste à relier ces éléments pour former un mur sans perdre son homogénéité. Les joints sont remplis avec le matériau de la terre et retouchés à la main. Après avoir séchés, les joints sont presque invisibles. Ceci n'est pas seulement important pour l'aspect visuel mais c'est également une exigence technique pour les contrôles de l'érosion car chaque rupture dans le mur peut conduire à une érosion accrue. Les projets les plus récents réalisés avec des éléments préfabriqués sont : Ricola Kräuterzentrum à Laufen et la Station ornithologique suisse à Sempach[4].

4. [23] Préfabrication, p. 118

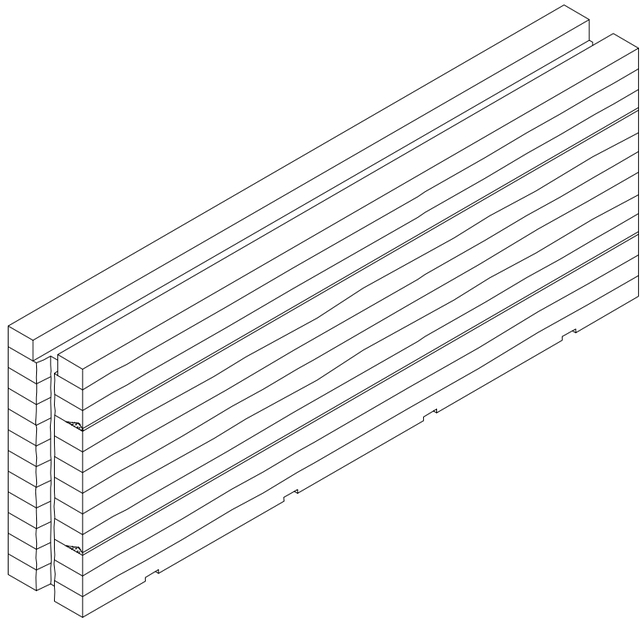
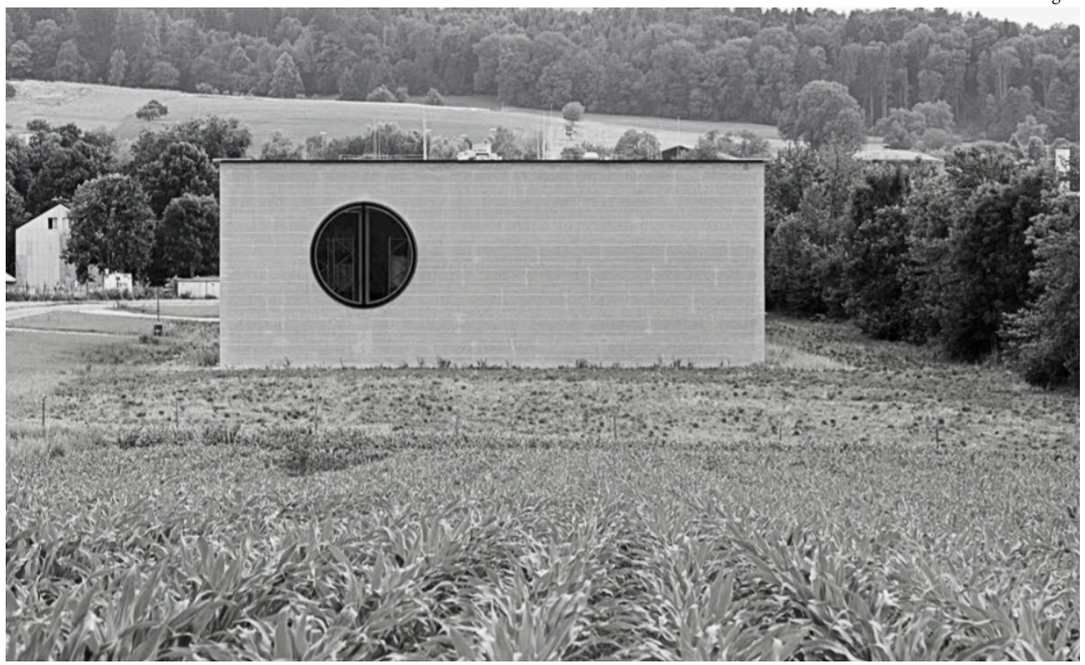


Fig. 1 [23] Schéma de mur en pisé préfabriqué de Ricola Kräuterzentrum

Fig. 1

Fig. 1

Fig. 2



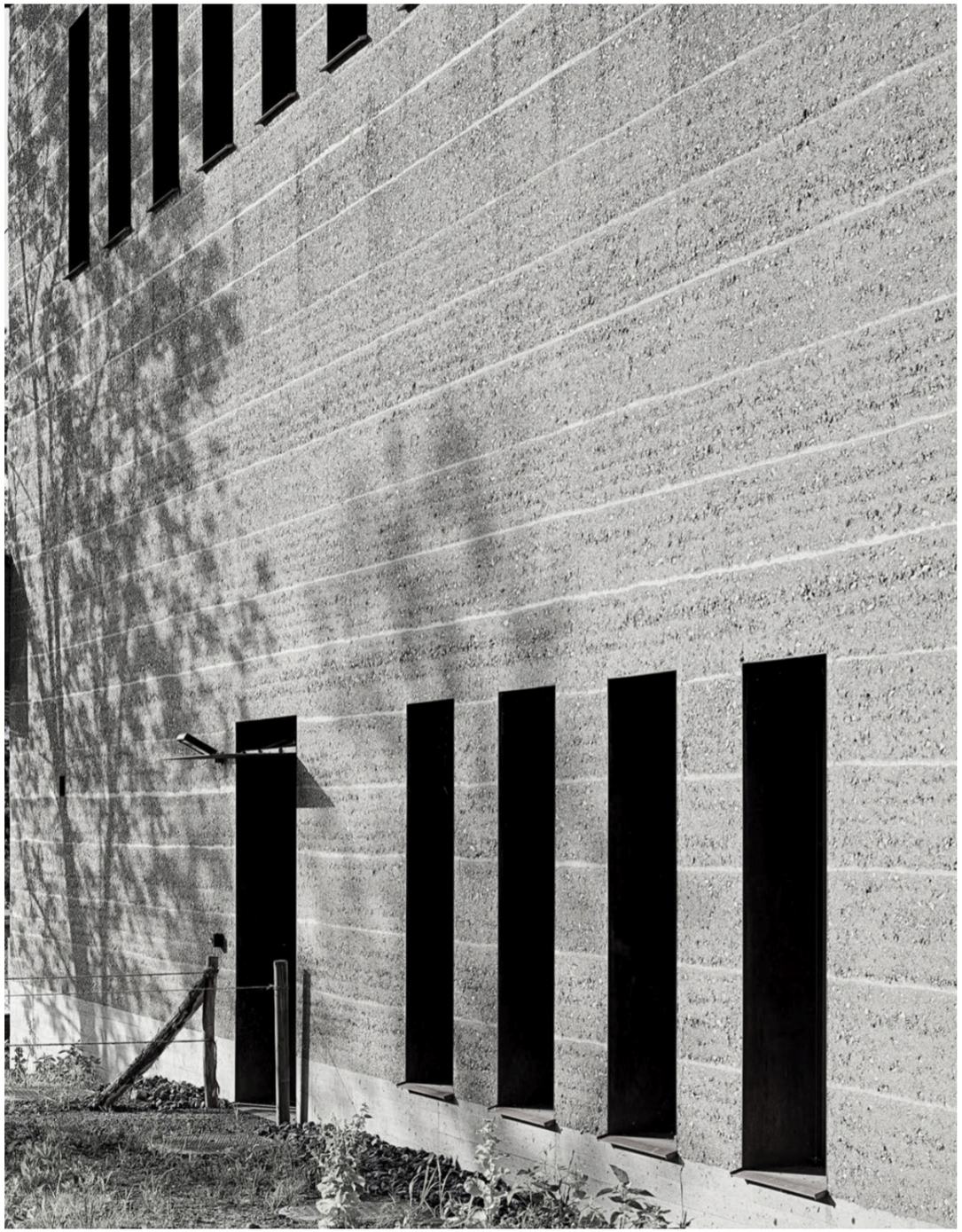


Fig. 3

Fig. 1, 2 [23] Ricola Kräuterzentrum, M. Rauch et Herzog & de Meuron, Laufen, Suisse

Fig. 3 [23] Station ornithologique suisse, M. Rauch et mlzd Architekten, Sempach, Suisse

Fig. 4 [47] Maison de Rauch, M. Rauch et Roger Boltshauser, Schlins, Autriche

Fig. 5 [23] Détail constructif de la coupe de Maison de Rauch

Fig. 6 [47] Ecole d'agriculture de Mezzana, M. Rauch et Conte Pianetti Zanetta Architetti, Mezzana, Suisse

Fig. 7 [23] Détail constructif de la coupe de l'Ecole d'agriculture de Mezzana

Exemple
Les murs en pisé peuvent être classés suivant leur emplacement :

1. Mur exposé à l'extérieur : le grand avantage est que le pisé peut conserver son expression brute en façade. En plus, il favorise la ventilation des murs de terre à l'extérieur. Par contre, le bénéfice d'inertie thermique du pisé est moins faible et, comme l'isolation est placé à l'intérieur, le risque d'avoir des ponts thermiques est plus élevé. Par exemple, dans le cas de la Maison de Rauch, le mur épais de terre s'expose en façade et la couche d'isolation est collée directement à la face intérieure du pisé porteur. Une autre alternative de pisé apparent est illustrée dans le cas de l'école d'agriculture à Mezzana. Dans cet exemple, la façade en pisé est fixée à un système de structure et la couche d'isolation est insérée entre le pisé et la structure. Dans les deux cas, l'exposition de terre à l'extérieur influence considérablement l'expression architecturale des bâtiments.

2. Mur exposé à l'intérieur : le grand inconvénient est que la terre n'est plus présente en façade. Néanmoins, cette méthode garantit un confort thermique plus élevé dû à l'emplacement du pisé à l'intérieur, tout en offrant une expression de revêtement d'intérieur en terre. En plus, si l'isolation est posée à l'extérieur, la construction assure une isolation complète avec l'élimination des ponts thermiques. L'exemple de Ozeanium à Basel illustre l'utilisation du pisé à l'intérieur d'un grand espace public. Dans ce grand aquarium, les couches du pisé représentent les murs de récifs. Dans les étages supérieurs, les couches deviennent plus fines et plus légères, correspondant à la terre au-dessus de la mer. La façade extérieure est construite avec le béton battu et suit le même principe des différentes couches.

3. Mur exposé à la fois à l'intérieur et l'extérieur : aujourd'hui avec cette nouvelle technique, l'isolation peut être intégrée dans un mur double en pisé. L'avantage est que le pisé peut préserver ses propriétés thermiques, tout en exposant son aspect esthétique sur les deux côtés. Dans les essais préliminaires pour la production d'un mur double, une couche d'isolation de terre allégée est insérée entre deux couches de terre battue. Par contre, cette méthode est complexe à réaliser.

Architecture
En principe, les constructions en terre sont caractérisées par des murs épais, massifs et monolithiques, qui offrent beaucoup de souplesse dans leurs modelages. La construction en terre peut être considérée comme une grande sculpture et sa forme garde l'empreinte de la main qui l'a édifiée. Et, même si avec les technique contemporaines,

Fig. 4

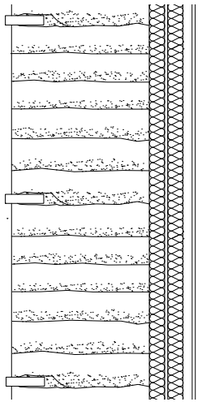


Fig. 5

1 Mur en pisé porteur avec contrôle d'érosion en briques cuites : 45cm

2 Couche isolante en roseaux 2 x 5 cm

3 Sous-couche d'argile : 3 cm

4 Plâtre d'argile : 1 cm

Fig. 6

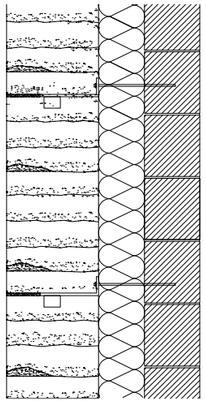


Fig. 7

1 Façade en pisé avec contrôle d'érosion en mortiers de chaux : 30 cm

2 Couche isolante en laine minérale 16 cm

3 Mur de brique porteur : 18 cm

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 1, 2, 3 [48] Ozeanium, Boltshauser Architekten AG, Bâle, Suisse

la plupart des tâches sont automatisées, la terre reste un matériau qui se rappel de sa construction traditionnelle.

Les murs en pisé sont distingués par le type du sol employé dans leur construction. Comme les couleurs et les caractéristiques de la terre changent selon les villages et les régions, les murs en pisé présentent une gamme des couleurs très large.

Les murs massifs et apparents de pisé sont caractérisés par leur surface brute et leur texture tactile. Ils exposent les traces de leurs coffrages, comme le béton brut, et présentent les couches successives de leur fabrication comme une coupe de sol. Etant donné que le mur en pisé est compressé couche par couche, la partie supérieure de chaque couche est plus compacte que sa partie inférieure. Cela signifie que le segment inférieur de chaque parcours présente un aspect plus poreux, tandis que le segment supérieur présente une surface plus homogène et plus solide. C'est la structure, ainsi que l'ornementation, qui émerge du processus de production et donne la caractéristique distinctive d'un mur de terre. C'est la nature du mur en pisé qui fait que l'apparence finale correspond avec la méthode de construction.

La terre est un matériau qui résiste mal aux agents atmosphériques mais, étant donné que les architectes sont de plus en plus fascinés par l'aspect apparent de la terre en façade, le défi est de trouver comment protéger le mur sans cacher son expression brute. Une possibilité est d'assurer cette protection par l'enduit de terre argileuse au lieu de l'utilisation de l'enduit de chaux, revêtements en tôle ou d'autres matériaux imperméables similaires.

Une alternative, pour limiter l'érosion des murs en pisé et en même temps garder la nature de la terre, est d'utiliser des briques cuites ou des mortiers de chaux, disposées en lits horizontaux. Ceci est une technique utilisée par l'artiste Martin Rauch pour ralentir l'érosion de mur en pisé. Par rapport à l'artiste, quand le mur en pisé s'expose en façade, au fil des ans, il s'érode graduellement avec la pluie et la terre retourne d'où elle vient. Par conséquent, le mur en pisé change d'apparence avec le temps : sa texture devient plus rugueuse car les fines particules sont rincées et les pierres commencent à émerger.
L'intégration des contrôles d'érosion avec des briques cuites ou du mortier de chaux tous les 40 à 60 cm aide à contrôler la perte de matière[1]. Car si l'eau coule trop vite sur la façade, elle rince les particules du matériau, par contre, si elle coule plus lentement, alors le grain fin de la terre est mieux préservé.
Une fois que la couche extérieure de la terre est érodée par la pluie,

1. [23] Contrôles d'érosion et d'érosion calculés, p. 72

Fig. 1 [23] Cimetière Batschuns, M. Rauch et Marte.Marte, Batschuns, Autriche

ces bandes commencent à faire des saillies dans le mur. La terre, directement au-dessous d'eux, est préservée, tandis que la terre au-dessus est lavé. Le contrôle de l'érosion a autant d'influence sur l'usage technique que sur l'apparence. Ceci, en particulier, quand ces lignes horizontales deviennent saillantes car l'effet de l'ombre fait accentuer ces lignes et le mur se divise en bandes horizontales séparées.

Néanmoins, il existe des règles fondamentales à suivre pour l'imperméabilisation. Les murs en pisé peuvent rester bruts du moment qu'ils sont protégés à leur sommet et à leur base.
Le toit doit être formé d'une manière à ce qu'il puisse protéger le mur des eaux de ruissellement. Les débords de toit et le détail constructif entre le mur et le toit sont importants. Par exemple, dans le cas de la Chapelle de la Réconciliation de Martin Rauch, le mur en pisé représente la deuxième couche de la façade et il est protégé par une coursive extérieure en bois. Pourtant, l'artiste, avec les techniques de contrôle de l'érosion, essaie dans ses nouveaux ouvrages de conserver des débords de toits très limités.
La construction en terre nécessite également des soubassements étanches en béton ou en pierre, selon les ressources locales. En plus, les parties les plus exposées des murs, comme les angles ou les encadrements, sont souvent renforcées, soit par des mortiers de chaux horizontaux et des briques cuites, soit par du béton et du ciment. Cela offre une caractéristique distinctive à la construction de terre.

En ce qui concerne les ouvertures, un bâtiment en terre battue fonctionne mieux lorsque qu'il possède moins de fenêtres. Les parois en pisé, avec un nombre minimal d'ouvertures aussi petites que possible, sont les mieux adaptées, à la fois, à la nature du matériau et aux forces de compression qui agissent sur elles. Normalement, au lieu d'une seule grande fenêtre, plusieurs fenêtres étroites sont favorables. Cependant, aujourd'hui, avec des nouvelles techniques, les constructions en terre battue ont changé de visage : plutôt que d'avoir des façades fermées, ces bâtiments possèdent des grandes ouvertures.

II. Caractéristique physique

Comportement structurel

Les propriétés mécaniques de la terre varient d'une terre à une autre et d'une mise en œuvre à une autre. Mais en principe, sa résistance à la compression est plus grande que sa résistance à la traction.
Sa résistance à la compression est améliorée après le séchage et avec

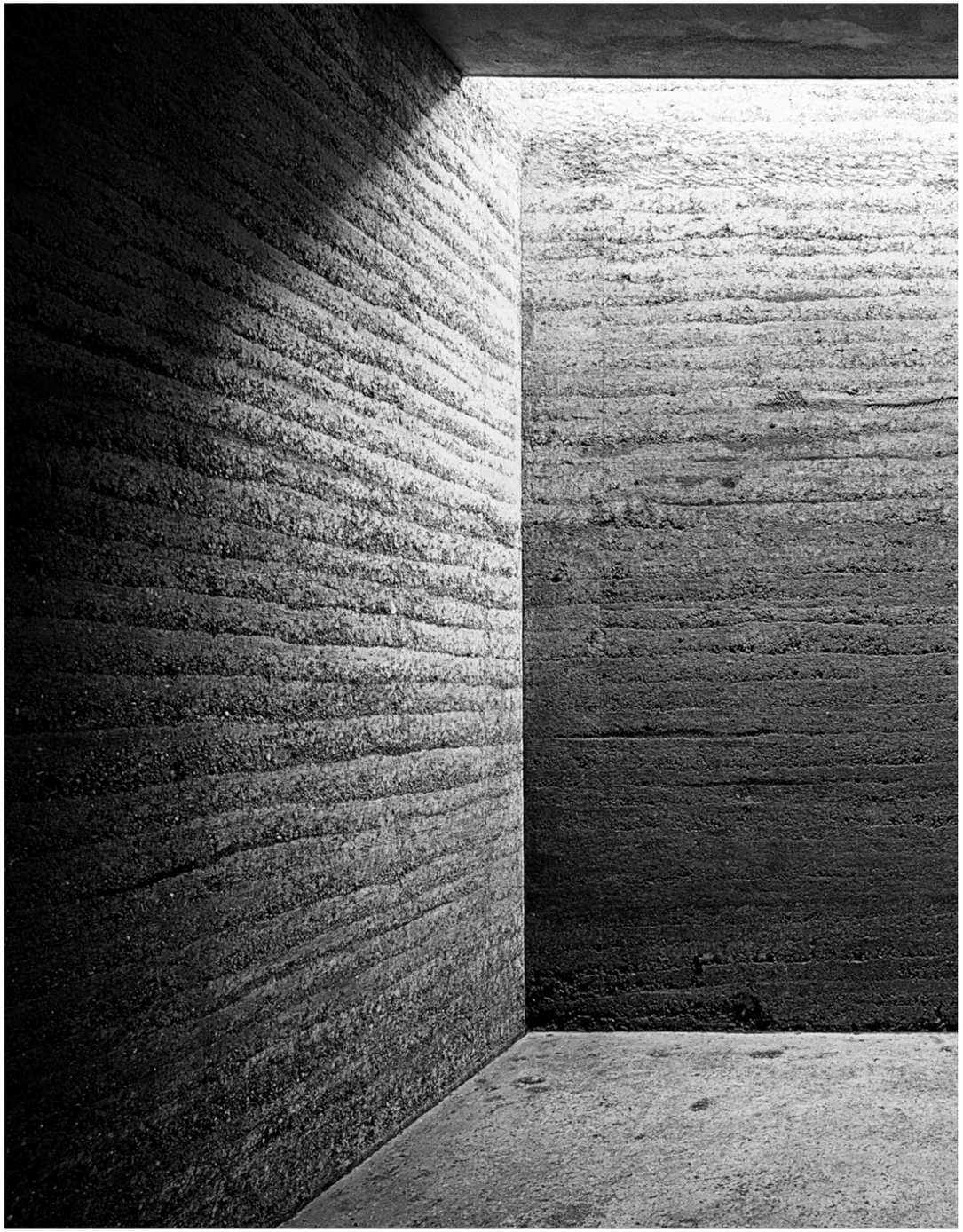


Fig. 1

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

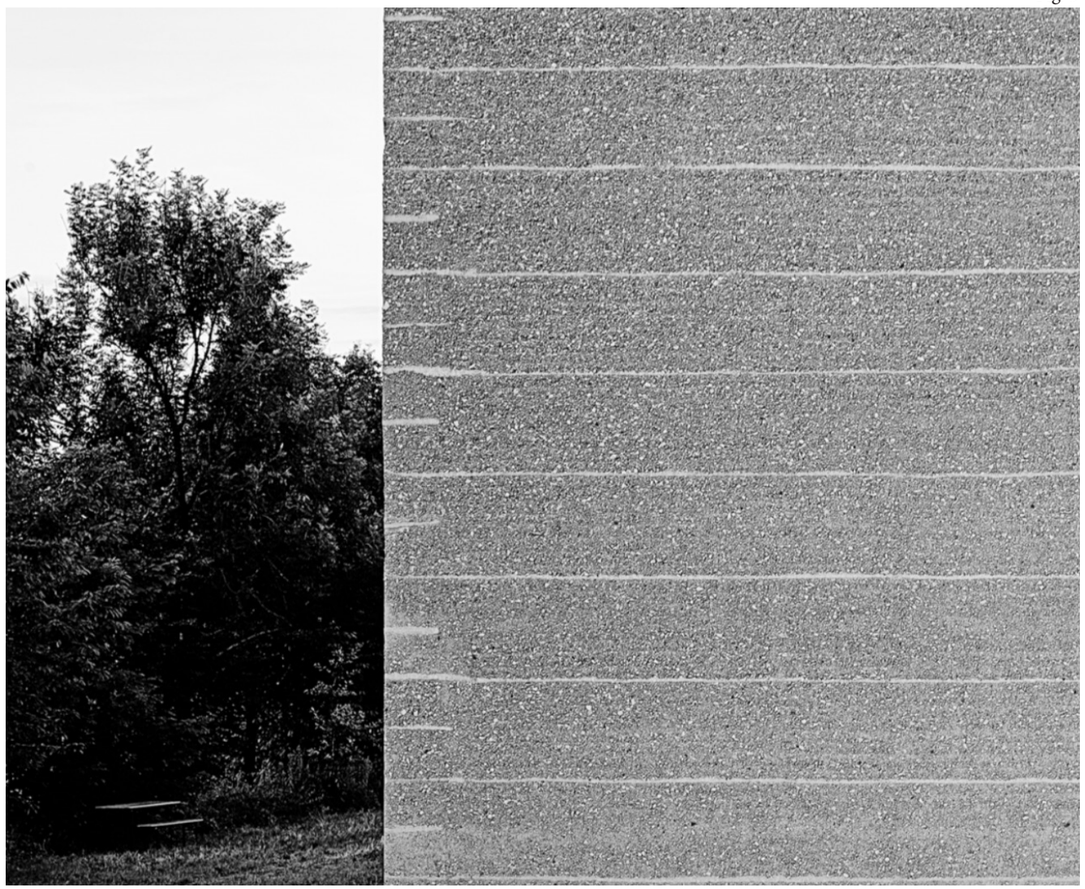


Fig. 4

Fig. 1, 2 [23] Maison de Rauch, M. Rauch et R. Boltshauser, Schlins, Autriche

Fig. 3 [23] Ricola Kräuterzentrum, M. Rauch et Herzog & de Meuron, Laufen, Suisse

Fig. 4 [47] Chapelle de la Réconciliation, M. Rauch, R .Reitermann et P. Sassenroth, Berlin, Allemagne

Fig. 5 [47] Appartement H, M. Rauch, Salzbourg, Autriche

Fig. 6 [47] Fulterer Feldkirch, M. Rauch, Feldkirch, Autriche

1. [1] Caractéristiques et propriétés thermiques des matériaux, p. 276

les processus de stabilisation. En comparaison avec le béton armé, sa résistance à la compression est assez proche de celui-ci. Cependant, la résistance aux efforts de traction est beaucoup plus faible. Il faut noter que les diverses techniques de mise en œuvre de la terre permettent de réaliser la totalité d'une construction. Pourtant, pour faciliter la réalisation, quand il y a des disponibilités, des ouvertures, des planchers et des toitures sont réalisées avec des matériaux fibreux comme le bois.

Comportement thermique

Le coefficient de conductivité thermique de la terre comprimée d'une densité de 2000 kg/m^3 est environ 1.2 W/mK[1]. Pour améliorer l'isolation thermique, la terre est souvent mêlée à des fibres végétales, comme la paille. La caractéristique forte de la terre est son inertie thermique élevée. Par conséquent, il faut savoir où elle est plus avantageuse à être utilisée. L'utilisation de mur en terre battue au sud ou dans les serres, qui est plus ensoleillé, est préférée. Dans ces cas, les murs deviennent des capteurs thermiques : la terre stocke la chaleur de la journée et la restitue durant la nuit, ce qui garantit un confort thermique. En revanche, pour un mur nord, la terre n'est pas conseillée. La terre est également utilisée à l'intérieur d'un bâtiment plutôt comme un mur porteur central en pisé. Ce mur est à la fois expressif et fonctionnel. Il existe encore des autres applications de terre crue à l'intérieur d'un bâtiment : enduit de terre, dalle en terre compactée et remplissage des parois intérieures.

Par exemple, les modules préfabriqués des murs intérieur en pisé de l'immeuble des bureaux de l'Imprimerie Gugler à Pielach, contiennent des conduits de ventilation alimentés par un collecteur de chaleur géothermique. Ces murs garantissent un climat intérieur confortable tout en offrant une qualité architecturale expressive.

Comportement à l'humidité

Le matériau de terre règle le taux d'humidité de l'air intérieur et apporte un confort hygrométrique remarquable. Ainsi, il est intéressant de le placer dans une pièce d'eau. En effet, un mur en terre d'une certaine épaisseur, dans une salle de bains, absorbe l'humidité ambiante et la rejette lorsque l'air devient plus sec. Il n'y a donc pas de buée sur les fenêtres ou glaces de la pièce.

En ce qui concerne la protection contre l'écoulement d'eau, comme cette partie a une grande influence sur les aspects architecturaux d'un bâtiment, elle est expliquée plus en détail dans la phase

Fig. 5

Fig. 6

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 1 [47] Imprimerie Gugler, M. Rauch et H. Ablinger, Pielach, Autriche

Fig. 2 [47] Santé Spa, M. Rauch et HP Fontana & partners, Bad Schinznach, Suisse

Fig. 3 [47] Cinéma Sil Plaz, M. Rauch et Capaul & Blumenthal Architects, Glion, Suisse

"caractéristiques architecturales" aux pages précédentes. Pourtant, en règle générale, la construction en terre, comme toute maçonnerie et construction massive, doit être préservée de l'infiltration de l'eau de pluie et des remontés d'humidité du sol. Une fois que la construction est bien protégée, elle peut se maintenir en bon état.

Résistance au feu et au bruit
En règle générale, les ouvrages en terre ont une bonne résistance au feu. Les enduits de terre sont même utilisés comme protection contre le feu. La terre battue est également un bon isolant phonique car la masse et la grande épaisseur des murs permettent d'accentuer son isolation.

III. Impact environnemental

Production
La terre est un matériau inépuisable, abondant, facilement disponible et nécessitant peu de transformation. Elle est, par nature, un matériau de ressource locale. La terre à pisé, quand elle est prélevée aux alentours du chantier, ne nécessite pratiquement aucune énergie grise pour sa production. Par contre, aujourd'hui, la terre peut être aussi acheminée depuis une carrière où elle a été tamisée. Plusieurs terres peuvent aussi être mélangées afin de recomposer un mélange plus approprié. Par conséquent, ces processus compliquent les tâches de préparation. Cependant, le fonctionnement des engins d'extraction, le transport de la carrière jusqu'à l'usine, le tamisage ou malaxage et un compactage mécanique constituent les seules dépenses énergétiques pour la préparation de ce matériau. Ces procédés de fabrication ont un bilan énergétique beaucoup plus faible par rapport à celui du béton, la terre cuite et les autres matériaux qui demandent des processus de fabrication beaucoup plus complexes. Le matériau de terre ne dégage aucun polluant au cours de sa fabrication et le dégagement de CO_2 est uniquement lié à la consommation énergétique utilisée au cours de sa production.

Transport
Comme mentionné précédemment, soit la terre est excavée sur le terrain de la construction et ses alentours, soit elle est exploitée en carrière pour les productions industrielles. L'impact environnemental qui est engendré par le transport de l'usine jusqu'au chantier n'est présente que pour le deuxième cas. Les questions économiques et environnementales jouent un rôle clé sur le transport. La nature du

matériau et les considérations environnementales favorisent une application régionale. Néanmoins, les contraintes financières peuvent nécessiter des importations d'éléments déjà fabriqués.

Il est tout de même possible, aussi avec les éléments préfabriqués, que la demande de construction avec les matériaux locaux puisse être satisfaite ; au lieu de déplacer les matériaux de construction, les outils de fabrication peuvent être déplacés sur le chantier. Surtout pour les grands projets, afin d'utiliser les matériaux régionaux, il est souvent favorable de mettre en place les installations de production localement. Ce qui est également convenable pour diminuer les distances de transport et de réduire les impacts environnementaux associés. Par exemple, les éléments préfabriqués du projet "Ricola Kräuterzentrum" de Martin Rauch est constitués de la terre des alentours du chantier. La distance entre la salle de production et le chantier est inférieure à 3 km[1].

1. [23] Préfabrication, p. 119

Mise en œuvre et entretien
Le chantier en terre est une construction lourde et massive. La terre ne peut pas être comprimée pendant les périodes où il y a un risque de gel. En plus, les outils de compression de la terre génèrent également du bruit sur le chantier. Pourtant, aux cours de ces dernières années, les éléments déjà préfabriqués changent le processus du chantier de terre. Le matériau de la terre est durable et n'exige pas d'entretien particulier, si les détails constructifs sont attentivement appliqués. Le taux de renouvellement d'une construction en terre bien protégée est identique à celui de la pierre. Aujourd'hui, des constructions en terre de plusieurs siècles sont encore debout.

Fin de vie
Pour les questions environnementales, dans un cas idéal, la terre battue peut avoir un cycle de vie extrêmement localisé : formée de matériaux régionaux, transformée sur place et enfin réutilisée sans perte de qualité ou retournée directement à la terre. Par conséquent, il est important de ne pas ajouter des matériaux artificiels à la terre, pour qu'elle puisse être complètement recyclée.
Un bâtiment de terre ruiné devient soit une nouvelle source de terre pour une construction nouvelle, soit elle retourne dans la couche terrestre. Toutefois la démolition se réalise sans engin destructif particulier. Et en raison de sa solubilité dans l'eau, elle peut également être facilement séparée des autres matériaux de construction.

VI. Conclusion

Avantages
La revalorisation du matériau traditionnel de la terre et sa réintégration dans les projets contemporains sont dues à l'importance des enjeux environnementaux d'aujourd'hui. La terre est un matériau naturel qui subit très peu de transformation, largement accessible et complètement recyclable. Elle contribue ainsi à une démarche de développement durable en offrant une construction écologique qui nécessite une faible énergie grise et qui dégage peu de gaz à effet de serre. La mise en valeur du matériau de la terre ouvre un vaste champ pour de nouvelles expressions architecturales contemporaines. Il est ainsi faux de croire que le bâtiment en pisé se limite aux constructions en territoire rural. Les constructions en terre sont présentes dans les maisons de village et de ville, églises, écoles, etc.

Désavantages
Le désavantage de la construction en pisé est son coût élevé alors que les constructions conventionnelles qui sont gourmandes en énergie comme le béton armé, coûtent nettement moins chères. Cette réalité est principalement due au fait que la construction en terre devient victime de l'industrialisation ; les matériaux de construction et leur transport sur de longues distances, deviennent de plus en plus bon marché et accessibles, alors que les coûts de main d'œuvre augmentent. Evidemment, l'objectif d'utilisation du matériau de la terre est de le rendre accessible au plus large de la population. Dès lors, il existe différents moyens pour rendre son application plus facile :
- Une possibilité est l'auto-construction. Considérant le coût élevé de la construction en pisé, il peut être constaté que si la matière première utilisée est quasiment gratuite, la quantité de main d'œuvre nécessaire le rend un ouvrage onéreux. Des bâtiments en terre qui sont soigneusement exécutés, augmentent le prestige de son matériau. Dès lors, il est pertinent que des habitants participent dans la construction de leur habitat pour rendre cette technique de construction accessible, tout en considérant les aspects sociaux.
- Une autre alternative est de simplifier les processus de sa mise en œuvre à l'aide des nouvelles innovations et de l'approcher à l'industrie, afin qu'elle puisse survivre dans le monde contemporain. De nouvelles techniques ont été mises au point ces dernières années : terre coulée, pisé préfabriqué et terre allégée.
Néanmoins, tout cela n'en est encore qu'au stade de recherches. L'industrialisation de la terre n'est pas un processus immédiat. De plus, il faut faire attention à ce que cela implique aux enjeux environnementaux. Il faut trouver un compromis entre l'industrialisation de la terre et sa mise en œuvre traditionnelle.

4.2.3 Le bois

I. Caractéristique architecturale

Historique
Le bois est un matériau naturel, polyvalent et résistant. Que ce soit en tant que matériau de construction, matière première ou source d'énergie pour la production de chaleur, il accompagne l'homme depuis des milliers d'années. En tant que matériau de construction, il s'adapte facilement dans toutes sortes d'implantations géographiques et sa grande souplesse lui permet la prise en compte de programmes variés : de la modeste à la haute demeure, du mobilier urbain aux ponts audacieux. L'utilisation du bois s'est surtout développée dans les régions où cette matière est abondante. Celui-ci était souvent utilisé en éléments massifs et sous forme de construction cubique simple.

En chemin vers une société du développement durable, le bois et ses dérivés jouent un rôle très important dans l'architecture. C'est un matériau renouvelable et qui n'a besoin que de soleil, d'eau, du carbone prélevé dans l'air et des sels minéraux issus du sol pour sa production en forêt. De plus, pendant tout son cycle de vie, il génère moins d'énergie grise que d'autres matériaux de construction, surtout s'il provient des forêts locales. En effet, l'utilisation de bois indigène ne demande pas beaucoup d'énergie pour le transport, ce qui réduit son taux d'énergie grise. Les constructions en bois indigène contribuent également à ce que les gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone CO_2, restent en quantités stables et ne se répandent pas dans l'atmosphère. En effet, le bois stocke du CO_2 lors de sa croissance ce qui compensent les émissions liées à la fabrication et à l'utilisation de ce matériau.

Utilisation en suisse
La Suisse est très pauvre en matières premières mais le bois est une ressource naturelle qui existe en abondance sur son territoire. L'exploitation et la transformation du bois ne nécessitent que très peu d'énergie. Lors de la construction d'une maison individuelle en bois suisse, environ 40 tonnes de CO_2 sont prélevées dans l'air. Cette valeur est égale à la quantité qu'un habitant émet en cinq ans. Utiliser du bois provenant de la Suisse contribue concrètement à la réduction de la quantité du dioxyde de carbone CO_2 présent dans son environ, lors de sa croissance[1].
En Suisse, environ 10 mio. de m^3 de bois poussent chaque année, dont seuls les deux tiers sont exploités[2]. Il est nécessaire d'exploiter de

1. [32] Pourquoi le bois Suisse, p. 2
2. [29] Exploitation de la forêt, p. 6

manière continue les forêts Suisse pour garder un taux d'émissions de CO_2 stable sur le territoire. Depuis quelques années, la surface forestière du pays croît, notamment dans le Jura et au sud des Alpes. Elle couvre aujourd'hui une surface totale d'environ 12'800 km², ce qui représente à peu près le tiers de la superficie du pays. Il existe toutefois d'importantes différences entre les régions : selon la statistique forestière, le taux de boisement en 2011 était de 49 % dans le Jura et dans le sud des Alpes, de 36 % dans les Préalpes et de 23 % sur le Plateau et dans les Alpes[1].

1. [29] La forêt suisse , une ressource renouvelable trop peu exploitée, p. 4

Ces forêts sont riches par leur diversité en essence. Lors de la récolte de bois, l'épicéa reste l'essence la plus fréquente des forêts suisses (43.6%), mais tend à se raréfier à cause du changement climatique modifiant la forêt à long terme. Ensuite viennent le hêtre (18.8%) et le sapin (14.1 %). Chacun de ses assortiments de bois est convenu pour les domaines d'utilisation différents[2]
Grossièrement, l'utilisation du bois est répartie en trois domaines différents : les grumes, pour la construction et la fabrication des meubles, le bois d'industrie, pour des panneaux, du papier et de l'isolation et le bois d'énergie.

2. [29] Tiré du tableau Les essences les plus répandues, source : OFEV

3. [51] Essence de bois Lignum

Les essences indigènes les plus utilisés en Suisse[3]

Essence	Propriétés techniques	Durabilité	Utilisation
Epicéa 43.6 %	Léger Tendre Résistant Facile à travailler Imprégnation difficile	Peu durable en plein air sans protection constructive ou traitement préventif Non-traité ☹ Traité ☺ Champignons 😐 Insectes 😐	Revêtement intérieur, Extérieur (à protéger) Bois structurel
Hêtre 18.8 %	Dur Bonne résistance à la compression perpendiculaire Imprégnation facile.	Peu durable en plein air Non-traité ☹ Traité ☺ Champignons ☹ Insectes ☹	Revêtement intérieur Bois énergie

Essence	Propriétés techniques	Durabilité	Utilisation
Sapin blanc 14.1 %	Tendre Facile à travailler Imprégnation moyenne à bonne	Peu durable en plein air sans protection constructive ou traitement préventif Non-traité ☹ Traité ☺ Champignons 😐 Insectes 😐	Revêtement intérieur, Extérieur (à protéger) Bois structurel
Mélèze 5.4 %	Mi-dur Facile à travailler Imprégnation moyenne à difficile	Moyennement durable Non-traité ☺ Traité ☺ Champignons ☺ Insectes ☺	Revêtement intérieur et extérieur Bois structurel
Pin sylvestre 2.8 %	Tendre Facile à travailler Sècheage rapide Imprégnation facile à moyenne	Peu durable en plein air sans protection constructive ou traitement de surface Non-traité ☹ Traité ☺ Champignons ☺ Insectes 😐	Revêtement intérieur, Extérieur (à protéger) Bois structurel Bois isolation
Douglas 0.8 %	Mi-dur Facile à travailler Imprégnation difficile	Moyennement durable Non-traité ☺ Traité ☺ Champignons ☺ Insectes ☺	Revêtement Intérieur et Extérieur Bois structurel
Chêne 0.7 %	Dur Bonne résistance à la compression perpendiculaire Facile à travailler Imprégnation très difficile	Durable Non-traité ☺☺ Traité ☺☺ Champignons ☺☺ Insectes ☺☺	Revêtement Intérieur et extérieur Bois structurel

Bois de construction
Historiquement, selon les époques et les cultures, l'utilisation du bois de construction peut être catégorisée en deux familles[1] :

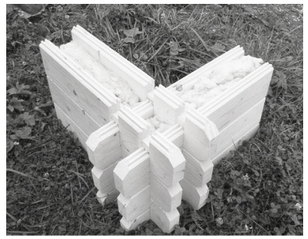
1. [29] Construction avec du bois, gain de temps avec la construction système, p. 20

- En masse, sous forme de murs en rondins massifs
- En structure, dans laquelle des pièces de bois sont utilisées pour leurs qualités mécaniques et un remplissage de divers matériaux comme la terre, la paille, les briques y est ajouté.

Ces deux grandes familles ont évolué au cours des années et ont aujourd'hui chacune de nombreux descendants qui se résume comme suivant :

a. La famille "bois massif"

1. Construction en bois massif empilé
La construction de maisons en bois massif est l'un des modes de construction les plus anciens. Elle consiste à avoir des murs en bois massif montés par empilement de madriers (finition rectangulaire), de rondins (finition lisse) ou de fustes (finition rustique). Avant de construire de véritables maisons en bois, cette technique était essentiellement employée pour lutter contre le froid et les vents violents. Cette famille, forte consommatrice de bois, s'est longtemps basée sur l'épaisseur des parois pour atteindre, avec ce seul matériau, une autosuffisance thermique. Grâce à son épaisseur, le bois massif possède une bonne inertie thermique face aux autres modes de constructions. Désormais, avec les exigences de performance de la basse consommation, les tendances s'orientent vers des parois plus minces, mais doublées d'une isolation, généralement par l'extérieur pour éviter les ponts thermiques et bénéficier de son inertie thermique. L'isolant extérieur peut ensuite être doublé de planches de forte épaisseur permettant de retrouver l'expression voulue sur la façade.



Par exemple un double madrier permet d'atteindre les performances de la basse consommation grâce à une couche d'isolation centrale. La pose est adaptée à l'auto-construction et permet la mise en œuvre d'isolations en vrac et peu transformées. De ce fait, un bilan environnemental amélioré avec une performance thermique optimale[2].

2. [2] Murs en bois massif p. 168

2. Construction en bois massif en panneaux contrecollés
Aujourd'hui, le système en bois massif a évolué jusqu'au développement de panneaux de grande surface. Celui-ci est appelé

à se développer avec l'exigence de la performance énergétique et thermique des bâtiments. Les techniques actuelles permettent la réalisation de pans de murs de grande longueur allant jusqu'à 24 m avec des épaisseurs variables, obtenus par l'assemblage de planches de bois collées ou clouées les unes aux autres en multiples plis croisés. Ce type de construction de bois assure une remarquable stabilité de l'ouvrage dans le temps et résistent mieux aux séismes que les bois massifs empilés. En effet, les planches collées à plis croisés permettent une reprise de charges verticales et horizontales importantes. Il existe actuellement des bâtiments de plus de six étages composés de panneaux, certains atteignant même dix étages.

Les panneaux contrecollés peuvent permettre de réaliser entièrement une maison. Les murs, sols et plafonds du bâtiment, sous forme de panneaux, jouent tous un rôle structurel et aident au cloisonnement spatial. Elle peut être construite sur une dalle de béton classique ou sur des pilotis.

Pour la construction, des éléments entiers peuvent être préfabriqués avant d'être collés, chevillés ou rivetés. Les panneaux massifs peuvent jouer plusieurs fonctions, donc nous avons besoin de moins de couches constructives que pour d'autres systèmes de construction. Cette technique de construction permet de garder les mêmes expressions architecturales qu'une maison avec une ossature en bois (peint ou brut à l'extérieur sur une isolation rapportée et avec de multiples finitions possibles pour l'intérieur, y compris l'aspect bois naturel des panneaux).

Exemple

Maison Kropf à Schwarzsee[3]
L'exemple ci-dessous est construit avec un système de construction dit "Steko", qui est modulaire et préfabriqué en bois massif. Les modules peuvent être assemblés rapidement et facilement pièce par pièce, sans l'intervention de machines de levage onéreuses. Ainsi, dans l'espace de quelques jours, la maison s'est construite sans mortier, ciment ou colle.

3. [26] Description du système Steko

De plus, grâce à la forte proportion de bois massif dans l'enveloppe, celle-ci ne nécessite ni de barrière vapeur ni d'étanchéité. Le réglage de la température et du taux d'humidité se produit par les cellules et les pores du bois massif. En hiver, il fonctionne en tant que tampon pour la chaleur et en été, il garde une fraîcheur agréable à l'intérieur. Les parois à l'intérieure, sont au choix revêtues de panneaux de plâtre

Fig. 1, 2, 5 [26] Le module de base Steko et le montage de mur Steko

Fig. 3 [26] Coupe verticale, mur extérieur

Fig. 4, 6 [26] Maison Kropf à Schwarzsee

ou de bois ou laissées dans leur état brut. L'enveloppe extérieure est une façade ventilée.
Nous constatons que grâce à tous les facteurs mentionnés, l'énergie grise et les émissions du CO_2 du bâtiment, liés à la mise en œuvre et aux matériaux de constructions, sont très faibles par rapport à d'autres constructions. En outre, de part de sa modularité, ce bâtiment reste flexible et à la fin de sa vie, les éléments peuvent facilement être récupérés et réutilisés.

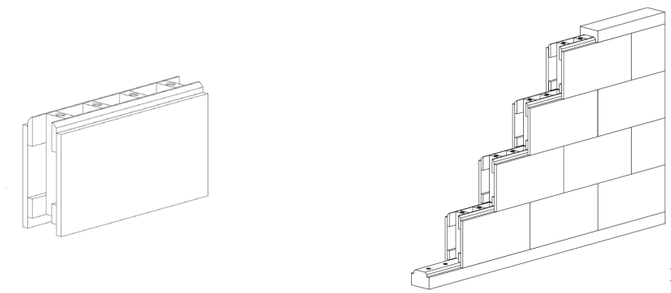
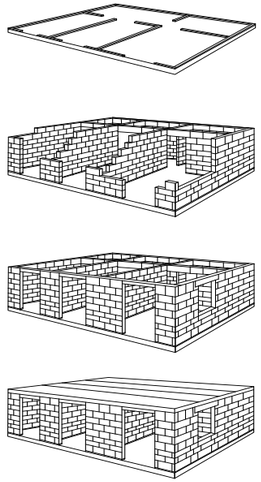


Fig. 1

Fig. 2



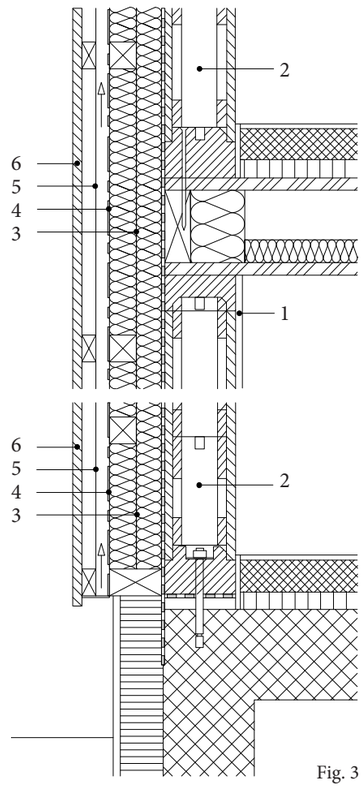


Fig. 3

Composition du mur

1 Habillage intérieur (ou bois brut)

2 Construction porteuse, modules, espace pour l'isolation : 16 cm

3 Isolation : 20 cm

4 Couche de protection de l'isolation

5 Aération

6 Revêtement extérieur

Fig. 4

Fig. 5

Fig. 6

1. [12], [54] Résidence Sihlbogen, Dachtler Partner Architekten, Zürich

Ensemble résidentiel et commercial Sihlbogen à Zürich[1]

Un deuxième exemple décrit la construction des lotissements Sihlbogen en bois massif ; l'ensemble regroupe deux bâtiments d'habitation de sept étages, mesurant chacun 100 mètres de long et 22 mètres de haut. Ces deux immeubles abritent au total 140 appartements et au rez-de-chaussée se trouve des surfaces commerciales.

L'objectif de cette construction est d'atteindre la société à 2000 watts. Pour y parvenir, les architectes doivent prendre aussi en considération l'énergie grise du bâtiment.

L'efficience énergétique est assurée en ce qui concerne la consommation pour le chauffage et l'éclairage. Mais dès le début, la conception a ciblé l'énergie grise qui se cache principalement dans la fabrication et le transport des matériaux de construction employés. Les deux corps du bâtiment sont des volumes gros et compacts, réduisant considérablement les besoins en matériaux de construction, tout en créant un maximum de surfaces d'habitation. De plus, grâce à l'emploi des matériaux de construction écologiques et durables qui sont le bois et le plâtre, l'ensemble atteint l'objectif d'une utilisation réduite de l'énergie grise[2].

2. [31] Concevoir et réaliser, p.42-43

En ce qui concerne le système de construction, les deux immeubles sont conçus avec des palplanches en bois massif placées côte à côte, verticalement. Le système garantit une solidité à la pression très élevée, qui est quatre fois supérieure à celle de la brique. Cela permet de construire théoriquement des bâtiments jusqu'à dix étages. En outre, la construction avec des éléments préfabriqués assure un montage rapide et simple. La façade est ventilée et est recouverte vers l'extérieur avec des éléments d'argile préfabriqués, faible en énergie grise.

Un autre point qui rend le lotissement Sihlbogen absolument unique, c'est le choix de leur site à proximité immédiate d'une gare, les places de stationnement sont réduites à un petit nombre, réservées principalement aux activités commerciales. En effet, le quartier Sihlbogen est conçu pour les habitants qui renoncent à leur voiture et qui utilisent les transports publics pour leurs déplacements quotidiens.

Fig. 1 [54] Situation

Fig. 2 [54] Plans étages type, 2.5 pièces à 4.5 pièces

Fig. 4 [54] Détail de la façade en madriers

Fig. 3, 5, 6, [54] Sihlbogen, Dachtler Partner Architekten, Zürich

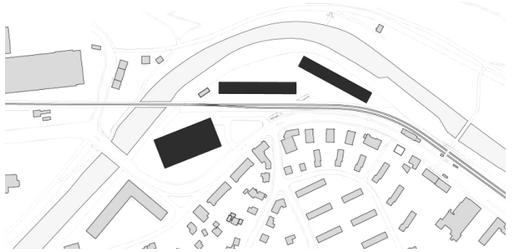


Fig. 1

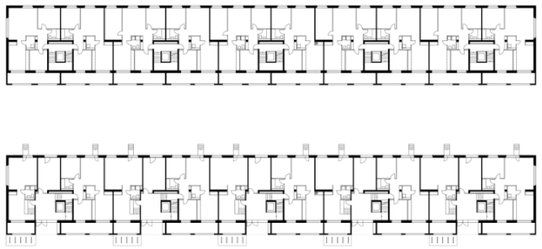


Fig. 2

Fig. 3

Fig. 5

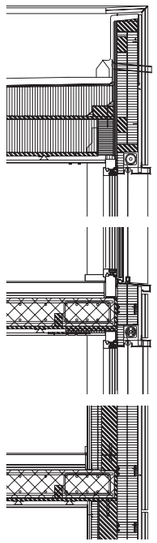


Fig. 4

Composition du mur

1 revêtement intérieur plâtre : 2 mm

2 isolation laine minérale : 50 + 30 mm

3 structure porteuse en madriers : 120 mm

4 isolation laine minérale : 80 + 80 mm

5 espace ventilé : 35 mm

6 plaque préfabriqué en argile : 45 mm

Fig. 6

b. La famille "structure bois"

1. Construction à poteaux-poutres

Les systèmes poteaux-poutres, réalisés avec des bois de forte section, très utilisés dans la seconde moitié du XX° siècle, sont aujourd'hui le plus souvent réservés aux ouvrages de grande taille ou aux budgets importants. Les bâtiments en systèmes poteaux-poutres en bois sont de véritables squelettes. Des poteaux de grande section viennent soutenir les poutres. La portée entre les poteaux peut être importante, en général au-delà de 4 m. L'ensemble forme un squelette qui porte le plancher et la charpente. Il permet aujourd'hui encore, de par sa souplesse de conception, de proposer des espaces ouverts. L'aménagement intérieur passe en général par des murs non porteurs, ce qui garantit une flexibilité maximale pour la disposition des pièces. Avec cette méthode, il est aussi possible de réaliser sans problème de grandes constructions comme des bâtiments scolaires ou des halles industrielles et commerciales ou encore des façades entièrement vitrées.

Le remplissage des parois murales est généralement prévu à l'extérieur du squelette ou entre les structures. Il peut être effectué en ossature bois rempli d'isolant, comme la paille, la terre, la brique isolante ou au moyen d'un agencement de plusieurs matériaux.

Les constructions contemporaines avec le système poteaux-poutres, produisent des édifices de grande envergure, aux performances structurelles ressemblantes aux qualités des autres matériaux comme l'acier, grâce à une transformation industrielle du bois aux qualités.

Exemple

Green offices à Fribourg

Le bureau d'architecture Lutz Sàrl a construit en 2007 le premier bâtiment administratif labellisé Minergie-P-ECO en Suisse, à Fribourg[1].

1. [50] Green offices, C. Lutz, Fribourg

Le Green Offices, abritent des bureaux et est entièrement conçu avec les critères de développement durable. L'architecte aborde la question de la consommation énergétique d'un bâtiment de façon globale. Le bâtiment vise non seulement à consommer un minimum d'énergie durant son exploitation, mais également lors de la construction en choisissant des matériaux peu gourmands en énergie grise. La construction a été optimisée pour consommer 90 % de moins d'énergie qu'un immeuble de bureaux standard pour son éclairage, son chauffage et sa construction.

Le choix de matériaux faibles en énergie grise, aussi naturels que possible et l'utilisation maximale de l'énergie solaire sont les principes utilisés pour l'édification de ce bâtiment. De plus, l'utilisation des matériaux naturels influencent la qualité de l'air ambiant et ont un impact important sur la santé des habitants. Dans la conception de ce bâtiment, l'architecte fait part aux bois pour la structure et à l'argile pour le revêtement.

"Pour être cohérent dans une démarche environnementale, il est capital de choisir des matériaux écologiques peu transformés. Ils consomment une quantité moindre d'énergie grise. On entend par là les dépenses énergétiques liées à la production des matériaux, à leur transformation et à leur élimination", explique Conrad Lutz, l'architecte du bureau d'architecture Lutz Sàrl.

A l'exception du radier et des murs du sous-sol, qui sont en béton, les piliers, la toiture et les dalles, y compris celles situées au-dessus du parking, les portes et les fenêtres sont 100% en bois, y compris la cage d'ascenseur. L'épicéa utilisé pour la structure a même été coupé dans les forêts fribourgeoises, diminuant d'autant l'impact environnemental dû au transport[2]. Les planchers et la toiture sont isolés avec de la cellulose alors que les façades contiennent des fibres de bois. Les crépis sont fabriqués à base d'argile et les peintures sont naturelles. Les parois intérieures sont revêtues d'argile, les chapes sont huilées et les poutres en bois ont reçu une lasure à base de caséine.

2. [35] Bois prépatiné sur la façade, p. 11 à 12

Pour le revêtement de la façade, un lambris vertical de sapin pré-patiné a été choisi. Ce procédé donne aux éléments un aspect qui ressemble à un bois exposé plusieurs années en façade ouest. Le grisaillement est accéléré volontairement au moyen du rayonnement solaire, d'eau de pluie et de champignons, à l'exclusion de tout produit chimique. De ce fait, la durabilité des lambris augmente. Par conséquent, un entretien périodique n'est pas nécessaire.

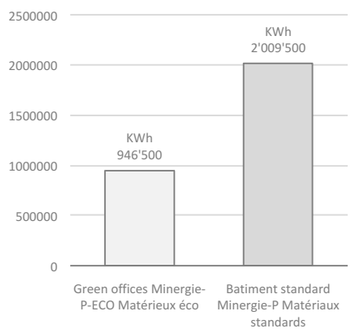
Cette construction à ossature bois pour l'enveloppe et un système de poteau poutre à l'intérieur, laisse aux future utilisateurs un degré de flexibilité pour un aménagement selon leur goût.

En résultat, le calcul de l'énergie grise consommée pour construire ce bâtiment écologique en comparaison avec un bâtiment identique, également Minergie-P, exécuté avec des matériaux dits standards, montre que l'énergie grise économisée entre ces deux variantes correspond à l'énergie nécessaire pour chauffer le bâtiment pendant plus de 100 ans[3].

3. [27] Impact sur l'environnement lors de la construction, p. 10 à 11

1. [27] Tableau tiré de l'étude faite sur le Green offices p. 10 à 11

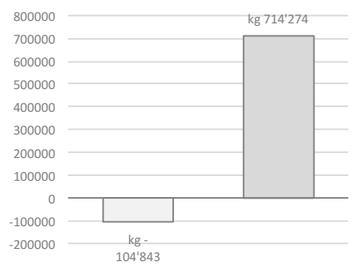
Comparaison de consommation de l'énergie grise et des rejets de CO_2 du Green offices avec un bâtiment Minergie-P, construit avec des matériaux standards selon les normes SIA[1]



Consommation de l'énergie grise

Grâce à l'utilisation de matériaux écologiques peu transformés, l'énergie économisée lors de la construction se monte à 1'063'000 kWh.

Ceci correspond à la consommation d'énergie moyenne annuelle d'une famille de quatre personnes vivant dans une maison individuelle pendant plus de 152 ans !



Le rejet de CO_2 contribuant à l'effet de serre

La différence de rejet de CO_2 entre le bâtiment standard Minergie-P et le Green offices est de 819'117 kg.

Ceci correspond au rejet de CO_2 d'une voiture pour une distance parcourue de plus de 3'922'914 km.

Fig. 1 [35] Coupe verticale, mur extérieur en ossature bois

Fig. 2 [27] Élévation sud, Lambris vertical pré-patiné en sapin

Fig. 3 [27] Plans, système poteaux-poutres à l'intérieur et ossature pour l'enveloppe

Fig. 4 [27] La façade sans éléments en reliefs et avec un grisaillement accéléré naturellement

Fig. 5 [27] Mur intérieur en crépis à la chaux

Fig. 6, 8 [27] Favoriser la lumière naturelle pour l'intérieur

Fig. 7, 9 [27] l'escalier préfabriqué en bois, habillage avec peintures à pigments naturelle

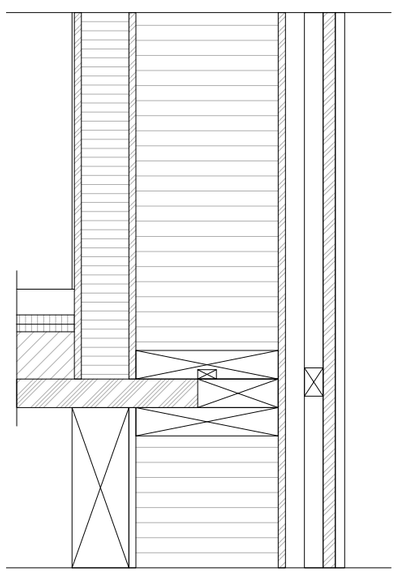


Fig. 1

Composition du mur

1 Crépi argile intérieur

2 Plâtre armé de fibres 15 mm

3 Isolation fibres de bois 100 mm

4 OSB 15 mm

5 Montants BLC 80 x 300 mm

6 Isolation cellulose 300 mm

7 Panneau de fibres de bois mi-dur

8 Lattage 40 mm

9 Contre-lattage 40 mm

10 Lambris vertical pré-patiné en sapin

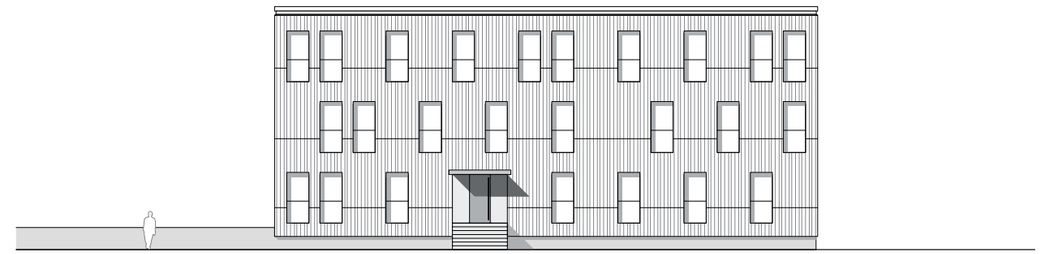


Fig. 2

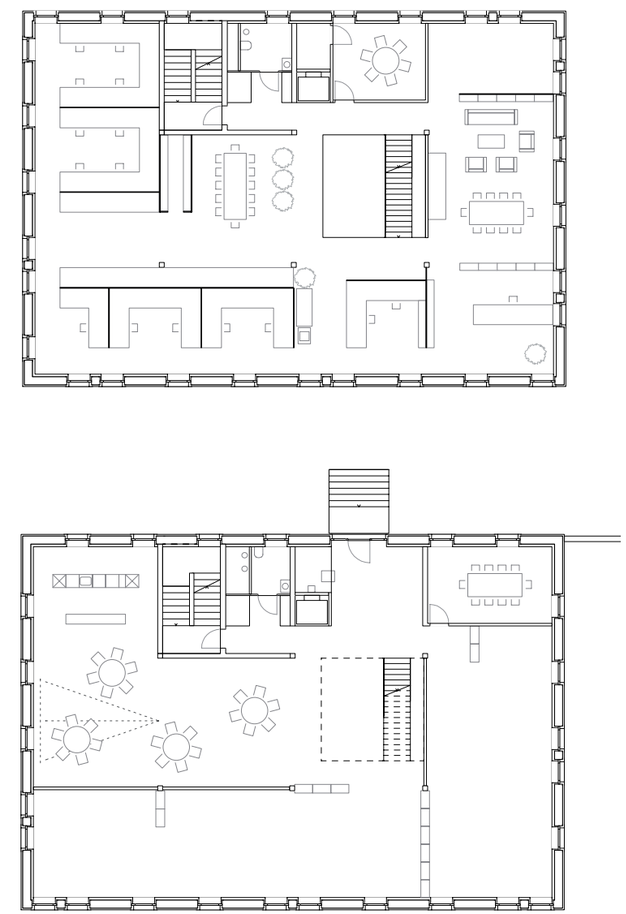


Fig. 3

Fig. 4

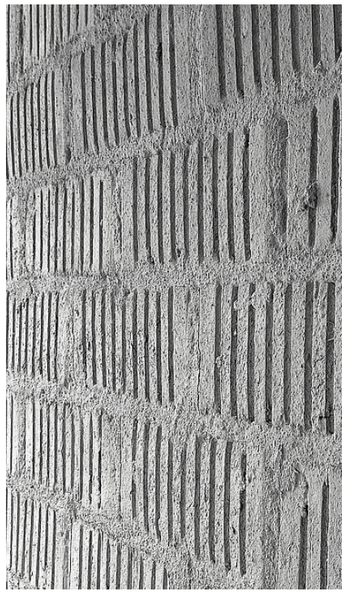


Fig. 5

Fig. 6

Fig. 7

Fig. 8

Fig. 9

2. Construction à ossature

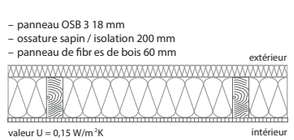
Elle représente aujourd'hui le mode de construction prédominant dans la construction bois en Suisse et en Europe. L'enveloppe est généralement composée d'une ossature, contenant des éléments de petites sections assemblés par clouage ou vissage, et stabilisées par des deux côtés avec des plaques de dérivés du bois. L'isolant est le plus souvent placé entre ces ossatures, ce qui permet un gain de place non négligeable par rapport à des solutions massives et une grande flexibilité quant au choix de l'isolant (ouate de cellulose insufflée, bottes de paille, laine minérale,…). Ensuite l'ossature reçoit un parement extérieur (enduit ou bardage bois ou autres).
Il existe deux approches différentes dans la phase chantier :
- Une approche traditionnelle consistant à façonner puis à monter pièce à pièce les murs sur le chantier
- Une approche misant sur la préfabrication en atelier d'éléments de construction entières ; de cette manière, des éléments entiers de parois ou de toiture sont préfabriqués avec des pièces de petites sections en atelier avant d'arriver sur le chantier ; les canalisations, les aménagements intérieurs et extérieurs, les fenêtres et portes sont même souvent déjà intégrés. Les différents éléments sont livrés complets et assemblés sur place par relativement peu de monteurs.

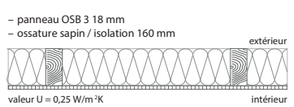
La préfabrication offre de nombreux avantages : un poids et un encombrement réduits pour le transport et sur le chantier, une grande rapidité de montage et la possibilité d'intégrer en atelier, l'isolation, les menuiseries, ou même le bardage de la façade. De ce fait, la construction à ossature bois est appréciée dans les programmes de haute qualité environnementale. De plus, en combinant les fonctions statiques et isolantes dans une même épaisseur, les constructions en ossature en bois se distinguent par une efficacité thermique incomparable pour une épaisseur donnée de l'enveloppe.

1. [33] p.11

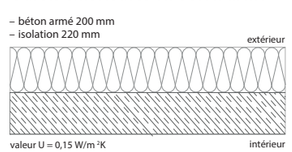
Comparaison des deux systèmes constructifs[1]

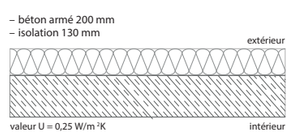
Parois extérieures à ossature bois





Parois extérieures en béton armé





Pour résumer, un avantage important de construction en bois est qu'il est bien moins lourd que la plupart des autres matériaux comme le béton. Ce type de construction ne nécessite pas de grande fondation ni d'excavation de la terre (facteur réduisant l'énergie grise). Une structure en bois s'accorde sans problème à des terrains instables et, par là même, les travaux de fondations sont, pour ce type de structure, plus simples que pour tout autre type de construction. Alors qu'une maison en pierre nécessite des fondations fortes dans la mesure où la maçonnerie qu'on empile dessus est toujours susceptible de se fissurer, dans une maison en bois, les pans de mur sont supposés auto-stables. Une telle construction ne se casse pas, elle s'adapte aux déformations éventuelles que pourrait subir le terrain sur lequel elle est édifiée. De plus, le degré de préfabrication des éléments en bois peut être très élevé jusqu'aux maisons totalement préfabriquées en kit dans des ateliers au sec, puis montées directement sur site. On gagne alors un temps et une énergie précieux.

Exemple

2. [59] Résidence Swisswoodhouse, Baurat Architekten, Nebikon

Ensemble résidentiel Swisswoodhouse à Nebikon[2]

Le "Swisswoodhouse" est un système modulaire en ossature bois. Le concept "Swisswoodhouse" peut être adapté aux besoins les plus divers des habitants et présente une attrayante flexibilité lors de la conception, de l'utilisation et de transformations de bâtiments de plusieurs étages. Le module de départ est une pièce de 18 mètres carrés très fonctionnelle, qui peut être prise en considération seule ou associée avec d'autres. Des diverses combinaisons de pièces permettent des appartements pour des personnes vivant seules ou des familles, ainsi que des appartements pour personnes âgées. On peut également réaliser des locaux commerciaux. Le concept offre aux architectes la possibilité de construire des ensembles d'appartements d'une manière simple et optimale[3].

3. [58] L'efficacité énergétique en système modulaire

Le premier "Swisswoodhouse", constitué de 18 appartements, composé au total de 518 modules, est réalisé à Nebikon, dans le canton de Lucerne[4]. Le projet vise en premier lieu l'objectif de la société à 2000 watts et à ce que les bâtiments répondent au moins aux critères de la norme Minergie-P-ECO.

4. [31] p. 30 à 31

Pour arriver à ces objectifs, le choix de l'emplacement de l'immeuble de Nebikon permet de vivre sans voiture grâce à la proximité des transports publics. De plus, l'architecture de cet immeuble en bois de plusieurs étages est compacte ; la construction est économe en espace et permet d'utiliser moins de terrain constructible. La flexibilité du

projet, qui se base sur une structure modulaire en ossature de bois, de 18 m², donne la possibilité de prévoir des typologies variées allant de 2.5 à 5.5 pièces. Grâce aux espaces bien proportionnés, les locataires sont libres d'aménager les pièces à leur goût.

Les façades sont en bois d'épicéa et de sapin suisse. En revanche, le seul point faible est l'utilisation du bois provenant d'Autriche pour la construction elle-même des modules, car il n'était pas disponible en quantité et en qualité suffisantes en Suisse. L'ensemble de la construction en bois, y compris la façade, est préfabriqué en atelier et monté en seulement 3 semaines. L'isolation et les fenêtres en bois et métal à triple vitrage étaient déjà montées dans les éléments de la façade lors de la livraison. L'entreprise a même installé les chemins de câbles et les tuyaux de ventilation dans les parois intérieures. Seule la pose du parquet, les raccordements électriques et les travaux de peinture ont dû être effectués sur place.

La façade grise de l'immeuble est composée des lattes verticales, chacune dans une nuance de gris légèrement différente qui tire parfois sur le bleu, parfois sur le vert. Cette différence est voulue, car la façade indique que le bois joue un rôle de premier plan dans cette maison.

Fig. 1

Fig. 2

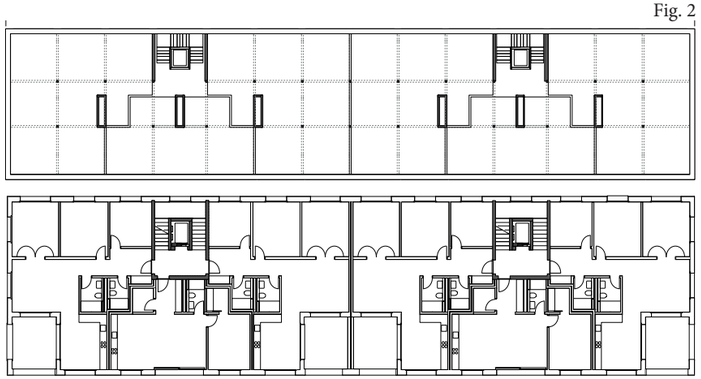


Fig. 1 [31] Modules de base

Fig. 2 [58] Étage type et les trames des modules

Fig. 3 [58] Deux exemples d'aménagement d'un apparentement de 140 m2

Fig. 4 [58] Potentiel de différents types et tailles d'appartement , allant de 2.5 jusqu'à 5.5 pièces

Fig. 5 [31] Coupe verticale, mur extérieur en ossature bois

Fig. 6, 7, 8, 9, 10 [31] Photos

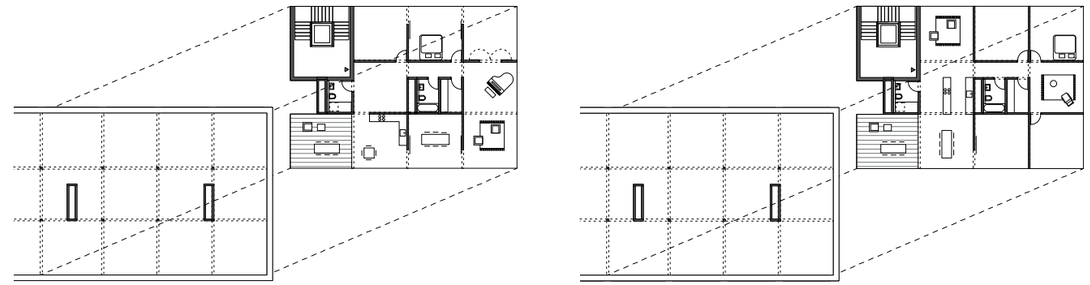


Fig. 3

Fig. 4

Fig. 5

Composition du mur
1 plaque de plâtre fibrée : 15 mm
2 pare-vapeur
3 plaque de plâtre fibrée : 15 mm
4 ossature / isolation : 280 mm
5 plaque de plâtre fibrée : 15 mm
6 lattage vertical : 30 mm
7 lattage horizontal : 30 mm
8 lambris vertical épicéa / sapin, peinture 4 tonalités : 21 mm

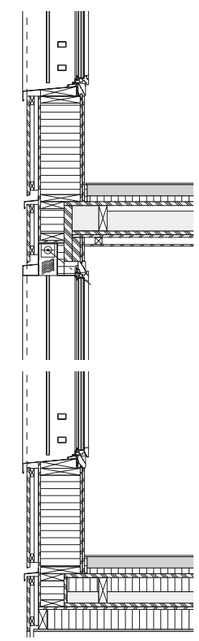


Fig. 6

Fig. 7

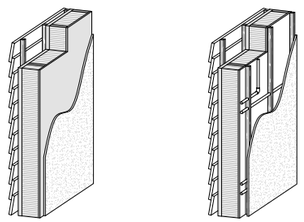
Fig. 8

Fig. 9

Fig. 10

Bois de revêtement
Le bois peut être aussi utilisé en tant que revêtement pour l'intérieur ou l'extérieur d'une construction.

En ce qui concerne les finitions intérieures en bois, nous pouvons nous limiter à le laisser brut ou, par exemple, d'y appliquer une couche de peinture naturelle. Parfois, il est prévu un vide d'installations, formé d'un lattage et d'un panneau supplémentaire, permettant la mise en place d'installations techniques (conduites, prises, interrupteurs, etc.) qui n'interfèrent pas avec l'isolation ou le pare-vapeur. Cela évite de devoir changer tout l'élément de façade lors de leur remplacement dans le futur. Pour cette raison et dans la mesure du possible, une conception où les installations techniques sont intégrées dans une couche séparée, est préférable.



Détail d'un mur avec et sans la couche supplémentaire pour les installations techniques [1]

1. [35] Finitions intérieures, vide d'installations

Pour le revêtement extérieur, il existe deux types de façades : ventilée et non-ventilée. Pour la première, il est possible de poser le revêtement sur un lattage assurant un espace de ventilation et pour la deuxième, elle est fixée sans espace interstitiel. Aujourd'hui, il n'y a guère que les façades crépies où l'on recoure à des systèmes non-ventilés. Pour cela, un panneau isolant est posé sur l'ossature avant d'être enduit de crépi. Avec les autres revêtements utilisés pour des constructions en bois, un espace ventilé est généralement indispensable.

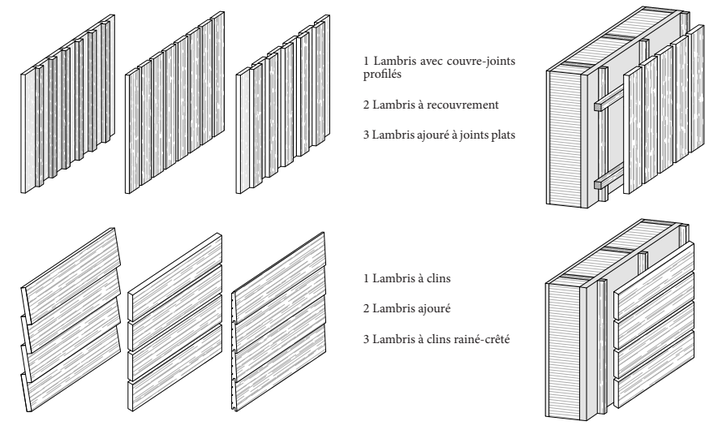
Pour sa durabilité dans le temps, les façades en bois nécessitent une protection contre l'humidité, les intempéries et les insectes. Il existe plusieurs traitements, chimiques ou naturels, pour limiter sa dégradation. Les techniques chimiques, comme peindre le bois avec les vernis, donne une longue durée de vie à la façade mais ne sont pas écologiques et ont des conséquences importantes sur l'environnement et la santé de l'homme. Elles doivent être utilisées avec un maximum de précautions. Des mesures architecturales simples, lors de la planification et de la construction d'une maison, sont la meilleure manière de prolonger la durée de vie du bois. Par exemple, une bonne ventilation dans toute la construction supprime tout risque de condensation. Avec le choix d'une façade ventilée, on favorise un séchage plus rapide d'éventuelles infiltrations par une

circulation naturelle de l'air. Elle permet également de limiter sa surchauffe estivale due au soleil.

Une bonne exécution des détails et le choix d'une essence ou d'un bardage approprié garantissent la pérennité du bois. Un bardage ajouré ou une entrée d'air en pied de paroi favorise la circulation d'air. Les lames posées verticalement permettent un écoulement plus rapide de l'eau et présentent une meilleure durabilité et un changement d'aspect plus uniforme de la couleur en l'absence de traitement du bois.

2. [35] Conception et détails des revêtements bois, p. 8

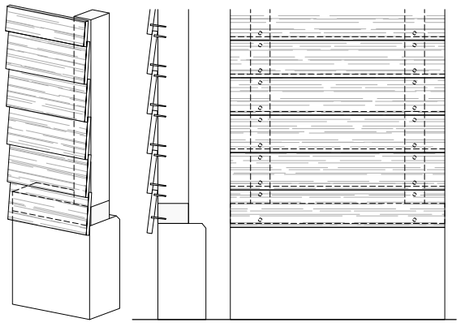
Pose de lambris verticale et horizontale[2]



3. [35]

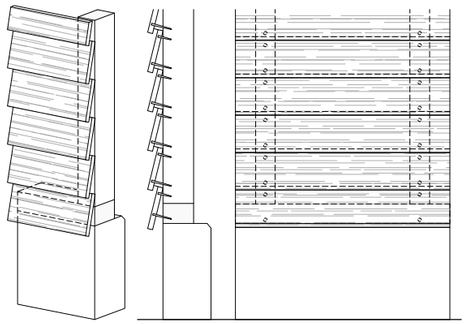
L'absence de relief diminue également le temps de grisaillement, vu que des couleurs apparaissent souvent sous les éléments saillants. Des essences telles que le mélèze, le châtaignier ou le douglas offrent une résistance naturelle remarquable aux attaques biologiques, elles ne nécessitent donc pas beaucoup de traitements[3]. Par contre, les façades en bois peintes ont parfois besoin d'une nouvelle couche. Depuis quelques années, des bois grisâtres permettent d'anticiper visuellement le vieillissement naturel ; ils s'intègrent harmonieusement dans une façade plus ancienne sans avoir besoin d'un entretien. Pour obtenir un gris relativement uniforme, on peut pré-teinter le bois avec un champignon et de l'eau pendant six mois avant de l'exposer.

Le mauvais choix de la forme de l'ouvrage, son orientation, son implantation sont aussi des facteurs qui pourraient provoquer un vieillissement prématuré de l'enveloppe. La conception d'un avant-toit ou d'une coursive aide à protéger la façade du mauvais temps. Une distance suffisamment grande entre la façade et le sol empêche les projections d'eau de croupir.



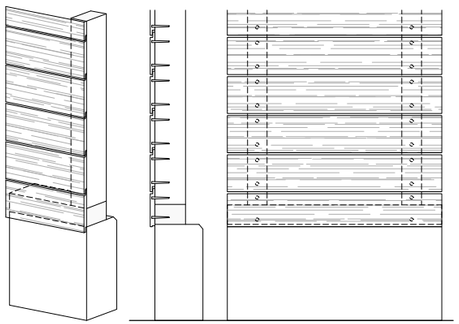
Bardage horizontal à clins

☺ bonne protection contre la pluie
☹ ventilation réduite



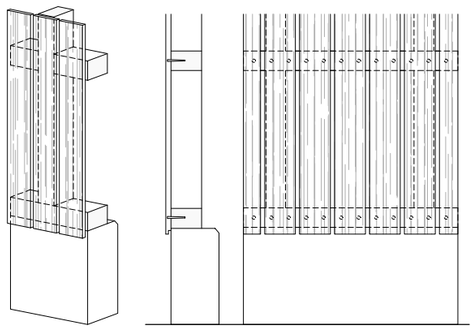
Bardage horizontal à clins sur crémaillère

☺ bonne ventilation
☹ sous-construction compliquée



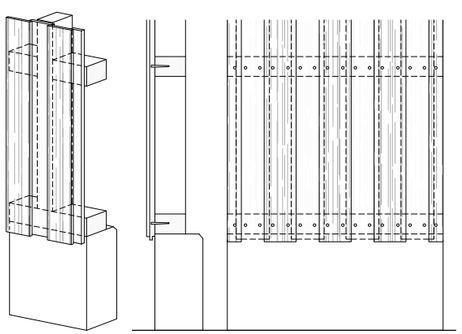
Bardage horizontal à battue

☺ facile à poser
☹ ventilation réduite



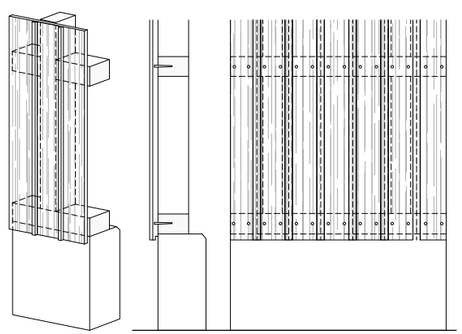
Bardage vertical ajouré

☺ bonne ventilation
☹ mauvaise protection contre la pluie



Bardage vertical à recouvrement

☺ bonne protection contre les intempéries
☹ pose lente, ventilation moyenne



Bardage vertical à couvre joints

☺ bonne protection contre les intempéries
☹ pose très lente, pas de ventilation

Fig. 1

Bois isolation

Le bois est un bon isolant thermique, il ne provoque pas de condensation dans une paroi située entre deux atmosphères ayant de gros écarts de température car il bénéficie d'une conductibilité thermique faible. Cette qualité est due à sa structure cellulaire renfermant de l'air après son séchage. En comparaison, la valeur du béton est 15 fois moins isolant que le bois et l'acier l'est 330 fois moins[1]. De plus, c'est un isolant végétal et donc écologique. Les matières premières destinées à la fabrication des isolants sont composées généralement de copeaux de bois, résidus de scieries. Ce sont des produits annexes de la production de bois d'ébénisterie et de construction. Habituellement, ils sont utilisés pour la fabrication du papier ou directement brûlés. Grâce à la transformation en matériaux isolants, les restes de résineux sont utilisés intelligemment et servent de combustible seulement après une longue utilisation dans des bâtiments. Il existe plusieurs sortes d'isolation dérivées de bois dont les trois sont choisis :

1. [2] Les murs bois et ossature bois, p. 165

a. Les fibres de bois[2].

Les fibres fines de bois sont obtenues par dégivrage des chutes de bois résineux. Elles peuvent être utilisées en vrac, par application manuelle, pour des remplissages ponctuels, mais sont surtout le plus souvent utilisées sous forme de panneaux. Pour se faire, une pâte épaisse est formée par adjonction d'eau, puis, après ajout d'adjuvant, coulée, laminée et séchée entre 120 et 200 ° C. Un autre procédé, qui requiert par contre de hautes températures, permet de n'utiliser que très peu, voire aucun d'adjuvant, mauvais pour l'environnement. Il existe trois sortes différentes de panneaux ayant chacune une utilisation particulière :

- Panneaux semi-rigides à faible densité servant à l'isolation entre ossature.
- Panneaux rigides de moyenne densité, pour remplissage entre ossatures, mais également pour les couches d'isolation thermique ou phoniques contre les bruits d'impact sous chapes ou planchers.
- Panneaux haute densité pour les supports d'enduits, de chapes ou de toiture.

2. [2] Les isolants végétaux, p.106 à 107

b. La ouate de cellulose[3]

La ouate de cellulose est issue du recyclage du papier et, plus particulièrement, de stocks de journaux neufs invendus ou de chutes de coupes de papiers neufs d'imprimerie. Elle est utilisée comme isolant depuis les années 1930 aux États-Unis et en Scandinavie pour

3. [2] Les isolants issus du recyclage, p. 121 à 123

Fig. 1 [34] Figure tirée de l'étude " Le bois dans les constructions rurales" p. 15

des habitations et des établissements publics. Le papier est d'abord broyé et défibré en flocons, puis stabilisé par incorporation de divers agents pour résister au feu et aux moisissures. Comme les isolants en fibres de bois, ils peuvent aussi être utilisés en vrac à l'aide d'une machine. La ouate de cellulose, en panneaux semi-rigides ou en rouleaux, sert au remplissage entre ossatures. Les panneaux rigides sont généralement composés de 12 à 35 mm de cellulose compressée à chaud avec des fibres additionnelles de lin, et sont destinés essentiellement pour l'isolation phonique.

1. [2] Les isolants végétaux, p. 110 à 111

c. Le liège[1]

Le liège est un matériau présent dans l'écorce de quelques arbres, notamment celle du chêne-liège. La récupération du liège ne demande pas l'abattage de l'arbre mais seulement une séparation de son écorce. Le liège a de nombreux usages dans le bâtiment. En tant que matériau isolant, il se présente sous trois forme : granules, panneaux, ou coques, après avoir subi ou non un traitement thermique.

Liège naturel (sans traitement thermique)
En ce qui concerne les granulats issus des écorces de liège, des chutes de façonnage ou des produits de récupération comme les bouchons, sont broyés en granules pour être utilisés en tant que remplissage isolant en vrac, ou sous forme de panneaux agglomérés avec une colle, généralement à base de polyuréthane.

Liège expansé (avec traitement thermique)
L'expansion du liège à la chaleur, comprime les granules dans un moule chauffé pendant plusieurs heures. La matière obtenue forme un bloc homogène dont l'expansion a dilaté la porosité et comblé les vides inter granulaires, ce qui améliore ses capacités isolantes. On utilise généralement ce produit sous trois formes :

- En panneaux ; ils présentent des qualités de résistance à la compression et à l'humidité qui les font souvent utiliser dans les situations techniquement exigeantes : isolation sol, isolation de toiture-terrasse, etc.
- En vrac ; les chutes de façonnage des panneaux expansés sont rebroyées et réutilisées comme les granules non chauffés, mais avec un meilleur pouvoir isolant.
- Sous forme de coques pour l'isolation de canalisations, de pompes des systèmes de chauffages.

2. [2] Qu'est-ce qu'une isolation écologique, p. 110 à 111

Tableau comparant les propriétés physiques des isolations[2]

Type d'isolation	Bilan CO2	Energie grise	Conductivité thermique λ	Masse volumique ρ	Résistance au feu	Résistance à l'humidité	Impact sur la santé	comportement phonique	autres
	kg CO2 eq/kg	kWh/kg	W/m.K	kg/m³	-	-	-	-	-
Fibre de bois faible densité	*-0.183*	5.42	0,038 à 0,042	35 à 50	difficilement combustibles, ne propagent pas de flamme, transmettent peu la chaleur et ne dégagent pas de gaz toxiques spécifiques sauf les produits adjuventés au bitume	ouverts à la vapeur d'eau et bons régulateurs hygroscopiques	précaution à prendre pour la mise en œuvre en vrac et lors de la coupe des panneaux	bonne performance phonique contre les bruits aériens et les bruits d'impact, selon la densité	présence des liants et des adjuvants, substitution des adjuvants par les produits peu polluants ou naturels comme le paraffine et l'amidon
Fibre de bois moyenne densité	*-0.58*	3.81	0,038 à 0,042	60 à 120					
Fibre de bois haute densité	*-0.58*	3.81	0,038 à 0,055	140 à 280					
Ouate de cellulose en vrac	*-0.91*	1.95	0,038 à 0,044	25 à 65	peu combustibles, ne propagent pas de flamme et ne dégagent pas de gaz toxiques spécifiques	capilaire, et bon régulateur hygrothermique	présence du bore, dégage de la poussière lors de la mise en œuvre	bonne performance phonique	meilleur rapport impact environnemental /coût
Ouate de cellulose panneau	*-0.35*	5.08	0,039 à 0,042	70 à 90					
Liège naturel en vrac	*-1.69*	0.09	0,045 à 0,060	80 à 160	moyennement à difficilement combustibles, ne propagent pas de flamme et ne dégagent pas de gaz toxiques spécifiques	faiblement perméables à la vapeur	l'odeur forte de la colle utilisée dans les panneaux	bonne performance phonique	matière première renouvelable mais en disponibilité limitée, prix relativement élevé
Liège expansé en vrac	*-1.23*	1.97	0,036 à 0,042	70 à 100					
Liège expansé panneau	*-1.23*	1.97	0,036 à 0,042	100 à 150					

II. Caractéristique physique

3. [30] Technologie du bois

Comportement structurel[3]

Le bois est un matériau dont ses propriétés mécaniques varient en fonction de différents facteurs : le type d'essence, le taux d'humidité, la manière de sa croissance et la direction qu'il est chargé. En effet, il est considéré comme un matériau anisotrope, et ses propriétés varient selon les différentes directions. Cependant, ce matériau résiste bien à la flexion par rapport à d'autres et a une longue durée de vie. Le changement de son aspect physique, avec le temps, n'entraîne aucune altération de ses propriétés mécaniques.

Comportement thermique

Comme mentionné auparavant, le bois est un bon isolant mais possède une faible inertie thermique en comparaison du béton et d'autres matériaux lourds. Un bâtiment construit entièrement en bois, se réchauffe et se refroidit rapidement. Il est à noter, par ailleurs, que la structure cellulaire du bois est dotée de fibres creuses. Ceci lui confère une propriété particulière de régulation de l'humidité ambiante. Cette propriété est appréciable pour le confort thermique intérieur.

Comportement phonique
Le bois répond facilement aux exigences actuelles en termes d'acoustique (bruit aérien). Il est souvent choisi pour sa capacité à amortir, grâce à sa faible densité et sa structure alvéolaire.

Comportement au feu
Bien que le bois soit combustible, une construction en bois ne veut pas dire qu'elle sera moins efficace qu'une construction en acier ou en béton. En effet, une structure en bois ne perd que de 10 à 15 % de sa résistance totale sous l'effet de très hautes températures[1]. La combustion du bois génère une couche de carbone à la surface du bois et isole la partie non brûlée de la chaleur des flammes.

1. [30]

III. Impact environnemental

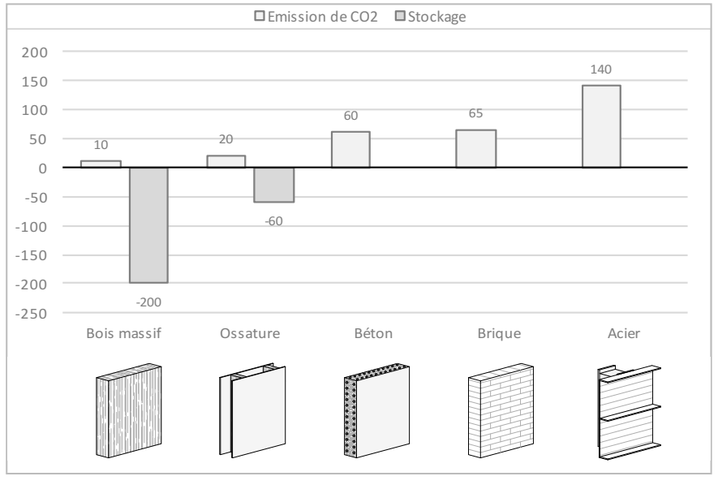
Que ce soit pour des parois en bois massif, des ossatures, de l'isolation ou des revêtements de façade, l'utilisation du bois épargne les ressources. La fabrication du bois demande une quantité d'énergie non renouvelable nettement inférieur aux autres matériaux. En effet, le bois et les matériaux de la biomasse sont les seuls matériaux dont la création de la matière première s'accompagne d'atouts supplémentaires. Ils poussent naturellement, et leur production ne nécessite que peu d'énergie et aucun produit chimique. De plus, sa croissance joue un rôle central de réducteur de CO_2 pour la protection climatique. Il est le seul matériau de construction renouvelable qui capture près d'une tonne de CO_2 par m^3 lors de sa croissance. On estime que 45 mio. de tonnes de CO_2 sont ainsi retenues dans le parc immobilier suisse, ce qui correspond aux émissions annuelles du pays[2].
Il faut faire attention à la provenance de ce matériau ; aujourd'hui, le bois importé, notamment des pays de l'Est, est vendu moins cher que le bois suisse. Par contre, il faut garder en tête que la qualité et la durée de vie est souvent moindre et que l'on ignore souvent s'il a été traité avec des produits chimiques mais aussi comment il a été produit (conditions des travailleurs dans les exploitations des pays tropicaux). De plus, il va parcourir une distance nettement plus importante pour arriver sur le chantier final.

2. [33] Rénover, utiliser du bois, faire preuve de bon sens, p. 3

Grâce à l'abondance des forêts sur le territoire suisse, l'énergie grise des bâtiments en bois est bien inférieure à celle des autres matériaux. Son emploi indigène joue un rôle clé face à la réduction des rejets en CO_2 et limite le recours aux énergies fossiles pour atteindre les objectifs de la société SIA d'ici l'horizon 2050.
Dans le diagramme ci-dessous, nous pouvons comparer le stockage

3. [36] Le bois une réponse aux défis du future, p. 3

et les émissions de CO_2 lors de la construction d'un m^2 du mur en bois massif, en ossature et en trois autres matériaux de construction[3].



Production
La croissance du bois fournit un écosystème qui maintient la biodiversité. Pour que le bilan carbone lié à la production du bois soit positif, il est nécessaire de cultiver et d'exploiter la forêt. Dans une forêt primaire, la quantité de CO_2 piégée par la croissance des arbres, est annulée par la dégradation des bois morts qui s'accompagne d'un dégagement de CO_2 équivalent. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'exploiter les forêts suisses et, cela de manière durable pour que la croissance des parties en régénération équilibre celles qui sont exploitées. De plus, l'abattage, le sciage, le séchage, le rabotage du bois sont des opérations simples qui ne demandent que très peu d'énergie. Par exemple, dans la mesure possible, le séchage du bois se fait à l'air, au naturel. Par ailleurs, les zones de forêt régulent le cycle perméabilité des sols et les paysages forestiers à l'amélioration du cadre de vie.

Transport
Une fois le bois coupé, il est sorti de la forêt pour être amené dans les scieries qui vont le débiter pour l'amener aux ateliers de seconde transformation, qui sont chargés de fabriquer des objets de consommation. Le bois provient en majorité de forêts à proximité des scieries. Les trajets des bois utilisés par bois indigène suisse sont

normalement très réduits : environ 10 kilomètres entre la forêt et la scierie, 15 kilomètres entre la scierie et l'atelier et de nouveau 5 km de l'atelier jusqu'au chantier[1].

1. [60] Bois indigène, traçabilité

Mise en œuvre, entretien et maintenance
La légèreté du matériau bois a des conséquence positives importantes sur le déroulement du chantier : les fondations sont réduites, et le sol naturel est prélevé que très peu. Grâce à leur légèreté, les constructions en bois peut être installée sur les bâtiments existants. Cette propriété permet un gain sur la fabrication des infrastructures du bâtiment et autorise des densifications urbaines sur le tissu existant. De plus, la construction en bois peut faire appel à des procédés de préfabrication pour les éléments de la construction. Ils sont préparés en atelier avec un degré de finition qui varie selon la demande. Le temps de chantier est réduit ainsi que les déchets de chantier. Ils sont assemblés sur le chantier par des assemblages mécaniques, à sec.

Du point de vue de la santé, le bois, s'il n'est pas traité, est parfaitement sain. Il est important de choisir des panneaux de bois et des matériaux de finition (peinture, lasure, papier peints, colles…) qui ne dégagent aucune substance toxique.

Une fois la maison construite, la question de l'entretien se pose après un certain temps. En général, celui-ci est très simple et avantageux pour les constructions en bois. Une façade en bois de sapin non traité ne demande que peu d'entretien et reste utilisable pendant des décennies. Les façades en bois peintes ont parfois besoin d'une nouvelle couche, mais cela est aussi le cas pour toutes les autres façades. En choisissant les systèmes séparés, les parties de façade endommagées sont simplement enlevées et remplacées.

Fin de vie
Après utilisation, le bois de construction est transformé de plusieurs manières. Vu que les éléments de construction en bois sont normalement montés avec des assemblages mécaniques, ils sont facilement démontables. Le démontage, opposé à la démolition destructrice, permet de dissocier chaque composant pour les réemployer dans une nouvelle construction. Les produits du bois ayant rempli leur premier service ne doivent pas obligatoirement être éliminés. Certains composants sont utilisables plusieurs fois pour un usage identique ou différent après transformation. Si une telle ré-utilisation comme matériau n'est pas possible, le bois peut

toujours servir d'énergie de chauffage ou de procédé. Enfin, en cas de dégradation biologique, le bois se transforme en engrais qui peut servir à la nourriture d'un nouvel arbre.

Une utilisation du bois en cascade est une priorité afin d'exploiter efficacement cette ressource naturelle ; il est avantageux de le recycler. Mais souvent, le bois est traité ou enduit avec des produits chimiques avant sa première utilisation. Les colles, couleurs, imprégnations et autres corps étrangers limitent l'utilisation en cascade et le recyclage du bois usagé. Afin que le bois usagé puisse être réutilisé comme matériau de construction ou source d'énergie, en respectant l'environnement et la santé, lors de la démolition, les bois usagés doivent tout d'abord être trié et ensuite stocké séparément selon leur pollution. Ils sont ensuite libérés de leurs corps étrangers à la main ou à l'aide d'aimants et de séparateurs de métaux. Ainsi, il devient réutilisable et est préparé ou broyé selon son utilisation future. Le bois très pollué ne peut qu'être éliminé que dans des chaudières à bois usagé. Au final, le déchet bois n'existe pas car il est soit réutilisé pour d'autre usages, soit brûlé pour produire de l'énergie, soit transformé en compost.

VI. Conclusion

Avantages
Au final, nous pouvons conclure que le bois a un avantage face aux autres matériaux de par sa légèreté et sa résistance. Il est facile à manipuler et donc flexible. Son transport et sa mise en œuvre sont faciles grâce à un poids moindre et une possible préfabrication des éléments. Malgré leurs murs relativement moins épais, permettant de gagner en surface habitable, les constructions en bois obtiennent des coefficients d'isolation thermiques bien au-dessus des normes. Ces constructions peuvent donc être chauffées à moindre coût et répondent sans problème aux exigences énergétiques très strictes de Minergie-P.

Contrairement aux idées reçues, le bois résiste très bien au feu. La combustion du bois est très lente et la structure résiste donc bien aux incendies. En plus, sa combustion émet peu de gaz dangereux. Grâce à sa structure cellulaire particulière, le bois absorbe et restitue la vapeur et l'humidité ambiante ce qui permet de garder un confort pour les habitants. Il possède également d'autres avantages comme le coût moins élevé d'une construction d'une maison en bois par rapport une construction classique. Cela s'explique principalement par le fait que les structures sont légères et ne nécessitent donc pas

de fondations très profondes. Grâce à sa légèreté, nous pouvons facilement utiliser le bois pour une surélévation ou une extension. De plus, par un assemblage simple, il nous donne la possibilité de réaliser nous-même une part de la construction.

Désavantages
Cependant, il existe des freins au développement de la construction en bois. C'est un matériau sensible à l'humidité, et sa légèreté le rend vulnérable aux vents forts. Le second problème est le manque d'importance accordé à la provenance du bois par les acheteurs. En effet l'utilisation de bois étrangers dans la construction n'a pas un impact sur le bilan d'exploitation, mais le bilan global du bâtiment augmente à cause d'une consommation plus élevée d'énergie grise pour la phase de transport.

Le bois est un excellent isolant thermique, mais le point faible se situe plutôt du côté de l'inertie thermique (le stockage de la chaleur) en comparaison de certaines constructions lourdes (à condition que l'isolation soit à l'extérieure). Une bonne inertie thermique est nécessaire dans un bâtiment pour mieux gérer les variations brusques du climat extérieur, comme les surchauffes en été ou l'effet des nuits froides à la mi-saison. Comme le bois respire, il restitue très vite la chaleur ou la fraîcheur et ne les garde pas longtemps dans le bâtiment. Cependant, nous pouvons obtenir une bonne inertie thermique en améliorant les détails constructifs. Nous pouvons combiner le bois avec d'autres matériaux comme la terre ou le béton, bons en termes d'inertie thermique.

Au final, le dernier point concerne l'utilisation des colles ou traitements toxiques sur certains bois de construction. Cela relativise ses atouts en matière d'écologie et de santé et cause des émissions de CO_2 élevées à la fin de sa vie.

4.2.4 Le béton de recyclage

I. Caractéristique architecturale

Le domaine "construction" est responsable d'importants flux de déchets, ainsi que de consommations de matières et d'énergie conséquentes. Chaque année, en Suisse, environ 50 millions de tonnes de déchets minéraux issus de matériaux de construction sont produits. Ils représentent, et de loin, la plus grande masse de déchets en Suisse. Actuellement, environ 25% de ces déchets minéraux (asphalte routier, démolition des ouvrages en béton, démolition mixte) sont recyclées[1]. Les produits recyclés peuvent ainsi remplacer les matières premières minérales. Pour préserver les ressources naturelles et éviter la saturation des sites d'enfouissement couplée aux coûts d'enfouissements, il convient de valoriser les déchets de béton autant que possible. Il faut donc faire en sorte qu'une utilisation des matériaux de récupération de haut niveau soit possible tant du point de vue de leur qualité que de la protection de l'environnement.

1. [61] Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux

Historique
Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, il en est produit un peu plus de 20 milliards de tonnes chaque année dans le monde[2]. Il donne un caractère monolithique et ses possibilités d'utilisation sont souples. Aucun autre matériau ne laisse aux architectes une telle liberté de conception. Si le coût financier du béton est bas, son empreinte environnementale est conséquente. Il est produit, entre autres, à partir de granulats et de ciment.

2. [9] Les bétons et les autres liants hydrauliques, p. 107 à 111

La proportion de ciment dans un béton classique ne représente que 15 à 20 % en masse de sa fabrication et constitue la majeure partie de la totalité des émissions de carbone d'origine humaine dans l'atmosphère. Il est donc essentiel de choisir avec soin le type de ciment pour respecter au mieux les critères environnementaux. La quantité de clinker, qui est la matière première du ciment, influence directement la charge environnementale du ciment. La production d'une tonne de clinker génère, en moyenne, une tonne de CO_2[3]. Les ciments composés, ayant une faible proportion de clinker, sont ainsi clairement favorables. Une alternative possible est par exemple, d'additionner des cendres volantes dans le béton lors du malaxage permettant de réduire légèrement le dosage en ciment. Une deuxième alternative est de remplacer l'énergie thermique nécessaire à la fabrication des ciments par l'énergie de la combustion de déchets. D'autre part, les granulats constitutifs du béton sont produits soit à partir de dépôts alluvionnaires, soit à partir de roches naturelles

3. [39] Type de ciment, p.3

concassées. Aujourd'hui en France, on consomme environ 7 tonnes de granulats naturelles par habitant par an[1]. Le recyclage du béton est donc un enjeu majeur tant pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre que pour la préservation des ressources naturelles en granulats. A la fin de sa longue durée de vie, nous pouvons réutiliser les granulats pour substituer les matières brutes naturelles. Grâce à ce cycle, l'espace nécessaire au déchets minéraux, issues de la construction peut aussi être minimisé.

1. [9] Les bétons et les autres liants hydrauliques, p. 107 à 111

Utilisation en suisse[2]

L'emploi du béton recyclé a évolué depuis 1996 en Suisse[3]. Ceci est dû à la raréfaction des réserves existantes en matière de granulats sur le territoire. En effet, au rythme d'exploitation actuel des gravières, les réserves suisses sont potentiellement utilisables seulement pendant une trentaine d'années. La seconde raison est l'élimination des déchets de chantiers dont les volumes excèdent, depuis quelques années, la capacité libérée dans les gravières qui servent de sites de stockage.

2. [62] Béton de granulats recyclés, février 2012

3. [53] Conférence-débat du 28 avril 2004

Il est estimé que, en 2015, environ 7% de la production totale de béton en Suisse, soit environ 1 million de m^3, contient des matériaux de recyclage. Cette pratique, déjà bien ancrée, par exemple, dans la région zurichoise, est en augmentation régulière et tend à s'accentuer. Selon la base de données KBOB, la part de béton de recyclage représente déjà environ 10% des besoins en béton dans l'agglomération de Zurich.

Dans le contexte suisse, il existe deux types de béton : le béton dit "béton normal", pouvant contenir une part de matériaux recyclés inférieure à 25%. Ensuite, le béton dit "béton de recyclage". Dans la formulation de ce type de béton, la part de matériaux recyclés doit être égale ou supérieure à 25%. Pour le béton de recyclage il existe deux sortes de granulats :

- Béton RC-C Granulats (granulats de béton) :
Obtenu par traitement de béton de démolition ;
Forme des grains : concassé ;
Qualité : proche du béton ordinaire avec grain concassé.

- Béton RC-M Granulats (granulats mixtes) :
Par traitement des matériaux de démolition non triés ;
Forme des grains : concassé ;
Qualité : retrait important et fluage, flèche plus importante qu'avec le béton ordinaire.

Techniques de mise en œuvre

Pour le béton de recyclage, on appliquera les mêmes exigences de la norme SIA 162 et la fiche technique SIA 2030[4]. La part de granulats naturels doit être remplacée dans le recette par le pourcentage adapté de granulats recyclés. Cependant, il est difficile de satisfaire aux exigences relatives aux bétons à haute résistance et à performances particulières de la norme SIA 162 sans l'ajout d'une part importante de granulats naturels, adjuvant ou préparation spéciale.

4. [13], [17]

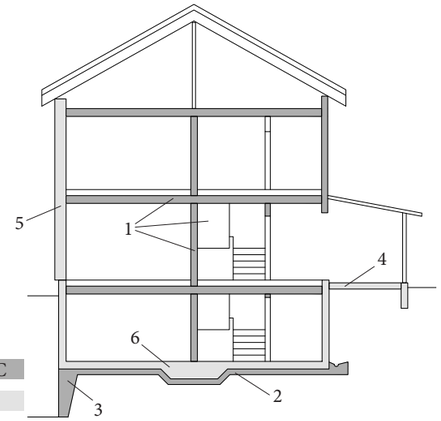
En Suisse, le label Minergie-ECO exige l'utilisation de béton recyclé. Il définit le type de granulat et le pourcentage minimal du granulat recyclé dans la composition du béton, et du béton recyclé utilisé sur l'ensemble de la construction. Pour les bétons classés à base de granulat de béton recyclé, la proportion massique minimale de granulat recyclé RC-C, se monte à 25%. Si l'on considère le tonnage de béton sur l'ensemble de la construction, au moins 50% de celui-ci doit être réalisé avec du béton recyclé RC-C, pour obtenir le label Minergie-ECO. De plus, dans le cadre de la norme Minergie-ECO, le granulat recyclé doit être obtenu à une distance raisonnable qui ne dépasse pas un rayon de 25 km[5]. Pour les bétons maigres, en revanche, la proportion massique minimale s'élève à 40% pour le granulat de béton recyclé RC-C, et pour le granulat mélangé RC-M, et cela pour l'ensemble des applications.[6]

5. [53] Conférence-débat du 28 avril 2004

6. [39] Minergie-ECO, p. 8

Utilisation du type de béton de recyclage dans les parties du bâtiment[7]

[62] Selon les classes d'expositions SIA 0262, février 2012



Adapté uniquement au béton RC-C

Adapté au béton RC-M, RC-C

1. Parois, plafonds, cages d'escaliers armés, sec à l'intérieur.
2. Couche de propreté
3. Murs de reprise en sous-œuvre

4. A l'extérieur, protégé de la pluie
5. Façades extérieures, surfaces absorbant l'eau
6. Béton étanche

Aujourd'hui, le béton de recyclage ne peut pas être utilisé pour les éléments en béton préfabriqués. La préfabrication doit se réaliser avec des granulats ronds ; il est toutefois envisageable d'utiliser à l'avenir du granulat recyclé pour cette application.

Ci-dessous nous citons quelques exemples ayant utilisés du béton de recyclage de type RC-C ou RC-M dans leur construction.

Exemple

L'Union Internationale pour la Conservation de la Nature, UICN, à Gland[1]

L'UICN est la plus grande organisation environnementale du monde dont son siège se trouve à Gland. Ayant besoin de plus d'espace, il décide de construire une extension en s'imposant des standards environnementaux très sévères ; L'UICN a en effet comme objectif d'atteindre non seulement le label Minergie-P-ECO mais d'obtenir aussi la certification nord-américaine LEED Leadership in Energy and Environmental Design, dont l'application constituait une première en Suisse. En plus de ces contraintes, l'UICN a aussi décidé de garder un budget limité ; la nouvelle construction, ayant un volume comparable à celui du siège actuel, ne doit en effet pas coûter plus cher que le premier bâtiment.

La structure porteuse est entièrement faite avec du béton armé, comprenant deux étages et un sous- sol, accueillant des locaux techniques et des zones de parking. La structure porteuse suit une trame principale de 7,8 m pour offrir une flexibilité pour la distribution et l'utilisation des espaces[2]. Pour respecter la norme Minergie-P, une isolation de 34 cm d'épaisseur, en laine minérale, à été ajouté à l'ensemble du bâtiment.

En raison des fortes contraintes environnementales, et pour replier les exigences de label Minergie-ECO, le béton utilisé doit contenir une part de granulats recyclés. La provenance des granulats recyclés est de Gland.

Dans l'extension de l'UICN, le béton recyclé est utilisé pour les planchers-dalles des étages. Cela correspond à plus du 70% des éléments en béton armé pour lesquels le RC était utilisable, les 30% restants correspondant au radier, aux balcons, aux murs et à la dalle de la grande salle de conférence, qui sont en béton traditionnel. Ramené à la totalité des éléments en béton armé, le taux d'emploi de RC est de 41%[3].

1. [57] Siège UICN, Atelier LYON, Gland

2. Article Béton recyclé à l'UICN, p. 16

Fig. 1 [57] "Siège UICN", béton de recyclage pour les planchers-dalles

3. [62] Expériences tirées de la pratique, p. 5

Fig. 1

Fig. 1

Fig. 1

1. [56] Quartier Werdwies, Adrian Streich Architekten, Zurich

Fig. 1 [56] Quartier Werdwies, photos

Quartier Werdwies à Zurich[1]

La ville de Zurich décide de remplacer les constructions des années 50 du quartier Grunau à Zurich, afin de créer une meilleure qualité de vie pour les habitants. En tant que le maître d'ouvrage, elle demande avant tout, une construction qui utilise les ressources disponibles et peu gourmandes en énergie, ainsi que le traitement approprié des matériaux de démolition issus de l'ancien site résidentiel.

Le site accueille aujourd'hui, sept bâtiments de huit étages en béton armé, avec au total 152 appartements, connue pour leurs possibilités d'aménagement souple.

Dans ce projet, pour la première fois en Suisse, le maître de l'ouvrage utilise du béton de recyclage, constitué de 100% de granulats issus des matériaux non triés, en une grande quantité pour les parois porteuses intérieures.

Les parties suivantes ont également une part de béton de recyclage dans leur construction :

Le béton de recyclage, RC-C, pour
– Les sous-sols étanches
– Les plafonds ayant en partie de grandes portées
– Les parois en béton apparent au rez-de-chaussée

Et le béton de granulats mixtes, RC-M, pour les parois intérieures des appartements[2].

2. Revue Habitation, De nouvelles approches dans la construction de logements communaux, p. 9

3. [48] École Hirzenbach, Boltshauser Architekten, Zurich

École Hirzenbach à Zurich[3]

Un complexe scolaire est conçu comme une constructions autonome, dans le cœur d'un quartier habitation. De profondes niches en béton armé orne toutes ses quatre façades du bâtiment. Ces niches, d'une profondeur importante et de la hauteur d'un étage, font office de brise-soleil, créant une zone tampon entre l'intérieur et l'extérieur. On pourrait également bien les considérer comme un encadrement de fenêtre surdimensionné.

Lors de la construction de cet complexe, le béton de recyclage coloré en pigments blancs, est utilisé pour le béton apparent, et le béton de recyclage normal pour le reste des parties en béton[4].

4. [62], [52] p. 28 à 37

Fig. 2 [62] École Hirzenbach, photos

Fig. 1

Fig. 2

1. [39] Généralité sur les propriétés du béton recyclé à l'état frais et durci, p.4 à 5

II. Caractéristique physique[1]

Comportement structurel
Jusqu'à aujourd'hui, Il est conseillé d'utiliser le béton de recyclage uniquement pour le béton maigre de remplissage ou des éléments de structure situés à l'abri des intempéries. Les caractéristiques mécaniques du béton de recyclage, la résistance et la module d'élasticité, étant réduites, l'utilisation de béton recyclé devrait logiquement être limitée aux éléments de structure peu sollicités. Cependant, tout dépend de la part de granulats naturels et le type de granulats recyclés.

De plus, le béton de recyclage n'est pas adapté pour des éléments de structure devant résister au gel et aux sels de déverglaçage car ces éléments doivent présenter de très hautes valeurs de résistance : supérieures à C40/50.

Comportement thermique
Comme le béton normal, le béton de recyclage doit être associé à d'autres matériaux qui assurent l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment. Le béton de recyclage possède grâce à sa porosité, une bonne inertie thermique, à condition qu'il soit placé sur la face intérieur de l'enveloppe, il aide à limiter le changement brusque de la température à l'intérieur du bâtiment.

Comportement à l'humidité
L'étanchéité du béton de recyclage est généralement inférieure à celle du béton à base de granulats naturels, raison pour laquelle la qualité et l'importance de l'enrobage des armatures, sont des sujets non négligeables. De plus, une trop grande concentration de substances chimiques, telles que des chlorures ou des sulfates dans les granulats recyclés, peuvent réduire la durabilité du béton de recyclage armé.

La masse volumique d'un béton de recyclage est légèrement inférieure à celle d'un béton normal. Les granulats recyclés présentent une très forte absorption d'eau, en particulier s'il s'agit de granulats mixtes de faible masse volumique avec une teneur en vides supérieure aux granulats naturels. Ces inconvénients techniques, dépendent fortement à la variabilité de la composition et des propriétés des granulats, engendrée par les origines diverses des matériaux recyclés.

Les dosages en eau, en ciment et en adjuvants sont très souvent augmentés dans le cas du béton de recyclage, afin d'assurer une mise en place facile du béton frais.

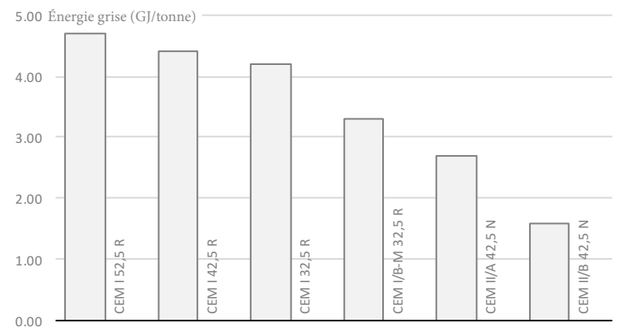
Module d'élasticité
Le module d'élasticité du béton est principalement lié à des granulats et la quantité de ciment utilisés. Les granulats recyclés, en particulier les granulats mélangés, présentent un module plus faible que celui des granulats naturels. Il en résulte donc un module d'élasticité du béton recyclé inférieur à celui d'un béton primaire. Cette baisse est directement dépendante du type de granulats recyclés et de la proportion massique de contenue dans le béton recyclé. La probable augmentation du volume de ciment du béton recyclé accentue encore cette baisse de module.

Par rapport au béton ordinaire et au béton de recyclage C, le béton de recyclage M présente un module d'élasticité plus faible et des coefficients de retrait et de fluage plus élevés. Ce résultat est dû au volume de ciment qui est supérieur à dans le béton recyclé par rapport à béton normal.

III. Impact environnemental
Comme le graphique ci-dessous le montre, l'énergie grise d'un béton dépend aussi du type de ciment utilisé dans sa formulation. Du point de vue de la consommation de l'énergie grise et les émissions de CO_2, la préférence devrait être donnée dans l'ordre aux bétons confectionnés avec les ciments suivants :

2. Source : Architecture et Climat d'après FEBELCEM / ENCI

Energie grise pour la production des ciments (GJ/tonne)[2]



Par la suite, nous proposons d'étudier les impacts environnementaux associés aux différents types de bétons en utilisant un exemple basé sur le cycle de vie de ce matériau[1]. Dans cet exemple, les performances de trois bétons : naturel, recyclé et mixte sont évaluées. On définit la même classe de résistance C35/45 et le même dosage de ciment, (CEM I, 350 kg/m^3) pour toutes les trois variantes.

1. [38] Archive ouverte HAL, novembre 2014

Les composants de ces trois types sont les suivants :
- Le béton traditionnel, élaboré avec des granulats naturels et du sable naturels ;
- Le béton recyclé, élaboré avec des granulats recyclés et du sable recyclés ;
- Le béton mixte, élaboré avec des granulats recyclés et du sable naturel.

Formulations des échantillons[2]

2. [62] Selon les classes d'expositions SIA 262, février 2012

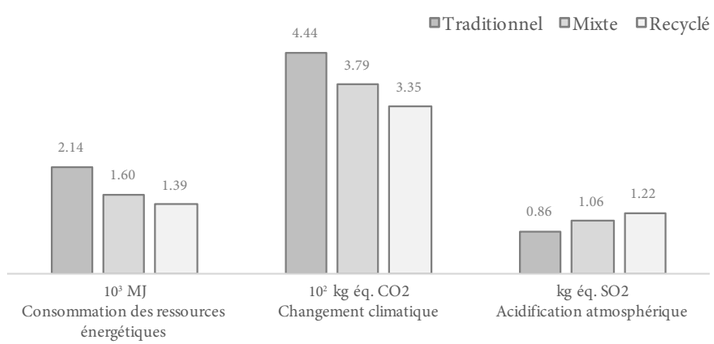
Bétons							
	Sable naturel	Sable recyclé	Granulat naturel	Granulat grossier recyclé	Ciment (CEM I)	Eau	Adjuvant
kg/m^3							
Traditionnel	685	-	1176	-	350	194	-
Mixte	759	-	-	967	350	180	2.6
Recyclé	-	769	-	866	350	165	10.5

Les échantillons de béton recyclé (RC-C) et de béton mixte (RC-M) contiennent un adjuvant, utilisé pour augmenter la fluidité du béton frais de façon à atteindre la maniabilité souhaitée.

L'analyse porte sur 1 m^3 de béton et tient compte de l'ensemble des flux entrants et sortants (matériaux, énergie, transports, émissions…) nécessaires à la mise en œuvre des échantillons.

Les indicateurs d'impacts environnementaux des bétons sont présentés dans le tableau ci-dessous[3] :

3. [38] Comparaisons environnementales, p. 7



On constate que dans l'ordre, le béton recyclé et ensuite le béton mixte présentent des impacts environnementaux plus faibles que le béton traditionnel. A l'exception de l'indicateur "acidification atmosphérique", les autres indicateurs d'impacts environnementaux sont plus faibles pour le béton recyclé par rapport au béton mixte. En effet, l'intégration de sable (granulats ronds)[4] et de granulats recyclés dans la formulation du béton est avantageuse sur ses performances environnementales.

4. [5] Comparaison de l'énergie grise des granulats ronds avec les granulats concassés selon la base KBOB

Si les bétons mixte et recyclé présentent des valeurs plus faibles pour ces catégories d'impact, cela peut être en raison d'une réduction des transports des granulats issus de recyclage. En effet, Il n'est pas nécessaire d'extraire et de transporter des matières premières à partir d'une carrière, ce qui limite les émissions de substances organiques et les émissions de poussières dans l'air. Au contraire, l'augmentation de l'indicateur "acidification atmosphérique" peut, en partie, être expliquée par la présence d'un adjuvant dans les bétons recyclé et mixte. Lors de la synthèse de l'adjuvant, des substances possédant un fort potentiel d'acidification atmosphérique sont rejetées dans l'air.

En résumé, nous pouvons confirmer qu'en valorisant les déchets de chantier minéraux en les utilisant dans le béton de recyclage, on vise à limiter les impacts sur environnement.

Production

Le processus de production du béton de recyclage peut se diviser en deux parties : la production du ciment et la production de granulats recyclés. Lors de la production du ciment, la transformation du calcaire et de l'argile, les matériaux nécessaires à la fabrication du clinker, dégage du gaz carbonique. Lorsque le calcaire se transforme en chaux, il libère du CO_2 au cours de cette opération. Ce dégagement représente 60% de la totalité émise lors de la fabrication du ciment. L'autre partie restante vient de l'énergie consommée par les fours de cuisson à très haute température, à 1000 °C et plus[5].

5. [9] Approche environnementale, dégagement CO_2, p. 128

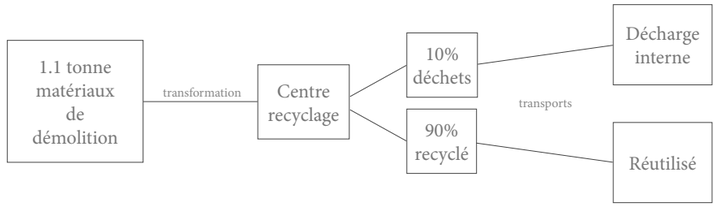
Aujourd'hui, nous essayons d'atténuer ces dégagements en utilisant d'autres alternatives comme la réalisation du clinker avec des matières premières exemptés de calcaire ou diminuer le pourcentage de clinker dans le ciment par ajouts de sous-produits industriels comme la cendre volante. Pour la partie de cuisson, il est préférable d'augmenter la part de l'énergie renouvelable nécessaire. Aujourd'hui, 10% de l'énergie consommée provient de la biomasse et 25% environ provient de l'incinération de déchets combustibles, notamment industriels, le reste provenant des énergies fossile[6].

6. [9] Approche environnementale, consommation énergétique liée à la fabrication, p.128

Concernant la production de granulats de recyclage, l'impact de la production d'une tonne de granulats recyclés est globalement moins important que celui de la production d'une tonne de granulats naturels concassés. En effet, l'intérêt environnemental du recyclage est majoritairement dû à l'évitement de mise en décharge de matériaux de démolition.

En effet, le recyclage de 1.11 tonne de matériaux de démolition nous permet la production de 1 tonne de granulats recyclés et de 0.11 tonne de déchets inertes. Cela représente environ 10% par rapport la quantité totale de matériaux de démolition apportés au centre de recyclage. Ainsi il est possible d'éviter de mettre 1 tonne de matériaux de démolition en décharge[1].

1. [65] Limites du système, p. 18



De plus, dans le cas des graviers recyclés, nous n'avons plus la consommation d'énergie liée à la phase de production des granulats, comme l'électricité consommée pour le concassage des pierres, et les gaz à effet de serre liés à la combustion de diesel des machines de chantier.

Au final, le béton, produit à partir des granulats recyclés de démolition, peut résoudre le problème de pénurie des ressources.

C'est à noter que le bénéfice du recyclage provient du fait que le processus "mise en décharge inerte" est très gourmand en énergie primaire non-renouvelable et émet beaucoup de CO_2 pour les raisons suivantes[2] :

2. [65]

Le bitume qu'il faut mettre au fond de la décharge pour l'étanchéifier et en partie pour construire la route d'accès consomme une partie importante de l'énergie primaire non-renouvelable. Ensuite une part de l'énergie est dépensée pour le déplacement des terres nécessaires à la création et à la fermeture de la décharge inerte, et enfin le diesel utilisé lors du déplacement des matériaux sur site. De la même façon, tous ces étapes émettent également le gaz CO_2.

Transport
Le transport du béton et celui de ses composants, depuis les sites de production jusqu'aux chantiers, peut pénaliser lourdement le bilan énergétique lié à la consommation des véhicules. Comme une partie des granulats employés en Suisse est issue de la France voisine, il est apparu que pour un approvisionnement depuis la France, l'impact du transport des granulats est multiplié par un facteur trois par rapport à un approvisionnement local. Cet inconvénient peut être pris en charge en multipliant des sites de production et les installations des centrales recyclage en Suisse.

Dans le cas des graviers recyclés, nous n'avons plus la consommation d'énergie consacrée au transport des granulats jusqu'au site de décharge, à la fin de leur vie. Au contraire, il faut ajouter la distance de transport du site de démolition jusqu'à centre de recyclage et la consommation d'énergie dans le centre de recyclage. Cependant, la distance de distribution vers le client existe toujours et ne varie que peu. De ce fait, la provenance du granulat joue un rôle important. Il faut retenir que pour fabriquer une tonne de granulat recyclé, environ 10% de matériaux finissent toujours en décharge, ce qui consomme aussi de l'énergie lors du transport.

Il existe un rayon d'approvisionnement limite qui se situe à environ 55 km à partir duquel il n'est plus intéressant d'aller chercher les matériaux de démolition pour les recycler[3]. Si le site de décharge pour les déchets de démolition ne nécessite très peu de préparation et est peu gourmand en consommation d'énergie, par exemple une ancienne carrière que l'on remplit, l'impact d'une tonne de déchets engendre une consommation d'énergie primaire et des émissions de CO_2 beaucoup moins grandes. Dans ce cas le rayon d'approvisionnement en matériaux de démolition peut aller jusqu'à 135 km.

Mise en œuvre, entretien et maintenance
Le chantier en béton de recyclage fonctionne de manière relativement pareille à celui du béton normal. Il s'agit, dans les deux cas, d'une construction lourde et massive, en filière humide. Ce type de construction demande des fondations importantes. Le chantier nécessite des engins lourds et une rotation importante de camions. L'ensemble est aussi générateur de pollution sonore et des poussières.

Malheureusement, il n'existe pas de système de préfabrication pour le béton de recyclage qui pourrait réduire les impacts et les émission CO_2 liés à cette phase.

Le béton de recyclage peut être laissé brut à l'extérieur et ne demande pas d'entretien particulier, dès l'instant où la porosité de sa surface assure une étanchéité à l'eau et à la pollution. Par conséquent, l'utilisation de béton de recyclage pour la façade est possible du moment où nous n'utilisons pas les granulats de recyclage mixte. Leur porosité est beaucoup plus importante que celle des granulats issus de béton de démolition.

Fin de vie
A chaque recyclage, la résistance du béton diminue. Les bétons de recyclage moins résistants peuvent être utilisés dans les ouvrage ne demandant que très peu de sollicitation, par exemple, utilisés sous forme de granulats pour la fabrication des routes.

VI. Conclusion

Avantages
L'avantage le plus évident du béton de recyclage est que les ressources existantes sont protégées et les réserves sont donc moins rapidement épuisées. En outre, du point de vue de l'impact environnemental, la solution de recyclage est intéressante car elle permet de diminuer les impacts assez importants de mise en décharge des matériaux de démolition. Il faut néanmoins évaluer ce résultat par l'importance que peut avoir la distance d'approvisionnement en matériaux de démolition. Un autre aspect important est la réduction des trajets pour le transport et la diminution des émissions CO_2 relatives.

Désavantages
Suite aux recherches faites pour cette étude, nous avons constaté que dans le passé proche, il n'y avait aucune demande de grave recyclée. Les produits recyclés existants avaient mauvaise presse, notamment au vu de leur teneur élevée en bitume et n'étaient envisagées que comme sous-couche.

Aujourd'hui, le béton de recyclage peut présenter des propriétés mécaniques équivalentes au béton de granulats naturels si le béton d'origine est de bonne qualité. Cependant, des problèmes, tels qu'une absorption d'eau élevée, la géométrie angulaire de ces granulats, la distribution de la taille des particules de sable recyclées ou la substitution de sable naturel par du sable recyclé, diminue leur utilisation industrielle et se limite principalement au béton maigre et béton de propreté.

4.3 Analyse de cycle de vie de différents scénarios de façade

Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, l'enveloppe du bâtiment, en tant qu'un élément de construction, représente entre 30 et 40% de l'énergie grise totale d'un bâtiment. C'est pour cette raison que dans ce chapitre final, nous apportons notre intérêt sur la comparaison de quatre variantes de mur extérieur composés par des matériaux étudiés dans le chapitre précédent.

Cette étude est menée en utilisant le logiciel Lesosai. Nous appuyons sur la base de données Ecoinvent, version 2009/1 : 2016 qui est la source la plus complète en Suisse et est utilisée dans le logiciel Lesosai[1]. Néanmoins, elle ne fournit pas suffisamment d'information pour tous les matériaux notamment le béton de recyclage.

1. Annexe 1

Pour les données du béton de recyclage, nous avons calculé le ratio du béton normal/béton recyclé de l'exemple page 118, et ensuite nous l'avons appliqué au béton armé C35/45 et le ciment CEM I, de la base de données Ecoinvent.

L'objectif est de comparer l'énergie grise, NRE [MJ/m²an] et les émissions de CO_2, GWP [kg CO_2-eq/m²an] d'un m² d'un mur extérieur avec plusieurs scénarios comparatifs.

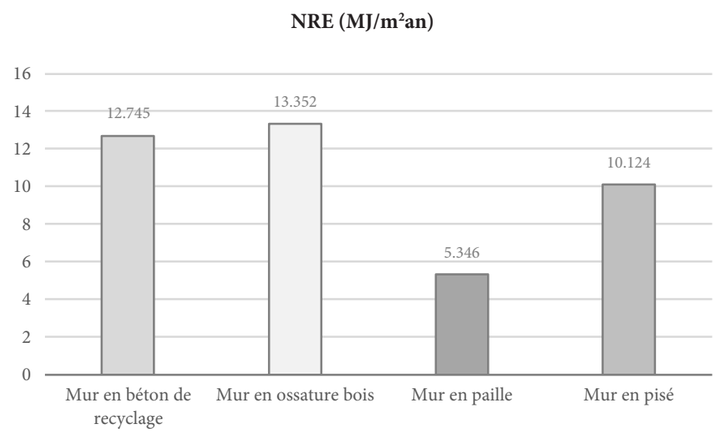
Pour faire cette évaluation, nous devons clarifier quelles sont les phases pris en compte durant le cycle de vie du mur. En effet, les murs se décomposent à des matériaux qui les constituent et les matériaux passent par les phases suivantes dans les bases de données Ecoinvent:

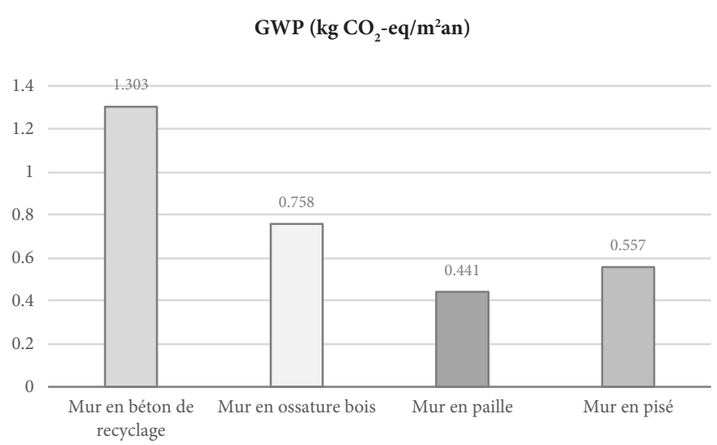
- Fabrication : regroupent l'extraction des matières premières, leur acheminement jusqu'à une usine de fabrication ainsi que les processus permettant d'arriver à un produit fini.
- Transportation : le transport des matières vers leur site de production est pris en compte. Cependant, les impacts liés au transport des matériaux depuis l'usine jusqu'au site de construction n'ont pas été considérés. Ceci vient du fait qu'on va supposer que tous les matériaux sont locaux
- Remplacement : la durée de vie des matériaux de construction est établie par le cahier technique SIA 2032. Les matériaux utilisés en tant que la partie structurelle du mur, sont viables pour 60 ans d'utilisation et les autres matériaux pour 40 ans.
- Élimination : une fois le bâtiment est arrivé en fin de vie, les déchets résultants de la démolition doivent être transportés vers des centres

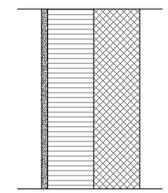
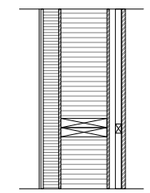
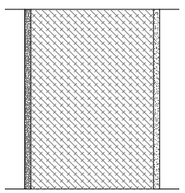
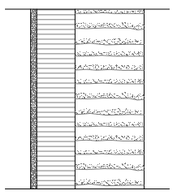
de tri ou de traitement des déchets afin d'être recyclés, incinérés ou mis en terre. L'énergie liée à cette phase à été aussi prises en compte.

Au contraire, le traitement sur le chantier, l'assemblage des matériaux et un éventuel entretien nécessaire durant la période d'utilisation engendre des impacts négligeables par rapport aux impacts globaux, donc les phases mise en œuvre et entretien ne sont pas prises dans ce calcul.

Dans les tableaux suivants nous pouvons trouver le résultat :





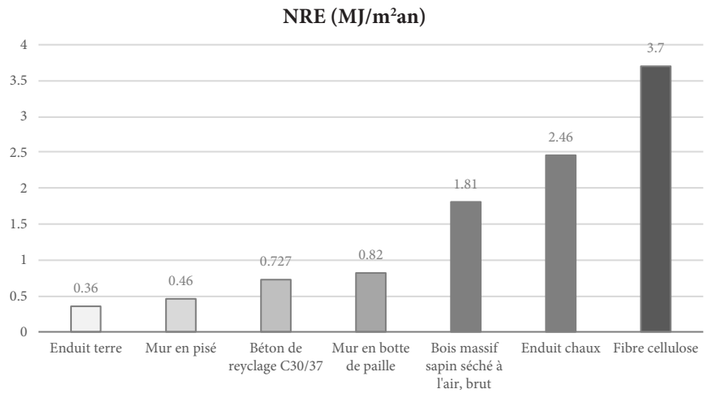
Performance thermique	**MINERGIE-P** **valeur U éléments opaques : 0.1 à 0.15 W / m²K**			
Technique constructive	Mur en béton de recyclage	Mur en ossature bois	Mur en paille porteuse	Mur en pisé
Coupe schématique sur mur				
Épaisseurs des matériaux utilisés	1. Enduit chaux : 2 cm 2. Isolation cellulose : 25 cm 3. Béton de granulats recyclés : 30 cm	1. Enduit terre : 2 cm 2. Plaque de plâtre armé de fibres : 1.5 cm 3. Isolation cellulose : 10 cm 4. Panneau d'aggloméré type OSB : 1.5 cm 5. Montants BLC : 8 x 30 cm + isolation cellulose 6. Panneau de fibres de bois mi-dur : 1.5 cm 7. Lattage : 4 cm 8. Contre-lattage : 4 cm 9. Lambris sapin brut : 3 cm	1. Enduite terre : 4 cm 2. Paille porteuse : 80 cm 3. Enduit chaux : 4 cm	1. Enduit terre : 4 cm 2. Isolation cellulose : 25 cm 3. mur en pisé : 45 cm
Épaisseur total des murs	57 cm	57.5 cm	88 cm	74 cm
Coefficient de transmission thermique W/m²K	0.14	0.09	0.085	0.14
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX				
Energie grise MJ/m²an	12.75	13.35	5.35	10.1
Émission de CO_2 MJ/m²an	1.3	0.75	0.45	0.55

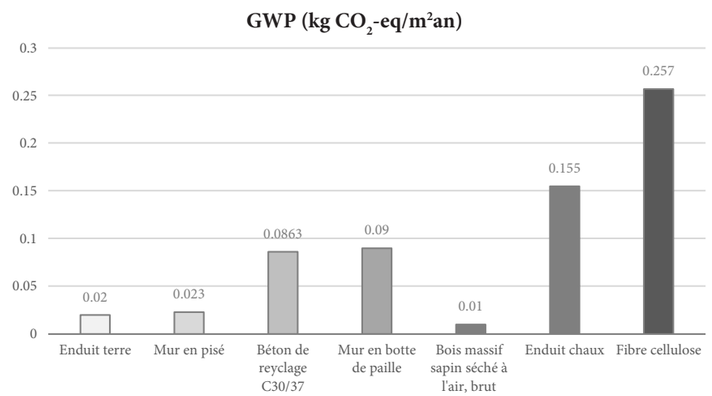
Nous constatons que pour pouvoir remplir la valeur U exigée par le Minergie-P, toutes les variantes ont une épaisseur importante par rapport des murs normaux.

Pour la version de la paille porteuse, malgré son grand épaisseur qui est le plus grand parmi les autres, l'énergie grise consommée et les émission de CO_2 restent inférieures aux autres.

Ci-dessous nous pouvons également comparer l'énergie grise et les émissions de CO_2 des matériaux par m^2 que nous avons utilisé dans notre simulation.

Analyse de cycle de vie de différents matériaux composant de façade





Conclusion

Les valeurs cibles de la société à 2000 watts et la voie SIA vers l'efficacité énergétique sont très ambitieux. L'objectif intermédiaire de la SIA pour l'année 2050 ne peut pas être atteint uniquement en se concentrant sur la réduction de la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre liées à l'exploitation des bâtiments. Dès la conception du bâtiment, il est crucial de penser à la totalité d'énergie nécessaire durant toutes les phases de son cycle de vie. Par conséquent, la SIA oblige tous les constructions immobilières en Suisse de prendre en considération les domaines "construction" et "mobilité" en parallèle de celui "exploitation".

De plus, afin d'atteindre le besoin de chauffage efficace, nous avons tendance à utiliser des matériaux performants et des techniques de constructions compliquées qui augmentent souvent l'énergie liée à la construction du bâtiment. Par conséquent, la réduction de l'énergie grise et les émissions grises de CO_2 jouent un rôle important pour arriver aux valeurs fixées par la société à 2000 watts et la SIA. Nous pouvons même dire que dans un monde idéal, les valeurs liées au domaine "construction" peuvent atteindre une énergie grise zéro et des émissions de CO_2 négatives.

Des mesures supplémentaires doivent être prises en compte pour le choix des matériaux et du mode de construction. Aujourd'hui, des nouvelles alternatives pour des matériaux de construction sont présentées par des architectes et bâtisseurs passionnés. Cependant, il est possible qu'un manque de valorisation de ces nouveaux matériaux chez les différents consommateurs empêche leur développement. Par exemple, en ce qui concerne les maîtres d'ouvrage, ce qui est difficile, est de leur donner la confiance pour qu'ils investissent leur argent dans un nouveau matériau. De plus, beaucoup d'architectes et de concepteurs ne connaissent pas les caractéristiques et la potentielle utilisation de ces matériaux dans la construction et la rénovation des bâtiments. Enfin, dans les secteurs d'entreprises, le manque de savoir-faire de fabrication et la technique de mise en œuvre de ces matériaux innovants freinent leurs développements.

Pour développer les usages des nouveaux matériaux, il est nécessaire de sensibiliser à la fois les professionnels du domaine de la construction, les maîtres d'ouvrage, les maîtres d'œuvre et les entreprises, tout en informant le grand public. En effet, la proposition des matériaux prêts à l'emploi et à des prix raisonnables peut aider considérablement à l'augmentation de l'utilisation de ces derniers.

Aujourd'hui, la question essentielle est de savoir si les matériaux innovants nécessitent d'être industrialisés afin de survire dans notre société actuelle. En effet, avant la révolution industrielle, les matériaux traditionnels et locaux étaient utilisés dans la construction des bâtiments et l'expression architectural de chaque territoire était propre à sa région. A titre d'exemple, le bois dans les pays du nord, et la pierre dans les pays du sud identifiaient l'art de bâtir de ces régions. L'industrialisation des matériaux et le développement de la science a permis l'utilisation de l'acier, le béton, le verre ou encore les matériaux composites, et donc changèrent le langage architectural et la construction contemporaine. Ce changement est plus accentué par le développement des moyens de transport, ce qui implique également une internationalisation des matériaux et les modes de construction, tout en augmentant l'énergie grise liée aux transports.

Notre société contemporaine a tendance à privilégier l'aspect financier face aux enjeux environnementaux. Le travail coûte plus cher que l'énergie, et dans une démarche de rentabilité, il est difficile de penser aux contraintes environnementales. Cependant, il existe quelques solutions qui compensent les mesures environnementales et celui de l'économie. Par exemple, en favorisant le choix d'une entreprise locale, nous garantissons à la fois une utilisation des ressources locales et une importante diminution de la consommation de l'énergie grise lors du transport des matériaux, tout en prenant en considération les aspects financiers en valorisant le marché local.

Par conséquent, en ce qui concerne des matériaux innovants, le développement des entreprises sur le savoir-faire de leur fabrication et leur mise en œuvre peut favoriser une augmentation d'utilisation de ces nouveaux produits. La démarche industrielle peut aider à rendre ces matériaux accessibles au grand public, tout en proposant un prix raisonnable. Ces entreprises peuvent offrir également des études de faisabilité sur les caractéristiques physiques pour ces nouveaux modes de constructions. Enfin, ces démarches peuvent même aider à classer ces nouveaux matériaux par rapport aux normes standards, ce qui faciliteraient leur utilisation dans le marché de la construction.

Aujourd'hui, et plus particulièrement en Suisse, le secteur des matériaux de construction est un secteur bien développé. Une partie de ces matériaux sont issus et produits en Suisse, tandis qu'une grande partie provient de l'étranger, ceci est dû aux critères financiers et au manque de ressources. Il est donc crucial que le critère de durabilité pour ces matériaux soit également pris en considération. Il faut valoriser des matériaux qui consomment moins d'énergie et émettent moins de gaz à effet de serre durant leur cycle

de vie. Comme cela était illustré dans notre étude, chaque matériau peut répondre à un certain nombre d'exigences, en ayant ses propres avantages et inconvénients. L'important est de trouver des solutions architecturales et des techniques constructives qui soient de bons compromis entre la satisfaction des demandes de la société contemporaine et la favorisation des enjeux climatiques.

Bibliographie

[1] J-C. Mengoni, "La construction écologique : matériaux et techniques", Terre vivante, Mens, France, 2011.

[2] J-P. Olivia et S. Courgey, "L'isolation thermique écologique, conception, matériaux, mise en œuvre : neuf et réhabilitation", Terre vivante, Mens, France, 2011.

[3] ETH Zürich, "L'importance de l'énergie grise dans le bilan énergétique global", Conférence Eco-bau, Zürich, 2010.

[4] C. Roth et A. Steiner, "A l'affût de l'énergie grise", Fondation de la Communauté d'intérêts Suisse pour la diminution des déchets et de la Ligue pour la propreté en Suisse, Zürich, 1999.

[5] Plateforme "Données des écobilans dans la construction", KBOB, OFCL, Office fédéral des constructions et de la logistique, Berne, 2016.

[6] S. Citherlet et B. Périsset, "Les impacts environnementaux générés par les bâtiments", Bienne, 2011.

[7] S. Citherlet, "Towards the Holistic Assessment of Building Performance Based on an Integrated Simulation Approach", École polytechnique fédérale de Lausanne, 2001.

[8] R. Altherr et J.-B. Gay, "A low environmental impact anidolic facade", Building and Environment, 2002.

[9] N. Sallé-Hoyet, "Matériaux et architecture durable", Paris, 2013.

[10] T. Herzog, R. Krippner et W. Lang, "Construire des façades", Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2007.

[11] M. Hegger, "Construction et énergie", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2011.

[12] ARGUS Medienbeobachtung, "Habitation", ARGUS der Presse AG, Zurich, 2013.

[13] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "SIA 162/4 Béton de recyclage", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1995.

[14] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "Cahier technique 0164 - Construction : critères d'un développement durable" Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2000.

[15] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "Construction durable - bâtiment", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2004.

[16] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "Cahier technique 0216 - Objectifs de performance énergétique SIA ," Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2008.

[17] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "Cahier technique 2030 - Béton de recyclage", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2010.

[18] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "Cahier technique 2032 - L'énergie grise des bâtiments", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2010.

[19] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "Cahier technique 2040 - La voie SIA vers l'efficacité énergétique", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2011.

[20] Société suisse des ingénieurs et des architectes, "Cahier technique D 0236", Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2011.

[21] ATBA – L'atelier, bureau d'architectes SA, "La construction en bottes de paille, étude de faisabilité," Étude commandée par la ville de Lausanne, Lausanne, 2009.

[22] A. Chaussinand, Analysis and thermal-dynamic behaviour model of an administrative straw bale building "Minergie-ECO" in Lausanne, Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne, 2014.

[23] M. Rauch, "Refined Earth : Construction & Design of Raw earth," München : Institut f. intern. Architektur-Dokg, 2015.

[24] O. Krumm, Le renouveau du pisé dans le bassin genevois : Construction de trois murs trumeaux pour un projet de maisons individuelles contiguës, Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble, France, Grenoble, 2008.

[25] S. Veysseyre, Rapport d'étude encadré par H. Lequay : Comment développer l'usage de la terre crue dans la production architecturale française?, ENSAL, 2009.

[26] STEKO, "une pierre pour construire vos idées", STEKO Holz-Bausysteme AG, Attelwil, 2009.

[27] Lutz architectes Sàrl, "green offices construire autrement," Lutz architectes Sàrl, Givisiez, 2009.

[28] F. Werner et Ernst Basler + Partner AG, "Construire et habiter avec la nature", PAVATEX SA, Fribourg, 2016.

[29] AEE Suisse, "Bois : une matière première renouvelable avec du potentiel", Organisation faîtière de l'économie des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, Berne, 2015.

[30] CRPF, "Technologie du bois", Fogefor du limousin : Formation gestion forestière, 2011.

[31] Office romand de Lignum, "Construction bois - Bâtiments multi-étages", Lignum, Économie suisse du bois, Office romand, Le Mont-sur-Lausanne, 2015.

[32] Office romand de Lignum, "Favoriser le bois suisse lors des appels d'offres", Lignum, Economie suisse du bois, Office romand, Le Mont-sur-Lausanne, 2016.

[33] Office romand de Lignum, "Construction bois - Habitat familial", Lignum, Économie suisse du bois, Office romand, Le Mont-sur-Lausanne, 2016.

[34] P. Meier, R. Gilliéron, D. Ingold, A. Dupraz, "Le bois dans les constructions rurales", Service des améliorations foncières du canton de Vaud (SAF), conjointement avec Lignum,Vaud, 2007.

[35] Office romand de Lignum, "Construction bois - Façades", Lignum, Économie suisse du bois, Office romand, Le Mont-sur-Lausanne, 2012.

[36] Office romand de Lignum, "Le bois, un choix naturel", Lignum, Économie suisse du bois, Office romand, Le Mont-sur-Lausanne.

[37] M. Mooser, L. Mérigeaux, D. Pflug et B. Horsch, "Bois et réhabilitation de l'enveloppe", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2014.

[38] S. B. F. F. Nicolas Serres, "Évaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie", Collection Ecomatériau, Strasbourg, France, 2014.

[39] Service de géologie sols et déchets, "Guide technique des applications recommandées dans le cadre du projet EcomatGE", Genève, 2009.

[40] A. De Herde et A. Ervard, "Le béton et la consutrction durable", Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, Bruxelles, 2010.

Sitographie

[41] ECO46 - Site officiel de la ville de Lausanne, [En ligne]. Disponible: http://www.Lausanne.ch/eco46. [Accès le 2016].

[42] Neues vom Strohballenbau - Strohballenbau, [En ligne]. Disponible: http://www.http://baubiologie.at. [Accès le 2016].

[43] HOK, HOk's straw building cértitifié LEED GOLD, [En ligne]. Disponible: http://www.HOK.com. [Accès le 2016].

[44] Atelier Werner Schmidt, [En ligne]. Disponible: http://www.atelierwernerschmidt.ch. [Accès le 2016].

[45] CRAterre : cultures constructives et développement durable, [En ligne]. Disponible: http://www.craterre.org. [Accès le 2016].

[46] AsTerre : Association nationale des professionnels de la Terre crue, [En ligne]. Disponible: http://www.asterre.org. [Accès le 2016].

[47] Loam Clay Earth : Martin Rauch, [En ligne]. Disponible: http://www.lehmtonerde.at. [Accès le 2016].

[48] Boltshauser Architekten, [En ligne]. Disponible: http://www.boltshauser.info. [Accès le 2016].

[49] Echologis, L'Isle d'Abeau à Lyon, [En ligne]. Disponible: http://www.echologis.com. [Accès le 2016].

[50] Lutz architectes, [En ligne]. Disponible: http://www.lutz-architectes.ch. [Accès le 2016].

[51] LIGNUM – Économie suisse du bois, "Essences de bois", [En ligne]. Disponible: http://www.lignum.ch/fr/technique/materiau_bois/essences/. [Accès le 2016].

[52] BETONSUISSE Marketing A, "Construire en béton", [En ligne]. Disponible: http://www.betonsuisse.ch/dms_files/02270_fr.pdf. [Accès le 2016].

[53] Développement durable au Service des Bâtiments, "Le béton recyclé", [En ligne]. Disponible : http://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/territoire/construction/batiments_publics.pdf. [Accès le 2016].

[54] "Dachtler Partner architectes", [En ligne]. Disponible : http://dachtlerpartner.ch. [Accès le 2016].

[55] "Le label Minergie", [En ligne]. Disponible : www. Minergie.ch. [Accès le 2016].

[56] Adrian Streich Architekten, "Wohnsiedlung Werdwies", [En ligne]. Disponible : http://www.adrianstreich.ch/uploads/tx_astportfolio2/dok_Werdwies.pdf. [Accès le 2016].

[57] "IUCN Conservation Centre", [En ligne]. Disponible : https://www.iucn.org/secretariat/about/iucn-conservation-centre.

[Accès le 2016].

[58] "Swisswoodhouse", [En ligne]. Disponible : http://www.swisswoodhouse.ch. [Accès le 2016].

[59] "baurat architekten", [En ligne]. Disponible : http://bauart.ch. [Accès le 2016].

[60] "Construction Bois Indigène", [En ligne]. Disponible : http://www.boisindigene.ch. [Accès le 2016].

[61] "Bundesamt für Umwelt BAFU", [En ligne]. Disponible : http://www.bafu.admin.ch/publikationen. [Accès le 2016].

[62] "Béton de granulats recyclés", [En ligne]. Disponible : https://www.kbob.admin.ch/dam/kbob/it/dokumente/Publikationen/Nachhaltiges.pdf. [Accès le 2016].

[63] "Edelaar Mosayebi Inderbitzin architekten", [En ligne]. Disponible: http://www.emi-architekten.ch. [Accès le 2016].

[64] "Lütjens padmanabhan architekten", [En ligne]. Disponible: http://www.luetjens-padmanabhan.ch. [Accès le 2016].

[65] Holcime Suisse, "Analyse de cycle de vie de la fourniture de graviers en region vaudoise", Ecointesys, life cycle systems, Parc Scientifique EPFL, Lausanne, 2008.

Annexe 1

Données écobilans des matériaux utilisés dans le chapitre 4.3

KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016 — *Données écobilans dans la construction*

Rohdichte/ Flächen-masse / Masse volumique/ surface	Bezug / Référence	UBP'13 / UBP			Primärenergie / Energie primaire — erneuerbar / renouvelable			Primärenergie / Energie primaire — nicht erneuerbar (Graue Energie) / non renouvelable (énergie grise)			Treibhaus-gasemissionen / Emissions de gaz à effet de serre			MATÉRIAUX [Bibliographie treeze, version 2.2:2016]
		Total / Total	Herstellung / Fabrication	Entsorgung / Elimination	Total / Total	Herstellung / Fabrication	Entsorgung / Elimination	Total / Total	Herstellung / Fabrication	Entsorgung / Elimination	Total / Total	Herstellung / Fabrication	Entsorgung / Elimination	
		UBP	UBP	UBP	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kg CO_2-eq	kg CO_2-eq	kg CO_2-eq	
kg/m³														*Béton*
2'150	kg	65.1	40.2	24.9	0.009	0.007	0.002	0.139	0.092	0.047	0.059	0.050	0.009	*Béton maigre (sans armature)*
2'300	kg	94.3	67.3	27.0	0.013	0.012	0.002	0.201	0.148	0.054	0.099	0.089	0.010	*Béton pour bâtiment (sans armature)*
2'350	kg	99.9	72.9	27.0	0.014	0.013	0.002	0.217	0.164	0.053	0.107	0.096	0.010	*Béton pour travaux de génie civil (sans armature)*
2'325	kg	106	79.0	26.9	0.016	0.014	0.002	0.228	0.175	0.053	0.117	0.107	0.010	*Béton pour pieux (sans armature)*
2'770	kg	477	454	23.8	0.057	0.056	0.002	0.768	0.721	0.047	0.265	0.255	0.009	*Elément préfabriqué en béton, béton à hautes performances, sortie d'usine*
2'500	kg	245	218	26.1	0.096	0.094	0.002	0.484	0.432	0.052	0.172	0.162	0.010	*Elément préfabriqué en béton, béton normal, sortie d'usine*
600	kg	371	370	0.743	0.882	0.882	0.000	0.984	0.982	0.003	0.288	0.288	0.000	*Béton chaux-chanvre*
Betonsortenrechner: Mit dem Betonsortenrechner (http://treeze.ch/de/rechner/betonsortenrechner/) können die Umweltkennwerte von spezifischen Betonen mit verschiedenen Zementtypen und Gesteinskörnungen berechnet werden.														
Calculatrice à béton: la calculatrice (http://treeze.ch/de/rechner/betonsortenrechner/) permet de calculer les données environnementales des différents types de béton fabriqués à partir de ciments et granulats divers.														
kg/m³														*Pierres de taille*
900	kg	217	191	25.8	0.078	0.076	0.002	0.791	0.740	0.051	0.258	0.249	0.009	*Brique en terre cuite*
1'400	kg	157	132	25.1	0.037	0.035	0.002	0.398	0.350	0.048	0.138	0.129	0.009	*Grès*
700	kg	237	212	25.8	0.793	0.791	0.002	0.762	0.712	0.051	0.170	0.161	0.009	*Brique en argile léger*
1'200	kg	471	445	26.6	0.052	0.050	0.002	1.51	1.46	0.053	0.417	0.407	0.010	*Pierre en béton léger: argile expansée*
1'200	kg	222	195	26.6	0.031	0.029	0.002	0.424	0.371	0.053	0.223	0.214	0.010	*Pierre en béton léger: pierre ponce naturelle*
500	kg	348	323	25.8	0.065	0.064	0.002	0.925	0.875	0.051	0.417	0.408	0.009	*Béton cellulaire*
1'700	kg	133	108	25.1	0.024	0.022	0.002	0.254	0.207	0.047	0.129	0.121	0.009	*Plot de ciment*
kg/m³														*Autres matériaux massifs*
2'300	kg	212	187	25.8	0.034	0.033	0.002	0.517	0.466	0.051	0.217	0.208	0.009	*Tuiles en béton*
1'800	kg	751	724	26.6	0.476	0.474	0.002	2.45	2.40	0.053	0.727	0.717	0.010	*Bardeau de fibrociment*
1'800	kg	1'030	1'000	26.6	0.624	0.622	0.002	3.27	3.22	0.053	1.09	1.08	0.010	*Dalle de fibrociment, grande*
1'800	kg	726	700	26.6	0.544	0.543	0.002	2.06	2.01	0.053	0.678	0.669	0.010	*Plaque ondulée en fibrociment*
2'500	kg	1'350	1'340	18.6	0.233	0.232	0.001	4.71	4.65	0.068	1.16	1.15	0.010	*Verre plat, enduit*
2'500	kg	1'140	1'120	18.6	0.130	0.130	0.001	4.06	4.00	0.068	1.10	1.09	0.010	*Verre plat, non enduit*
1'200	kg	488	470	17.5	0.086	0.085	0.001	2.46	2.40	0.065	0.537	0.527	0.009	*Plaque de plâtre armé de fibres*
850	kg	314	296	17.3	0.079	0.078	0.001	1.35	1.28	0.065	0.293	0.284	0.009	*Plaque de plâtre cartonnées*
1'000	kg	343	326	17.2	0.029	0.028	0.001	1.44	1.37	0.064	0.307	0.298	0.009	*Blocs de gypse / plâtre massif*
2'500	kg	75.0	49.9	25.1	0.039	0.037	0.002	0.302	0.254	0.048	0.034	0.025	0.009	*Plaque de grès dur*
2'600	kg	2'460	2'430	25.8	0.234	0.232	0.002	3.81	3.76	0.051	0.777	0.768	0.009	*Dalle de céramique/grés*
2'000	kg	64.9	39.8	25.1	0.007	0.005	0.002	0.084	0.036	0.048	0.013	0.005	0.009	*Gravier concassé*
2'000	kg	61.0	35.9	25.1	0.003	0.001	0.002	0.064	0.017	0.048	0.012	0.003	0.009	*Gravier rond*
2'000	kg	65.7	35.9	29.7	0.003	0.001	0.001	0.081	0.017	0.064	0.014	0.003	0.011	*Sable*
2'000	kg	3'030	3'000	25.8	0.401	0.399	0.002	11.2	11.1	0.051	2.32	2.31	0.009	*Céramique sanitaire*
2'000	kg	39.4	25.2	14.2	0.005	0.004	0.000	0.129	0.075	0.054	0.023	0.016	0.007	*Mur en pisé, terre extraite sur chantier*
1'700	kg	300	274	25.8	0.034	0.032	0.002	1.12	1.07	0.051	0.375	0.366	0.009	*Tuile en terre cuite*
kg/m³														*Mortiers et enduits*
1'400	kg	427	410	17.2	0.166	0.166	0.001	1.60	1.54	0.064	0.406	0.397	0.009	*Colle de construction/mortier d'enrobage minéral(e)*
1'100	kg	424	407	17.2	0.146	0.146	0.001	1.69	1.62	0.064	0.427	0.418	0.009	*Colle de construction/mortier d'enrobage minéral(e) avec agrégats légers*
1'670	kg	1'000	982	17.2	0.146	0.145	0.001	4.20	4.14	0.064	0.758	0.749	0.009	*Colle de construction/mortier d'enrobage biologique*
925	kg	151	134	17.2	0.064	0.063	0.001	0.686	0.622	0.064	0.155	0.145	0.009	*Enduit en plâtre et chaux*
1'100	kg	146	129	17.2	0.062	0.061	0.001	0.692	0.628	0.064	0.147	0.138	0.009	*Enduit minéral*
1'540	kg	1'230	1'210	17.2	0.227	0.227	0.001	5.25	5.19	0.064	0.951	0.942	0.009	*Crépi synthétique (enduit de dispersion)*
1'550	kg	237	220	17.2	0.130	0.130	0.001	0.765	0.701	0.064	0.247	0.238	0.009	*Enduit en plâtre et en ciment*
1'800	kg	62.3	43.0	19.3	0.016	0.014	0.002	0.164	0.134	0.031	0.023	0.018	0.005	*Enduit de glaise*
1'000	kg	366	348	17.2	0.154	0.154	0.001	1.30	1.23	0.064	0.366	0.357	0.009	*Enduit de glaise minéral*
1'880	kg	1'220	1'200	17.2	0.249	0.248	0.001	5.11	5.04	0.064	0.975	0.966	0.009	*Crépi silicaté (silicate de dispersion)*
1'670	kg	1'410	1'390	17.2	0.370	0.370	0.001	6.17	6.10	0.064	1.12	1.11	0.009	*Crépi à la résine de silicone*
1'350	kg	442	425	17.2	0.113	0.112	0.001	1.80	1.74	0.064	0.469	0.460	0.009	*Enduit à la chaux grasse*
2'000	kg	146	128	18.5	0.025	0.025	0.001	0.458	0.389	0.069	0.087	0.077	0.010	*Chape d'anhydrite, 60 mm*
1'850	kg	140	122	17.2	0.031	0.031	0.001	0.281	0.217	0.064	0.125	0.116	0.009	*Chape de ciment, 85 mm*
250	kg	613	596	17.2	0.135	0.135	0.001	1.96	1.89	0.064	0.767	0.758	0.009	*Enduit d'isolation thermique EPS*
1'550	kg	301	284	17.2	0.136	0.135	0.001	1.00	0.938	0.064	0.328	0.319	0.009	*Crépit en ciment*
1'550	kg	255	238	17.2	0.122	0.121	0.001	0.728	0.664	0.064	0.269	0.260	0.009	*Enduit de ciment*
kg/m³														*Bois et produits en bois*
470	kg	1'360	1'280	79.7	9.57	9.57	0.001	2.99	2.94	0.053	0.523	0.412	0.111	*Panneau de bois massif 3 couches, colle PVAc*
470	kg	1'040	953	86.9	8.70	8.70	0.001	2.45	2.39	0.058	0.485	0.365	0.121	*Bois lamellé-collé, colle MF, zone humide*
470	kg	995	908	86.9	8.70	8.70	0.001	2.24	2.18	0.058	0.446	0.326	0.121	*Bois lamellé-collé, colle UF, zone sèche*
955	kg	1'310	1'220	91.1	7.03	7.03	0.001	4.20	4.14	0.061	1.16	1.04	0.126	*Panneau de particules dur*
400	kg	561	508	52.8	2.02	2.02	0.001	1.34	1.26	0.077	0.554	0.537	0.017	*Panneau de bois léger à paille de bois liée par du ciment*
675	kg	420	393	27.0	6.32	6.32	0.001	0.685	0.651	0.034	0.126	0.116	0.010	*Bois massif hêtre / chêne, séché en cellule, raboté*
675	kg	379	352	27.0	6.22	6.22	0.001	0.578	0.544	0.034	0.109	0.099	0.010	*Bois massif hêtre, chêne, séché en cellule, brut*
705	kg	311	286	24.7	5.39	5.39	0.001	0.475	0.443	0.031	0.093	0.084	0.009	*Bois massif hêtre / chêne, séché à l'air, brut*
465	kg	502	475	27.0	6.66	6.66	0.001	0.812	0.778	0.034	0.143	0.133	0.010	*Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché en cellule, raboté*
485	kg	424	399	24.7	5.78	5.78	0.001	0.690	0.659	0.031	0.125	0.116	0.009	*Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, raboté*
485	kg	347	322	24.7	5.51	5.51	0.001	0.504	0.473	0.031	0.101	0.091	0.009	*Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, brut*
685	kg	1'170	1'080	91.1	5.85	5.85	0.001	4.88	4.82	0.061	1.04	0.910	0.126	*Panneau de fibres à densité moyenne (MDF), colle UF*
605	kg	883	792	91.4	8.24	8.24	0.001	2.76	2.70	0.061	0.614	0.487	0.127	*Panneau d'agglomérés type OSB, colle PF, zone humide*
640	kg	746	654	91.4	4.36	4.36	0.001	2.97	2.91	0.061	0.646	0.519	0.127	*Panneau de particules, colle PF, zone humide*
640	kg	967	876	91.4	4.68	4.68	0.001	4.19	4.13	0.061	0.845	0.718	0.127	*Panneau de particules, colle UF, enduit, zone sèche*
640	kg	746	654	91.4	4.36	4.36	0.001	2.97	2.91	0.061	0.646	0.519	0.127	*Panneau de particules, colle UF, zone sèche*
500	kg	2'180	2'100	79.7	10.3	10.2	0.001	7.28	7.23	0.053	1.46	1.35	0.111	*Bois lamellé / multiplex, colle PF, zone humide*
500	kg	1'860	1'780	79.7	10.2	10.2	0.001	5.94	5.88	0.053	1.17	1.06	0.111	*Bois lamellé / multiplex, colle UF, zone sèche*
kg/m³														*Produits d'isolation thermique*
150	kg	45'400	45'200	191	13.7	13.7	0.002	231	231	0.127	48.7	48.4	0.303	*Fibres d'aérogel*
65-140	kg	950	920	29.8	0.173	0.172	0.001	4.53	4.47	0.068	1.01	1.00	0.010	*Perlite expansée*
65-140	kg	589	563	25.8	0.054	0.052	0.002	1.85	1.80	0.051	0.437	0.428	0.009	*Vermiculite expansée*
30	kg	1'630	1'480	144	6.05	6.05	0.001	5.20	5.14	0.060	0.990	0.768	0.222	*Isolation lin*
30	kg	2'020	1'870	144	5.55	5.55	0.001	7.38	7.32	0.060	1.42	1.20	0.222	*Isolation lin, résistant au feu*
20-100	kg	1'690	1'660	29.8	2.19	2.19	0.001	7.75	7.68	0.068	1.13	1.12	0.010	*Laine de verre*
120	kg	1'690	1'530	159	7.68	7.68	0.002	6.65	6.54	0.106	1.34	1.12	0.221	*Panneau en liège*
40	kg	6'490	5'310	1'180	0.707	0.620	0.086	34.6	33.6	1.03	6.23	4.19	2.04	*Résine phénolique (PF)*
15-40	kg	5'180	3'610	1'570	0.360	0.358	0.002	29.8	29.7	0.133	7.64	4.46	3.19	*Polystyrène expansé (EPS)*
30-35	kg	10'800	9'240	1'570	0.507	0.505	0.002	29.1	28.9	0.133	14.5	11.3	3.19	*Polystyrène extrudé (XPS)*
30	kg	6'630	5'110	1'510	0.806	0.796	0.010	30.2	29.6	0.642	7.52	4.80	2.72	*Polyuréthane (PUR/PIR)*
100-165	kg	1'040	1'020	18.6	1.89	1.89	0.001	5.32	5.26	0.068	1.17	1.16	0.010	*Verre cellulaire*
125-150	kg	323	309	14.2	0.261	0.260	0.000	1.74	1.69	0.054	0.155	0.148	0.007	*Gravier de verre cellulaire*
32-160	kg	1'140	1'110	29.8	0.339	0.338	0.001	4.33	4.27	0.068	1.13	1.12	0.010	*Laine de roche*
215	kg	562	562	0	4.79	4.79	0	0.228	0.228	0	0.090	0.090	0	*Mur en botte de paille*
148	kg	860	816	43.6	7.04	7.03	0.001	3.53	3.49	0.041	0.665	0.624	0.041	*Panneau de fibres mou*
35-60	kg	418	332	86.2	0.242	0.240	0.002	1.03	0.931	0.102	0.257	0.216	0.041	*Fibres de cellulose (soufflées)*

"Sois le changement que tu veux voir dans le monde!"

Mahatma Gandhi

ÉNONCÉ THÉORIQUE EPFL

Architecture 2016-2017