

**LE MUR A HAUTE PERFORMANCE THERMIQUE**  
**Evolution et perspectives de la façade porteuse**  
**en béton préfabriqué à Genève dès 1973**

THÈSE N° 5401 (2012)

PRÉSENTÉE LE 28 SEPTEMBRE 2012

À LA FACULTÉ DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT  
LABORATOIRE D'ARCHITECTURE URBAINE  
PROGRAMME DOCTORAL EN ARCHITECTURE ET SCIENCES DE LA VILLE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Thierry VOELLINGER**

acceptée sur proposition du jury:

Prof. R. Gargiani, président du jury  
Prof. A. Bassi, directeur de thèse  
Dr F. Flourentzou, rapporteur  
Prof. F. Graf, rapporteur  
Dr H. Simmler, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse  
2012





# **LE MUR A HAUTE PERFORMANCE THERMIQUE**

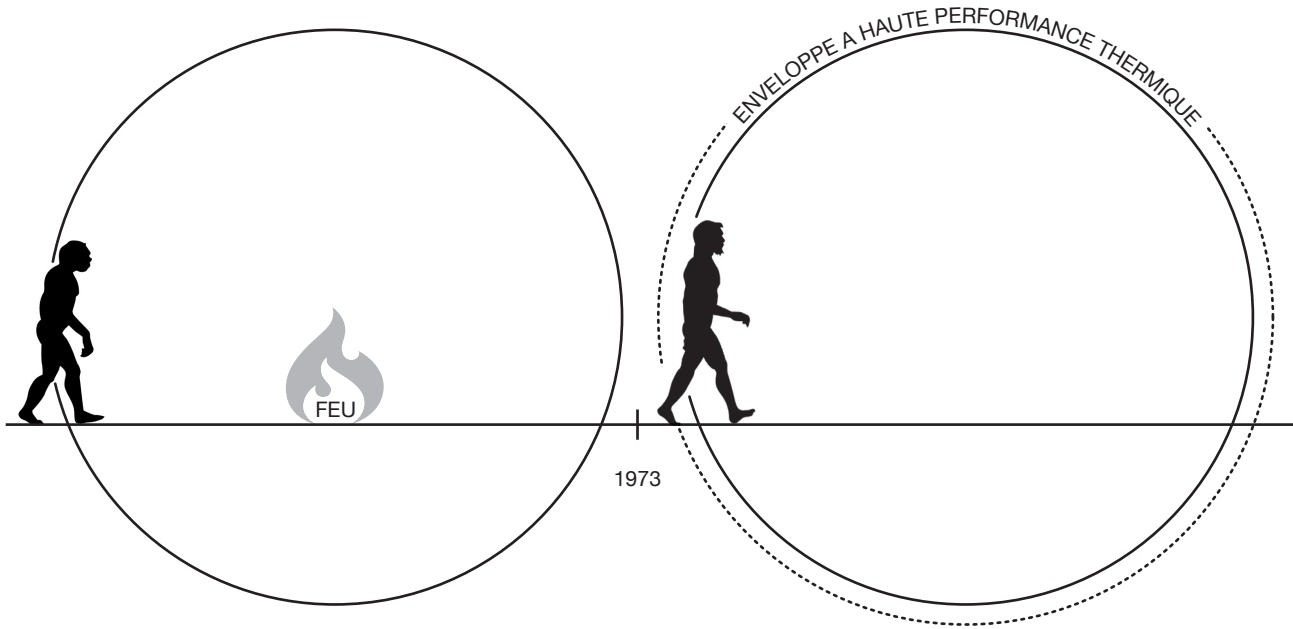
## **EVOLUTION ET PERSPECTIVES DE LA FAÇADE PORTEUSE EN BETON PREFABRIQUE A GENEVE DES 1973**

THESE N°5401 (2012)  
PRESENTEE LE 31 MAI 2012

A LA FACULTE DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT  
LABORATOIRE D'ARCHITECTURE URBAINE ET REFLEXION ENERGETIQUE  
PROGRAMME DOCTORAL EN ARCHITECTURE ET SCIENCES DE LA VILLE  
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES  
PAR THIERRY VOELLINGER

PROF. R. GARGIANI, PRESIDENT DU JURY  
PROF. A. BASSI, DIRECTEUR DE THESE  
PROF. F. GRAF, RAPPORTEUR  
DR. H. SIMMLER, RAPPORTEUR  
DR. F. FLOURENTZOU, RAPPORTEUR





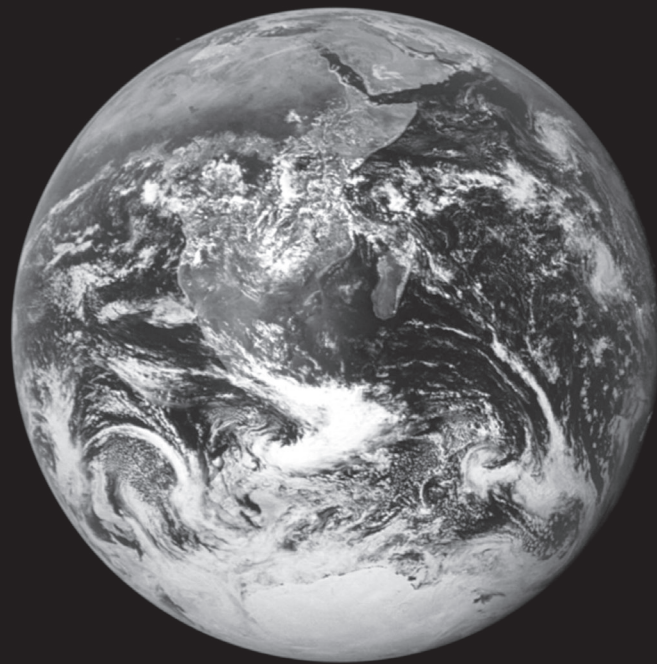
# AVANT-PROPOS

Ces quarante dernières années, le savoir en architecture s'est enrichi de manière importante et positive. L'architecture a gagné, en plus de ses vertus esthétiques, une dimension scientifique. Aujourd'hui, en pleine crise des ressources fossiles, c'est sa dimension scientifique qui est mise à l'épreuve.

## **Comment va-t-on modifier et améliorer l'architecture pour répondre à la nouvelle situation énergétique qui est annoncée et quelle sera son rôle dans l'avenir?**

Je crois qu'elle a une importance vitale pour l'homme et qu'il faut l'approcher, la comprendre et l'appliquer en pleine conscience. Ce que je veux transmettre aux architectes est l'importance de leur responsabilité aujourd'hui face aux enjeux de la construction et d'une société liée plus intimement à son environnement. Mon propos se base sur le constat d'un changement de paradigme qui a eu lieu au début des années 70 et qui a entraîné l'architecture vers de nouvelles considérations dans le domaine de la physique du bâtiment. Ce développement nous pousse à réformer notre architecture afin de l'adapter aux nouvelles exigences thermiques maintenant reconnues.

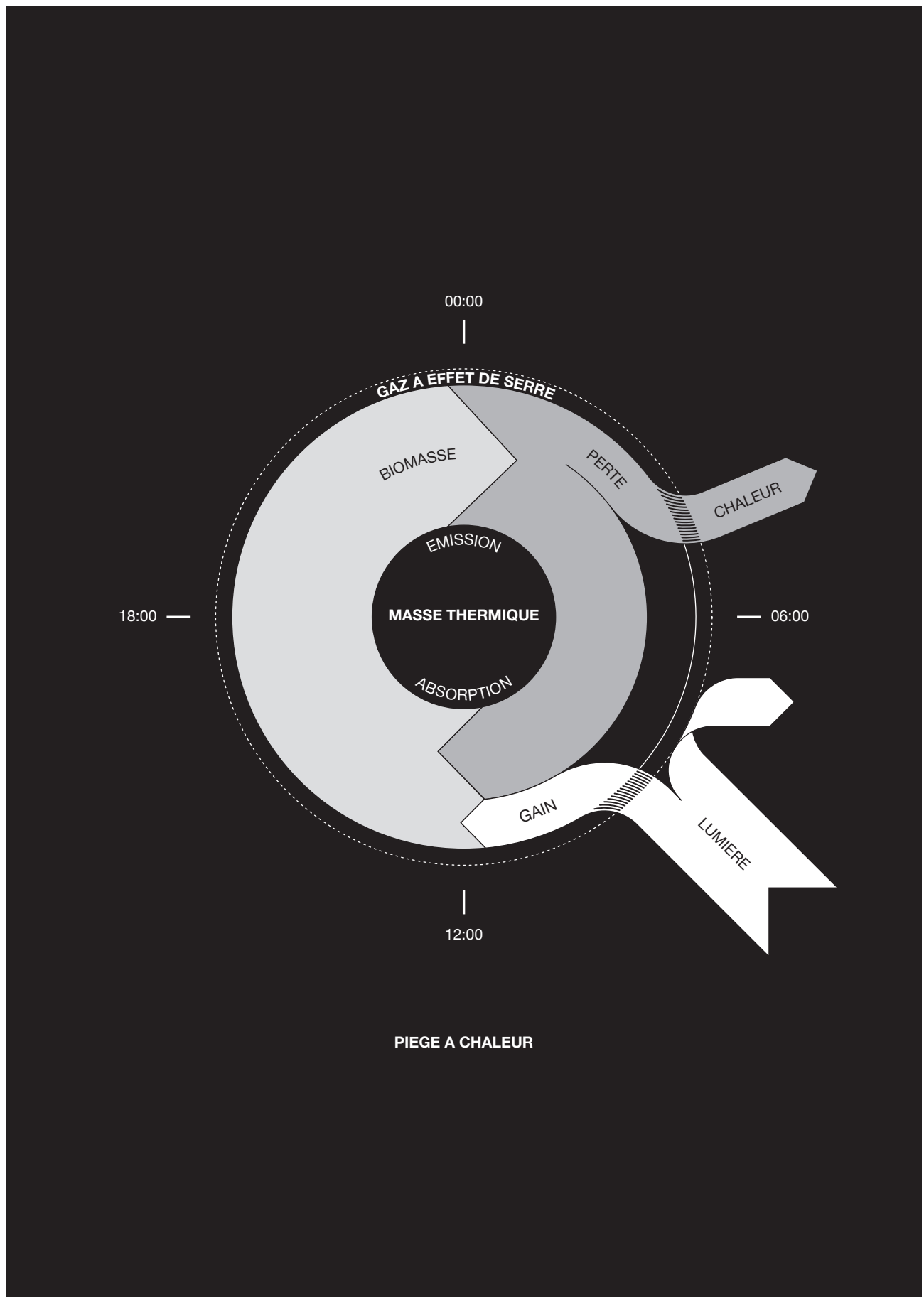
**Le mur porteur en béton préfabriqué à haute performance thermique à Genève** est le cas que j'ai étudié et optimisé. Ce travail a été avant tout pratique et destiné à une production industrielle. Cette recherche m'a incité à étendre ma thèse au-delà de la solution pratique et de trouver les raisons d'être au mur à haute performance thermique afin de légitimer son importance primordiale pour le futur.



NOUVEAU PARADIGME

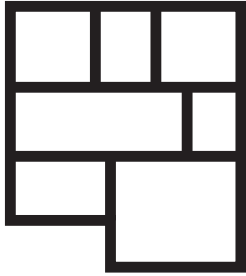
**Blue Marble**

La Terre en vue intégrale, prise par Harrison Schmitt au cours du dernier vol habité vers la Lune, Apollo 17, décembre 1972

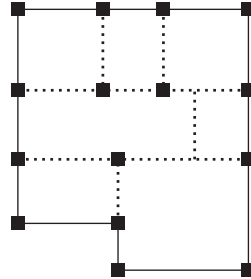
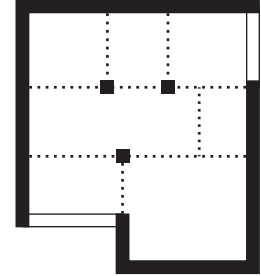


**Coupe sur l'équateur**

Principe du système thermique de la Terre représenté dans un diagramme en thermique graphique (*Sankey*).



-10'000

XX<sup>E</sup> SIECLE

DES 1973

MURAL

OSSATURE (ACIER/BETON)

ENVELOPPE A HAUTE  
PERF. THERMIQUE

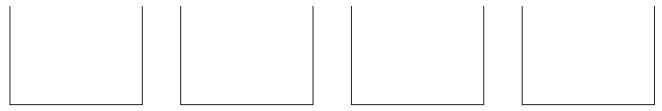
COMPARTIMENT

DECLOISONNEMENT

FOYER DE CHAUFFE

CHAUFFAGE CENTRAL ET  
AIR CONDITIONNE

PIEGE A CHALEUR



# **LE PIEGE A CHALEUR: UNE REFORME EN ARCHITECTURE**

# REMERCIEMENTS

Je remercie

Le Professeur Andrea Bassi pour son anticipation, son soutien et sa bienveillance quant à mon travail de recherche. Les objectifs pratiques étaient de réaliser un produit pour l'industrie et les objectifs théoriques étaient de mener un enseignement en troisième année d'architecture. Dans les deux cas, ces expériences ont eu un succès.

Pierre-Alain L'Hôte, directeur de Prelco, pour son habileté à embrasser les questions du futur dans le domaine de la préfabrication et de l'architecture. Il m'a donné carte blanche pour mener la recherche sous forme collective et individuelle dans son entreprise où j'ai eu la chance et le plaisir de travailler avec toute son équipe.

Paul L'Hôte, ancien directeur de Prelco pour ses récits et ses témoignages passionnants de la période de la Postmodernité.

George Fontana de Swisspor pour avoir soutenu notre orientation vers des isolants minces à haute performance thermique.

L'équipe des physiciens du bâtiment d'Estia, pour les débats sur la philosophie de la construction, basée sur un raisonnement physique et logique.

Toute l'équipe du laboratoire LAURE qui, à travers l'enseignement, a accompagné ma recherche tout au long de ces années. Les multiples discussions avec les collaborateurs du laboratoire et les étudiants ont été riches, importantes et fructueuses.

Les ingénieurs civils Damien Dreier et Roberto Guidotti pour les échanges sur l'enjeu de la statique dans la construction.

Le graphiste Emy Amstein, pour son regard analytique sur toutes les formes de représentations graphiques, tant architecturales que paradigmatiques.

Le photographe Leo Fabrizio pour nos entretiens et visites *in situ* qui ont affiné mon regard sur une esthétique essentielle et irréductible.

# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1. Abstract/Résumé . . . . . | 14 |
| 2. Introduction . . . . .    | 16 |
| 3. Littérature . . . . .     | 18 |

## MATIERE METHODE

|  |    |
|--|----|
| 1. Temporalité . . . . .               | 23 |
| 2. Le point de non-retour . . . . .    | 25 |
| 3. Réforme énergétique . . . . .       | 27 |
| 4. Problématique . . . . .             | 29 |
| 5. Préfabrication en béton . . . . .   | 31 |
| 6. Mur sandwich . . . . .              | 33 |
| 7. La méthode . . . . .                | 37 |
| 8. Application de la méthode . . . . . | 39 |

## DISCUSSION

|   |    |
|---|----|
| 1. Du besoin à l'artifice . . . . .               | 43 |
| 2. Le <i>piège à chaleur</i> naturel . . . . .    | 45 |
| 3. Le <i>piège à chaleur</i> artificiel . . . . . | 47 |
| 4. Le <i>piège à chaleur</i> défectueux . . . . . | 49 |
| 5. Récapitulation . . . . .                       | 51 |

## RESULTATS

### STATIQUE

|  |    |
|--|----|
| 1. L'ossature . . . . .                                      | 55 |
| 2. Nouvelle typologie de façade . . . . .                    | 57 |
| 3. Les éléments préfabriqués et porteurs de façade . . . . . | 59 |
| 4. Les cycles d'orientation à Genève . . . . .               | 61 |
| 5. Développement des panneaux porteurs thermiques . . . . .  | 63 |
| 6. Structure et façade . . . . .                             | 65 |
| 7. Calepinage . . . . .                                      | 69 |
| 8. Optimisation des panneaux et conclusion . . . . .         | 71 |

### MATERIALITE

|   |    |
|---|----|
| 9. Métamorphose de la matérialité et conclusion . . . . . | 74 |
|---|----|

### THERMIQUE

|  |     |
|--|-----|
| 10. L'épaisseur du mur . . . . .               | 81  |
| 11. Isolants . . . . .                         | 83  |
| 12. Répercussion sur la construction . . . . . | 87  |
| 13. Procédé d'analyse . . . . .                | 91  |
| 14. Recherche de l'optimum . . . . .           | 93  |
| 15. Un cas en préfabrication . . . . .         | 95  |
| 16. Détermination des essais . . . . .         | 99  |
| 17. Projet pilote . . . . .                    | 103 |
| 18. Les détails et conclusion . . . . .        | 107 |

## CONCLUSION

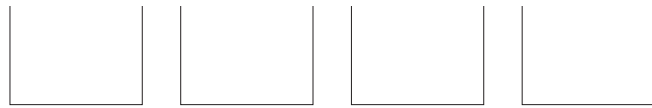
|                      |     |
|----------------------|-----|
| Conclusion . . . . . | 115 |
|----------------------|-----|

### ANNEXES

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| BIBLIOGRAPHIE . . . . . | 136 |
| GLOSSAIRE . . . . .     | 140 |
| CV . . . . .            | 143 |







# INTRODUCTION

# ABSTRACT

The scope of this research includes the development of composite concrete façade elements that are thin, loadbearing and of high thermal performance. The research applies to manufactured precast concrete elements and focuses on improving their structure in terms of their construction but also their cost and environmental impact. During the last four decades, society's energy efficiency awareness has been steadily growing in everyday life and in scientific circles. The Swiss Federal Institutes of Technology are promoting a plan known as the *2000 Watt Society (Société à 2000 Watts)* which would reduce the energy consumption of the country's inhabitants. In the context of Swiss construction, Minergie type labels are a requirement ensuring improved living conditions at lower energy consumption levels. These new ambitions increase the thermal requirements which in turn lead to the inevitable thickening of the building envelope. In a Swiss urban context, such as the Geneva region in particular, land is increasingly rare and the price of leasable surface continues to rise. As a result, the materials commonly used for insulation are economical but bulky; they increase the thickness of the façades and significantly reduce the usable surface available for buildings. In an urban context such as this, what is the suitable dimension and fair price of a wall?

The method used was to analyze the strategies that would result in the correct dimensions of high thermal performance walls. Diminishing their width increases the area of livable surface while maintaining the wall's thermal, static and sustainable standards. The objective was to establish a process for determining the composition of products that carry the Minergie-P and Minergie-Eco label. To this end, several tests and a pilot project for an individual house were carried out using optimum high thermal performance precast concrete walls as a model. The test demonstrated the feasibility of this type of wall. The innovation was to place between the two layers of concrete, a high thermal performance *Vacuum Insulated Panel (VIP)* type material and a traditional one. This combination allowed optimizing the thickness of the wall while responding to construction constraints. The proportion of the combination of insulation materials was selected according to their thermal performance, environmental impact and price. The goal was to maintain a constant thickness from the stages of project design to its completion. The argument of this dissertation is based on the conviction and the importance to commit to the use of high thermal performance construction materials overall in the future. At present, in the midst of a fossil fuel crisis, this is no longer just an individual concern. Indeed, the scarcity of fossil fuels and global warming are vital and critical problems that can be solved by using appropriate architecture solutions such as *heat traps*.

*Key words: façade, loadbearing wall, precast concrete sandwich panels, high thermal performance wall, Vacuum Insulated Panels (VIP) passive housing, heat engine*

# RESUME

Le champ de cette recherche comprend le développement d'éléments de façade en béton composites, porteurs, minces et à hautes performances thermiques. Il s'applique à des éléments en béton préfabriqué en usine et se concentre sur l'optimisation de leur structure tant constructive, qu'économique et environnementale. Au cours des quatre dernières décennies, la conscience énergétique n'a cessé de croître dans la vie quotidienne et scientifique de nos sociétés. Les Ecoles Polytechniques Fédérales suisses promeuvent un projet de réduction de la consommation d'énergie par habitant, appelée *Société à 2000 Watts*. Dans le cadre de la construction suisse, des labels de type Minergie s'imposent et certifient une meilleure qualité de vie à faible consommation d'énergie. Ces nouvelles aspirations accroissent les exigences thermiques qui se répercutent sur l'épaississement inévitable de l'enveloppe isolante du bâtiment. Dans les contextes urbains suisses, notamment la région de Genève, les terrains se font de plus en plus rares et les valeurs des surfaces locatives ne font qu'augmenter. Or, les isolants utilisés habituellement sont économiques mais volumineux ; ils augmentent les épaisseurs des murs de façade et engendrent des diminutions conséquentes des surfaces exploitables des bâtiments. Quelles sont les dimensions et quel est le juste prix pour un mur dans nos contextes urbains ?

La méthode mise en place est un moyen d'analyse qui tente d'établir des stratégies afin de ramener le mur à haute performance thermique à sa bonne mesure. Sa réduction permet d'augmenter les surfaces habitables tout en conservant ses valeurs thermiques, statiques et durables. L'objectif a été de mettre en place un procédé afin de définir la composition de produits répondant aux qualités Minergie-P et Minergie-Eco. Des essais et un projet pilote de villa individuelle ont été réalisés selon le modèle de murs en béton préfabriqué à haute performance thermique optimisé. Cette expérience a démontré la faisabilité de ce type de mur. La nouveauté a été d'associer, entre les deux couches de béton, un isolant à haute performance thermique de type *Vacuum Insulated Panel* (VIP) et un isolant traditionnel. Cette composition donne la liberté d'optimiser l'épaisseur du mur en rapport avec les contraintes constructives. La proportion du mélange entre les isolants est choisie en fonction de la performance thermique, de son impact sur l'environnement et de son prix. Le but est de conserver une épaisseur constante à partir de la conception du projet jusqu'à sa réalisation. La discussion de cette thèse se rapporte à la conviction et l'importance dans le futur de s'engager et d'appliquer la construction de haute performance thermique de manière globale. Aujourd'hui, au centre de la crise des ressources fossiles, cette préoccupation n'est plus une question individuelle. Leur raréfaction et le réchauffement climatique sont des problèmes essentiels et vitaux qui peuvent être résolus grâce à une architecture appropriée telle que celle des *pièges à chaleur*.

Mots clés : *mur de façade, mur porteur, mur sandwich en béton préfabriqué, mur à haute performance thermique, Vacuum Insulated Panels (VIP), Habitat passif, Machine thermique*

# INTRODUCTION

En 1973, le visage intégral du globe terrestre est enfin révélé (p. 6). L'habitat de l'homme est découvert et reconnu comme un grand système thermique complexe (p. 7). Quelques mois plus tard, la culture et l'économie de la société occidentale connaissent un bouleversement historique avec le choc pétrolier. Dans les Arts et l'architecture, une réaction critique s'installe. Une conscience écologique et environnementale voient le jour. Dans la construction, on observe un changement spontané, une mutation irréversible. L'introduction de l'isolation, comme une fourrure autour des objets architecturaux, garantit la conservation de la chaleur à l'intérieur de l'espace habitable. Si la modernité a été marquée par la rationalisation de la construction, alors la période qui succède 1973 est marquée par la rationalisation de la thermique.

Ce travail de recherche propose des arguments pour optimiser des murs porteurs en béton préfabriqué à hautes performances thermiques. J'ai déterminé des critères dans le domaine architectural et constructif. Les optimisations architecturales s'adressent aux architectes et sont liées à une logique statique et spatiale. Les optimisations constructives s'adressent à une production industrielle et répondent aux enjeux thermiques, économiques et écologiques. Ces arguments expliquent la pertinence et l'importance du développement de la haute performance pour le futur.

J'ai constaté, durant mes années de recherche et d'enseignement, que les architectes recherchent de produits innovants en pensant que ceux-ci vont pouvoir transformer le présent. Ce ne sont pas les produits qui vont être à la base de ce changement, mais l'attitude de l'architecte envers les problèmes du futur. L'intérêt de cette recherche est de donner une réponse à une anticipation de l'industrie face à de nouvelles contraintes. Ces industriels se soucient de leur avenir et s'y préparent. **Comment conserver un savoir-faire, rester compétent dans tous les domaines et répondre aux nouvelles exigences ?** Ce ne sont pas uniquement des problèmes liés à l'industrie mais des questions qui devraient nous concerner tous. Comment allons nous surmonter cette période de crise où les ressources fossiles s'épuisent et une nouvelle orientation est nécessaire ? Les solutions techniques offrent des moyens pour progresser dans un domaine précis mais elles ont une durée de vie limitée. Elles doivent constamment être adaptées et réajustées. Il n'existe donc pas de solution technique idéale pour le futur. Au contraire, des milliers de solutions différentes ont chacune un sens dans leur contexte particulier. Du point de vue thermique, les nouvelles conditions climatiques toujours changeantes réclameront des nouvelles performances, car contrairement à la statique, la thermique est en oscillation perpétuelle.

Le principe fondamental auquel nous devons croire à nouveau est celui du progrès. Pour les architectes croire au progrès, c'est considérer que nous pouvons et devons faire un effort pour contourner les problèmes qui s'annoncent pour le futur grâce à notre outil, l'architecture. Cette démarche

demande aussi un autre effort, celui de comprendre que l'architecture est en mutation. Nous devons aujourd'hui accepter les matières que nous ne voyons pas, les isolants. Celles-ci sont cachées mais elles sont indispensables. Ce sont des nouvelles matières de construction. L'histoire et la théorie de l'architecture les négligent encore. L'acceptation de ces matières est incontournable, car elles seules peuvent répondre au handicap élémentaire de notre espèce, le confort thermique. En effet, ce besoin est une nécessité qui nous différencie de la plupart des autres homéothermes<sup>1</sup> sur le globe. Nous ne théorisons toujours pas l'usage de l'isolation, même si nous savons en pratique qu'elle est inévitable.

Les ingénieurs du XXI<sup>e</sup> s. sont les physiciens du bâtiment. Depuis 1973, leur rôle devient primordial dans la conception de la façade. A partir de cette période, la qualité thermique de la façade se distingue de la question statique. Les débats actuels sur la façade se manifestent en deux tendances : la façade construite d'un mur composé et celle réalisée en mur monocouche. Dans le premier cas, les exigences physiques tant statiques que thermiques sont traitées distinctement, dans le deuxième cas, elles répondent ensemble aux lois d'un seul matériau. En réalité, cette deuxième tendance à sa raison d'être dans un seul cas particulier, celui où la température moyenne climatique est de 18°C. Il correspond au besoin du confort thermique de l'homme et satisfait sa neutralité thermique recherchée. C'est uniquement dans cette situation que le mur monocouche présente les mêmes caractéristiques physiques qu'un mur composé. Le mur monocouche ne donne plus sens depuis l'introduction des isolants. Les murs performants sont ceux qui répondent aux deux exigences physiques séparément.

Aujourd'hui l'enjeu de la thermique n'est plus une question de réduction des pertes thermiques afin de faire des économies financières, mais le fait que dans l'avenir il ne sera plus possible d'utiliser des ressources fossiles. C'est donc un changement de paradigme dans lequel il faut perfectionner encore ce qui est performant et changer de source énergétique en abandonnant le feu pour le soleil. Il faut aller au-delà de l'intérêt économique et tendre vers un intérêt écologique. Construire des *pièges à chaleur* devrait devenir la nouvelle vocation de l'architecture. C'est un changement car jusqu'à présent, l'architecture se construisait autour du feu, le corps chauffant. Les modèles du futur, telles que les "habitations passives" existent déjà depuis une trentaine d'années. L'effort à faire aujourd'hui est de comprendre et d'accepter ces modèles comme étant la seule alternative. La responsabilité des architectes est de concevoir une architecture qui va dans le sens de l'avenir. Cette démarche s'applique pour toutes les techniques de construction confondues et susceptibles d'être choisies pour atteindre un tel objectif. Ma recherche s'est orientée vers un produit répondant aux questions architecturales, constructives, économiques et écologiques : le panneau sandwich en béton préfabriqué à haute performance thermique.

<sup>1</sup> Se dit d'un animal dont la température centrale est constante, Larousse 2008

# LITTERATURE

Cette thèse puise ses sources littéraires dans un éventail riche et varié couvrant plusieurs domaines : architecture moderne, philosophie des sciences, histoire de la préfabrication et sa documentation technique, ouvrages d'architecture et débats sur l'écologie.

Dans "Histoire de l'architecture moderne, Structure et revêtement"<sup>1</sup>, G. Fanelli et R. Gargiani soutiennent que la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> s. a été un tournant dans l'histoire de l'architecture. Dans leur avant propos, ils écrivent : "Les nouveaux matériaux, fer et béton armé, ont permis d'affranchir de la longue tradition de continuité de la maçonnerie, [...]" L'explication de l'origine de l'architecture moderne semble être liée à la découverte de nouvelles matières de construction. Leur écrit traite de constructions représentatives allant jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> s., mais aucune attention n'est accordée à la découverte des matières cachées, les isolants. En effet, ces matières sont intégrées systématiquement dans l'architecture depuis 1973 et réclament la continuité de l'enveloppe. La matière des isolants est reconnue clairement dans la littérature architecturale du manuel de construction de A. Deplazes<sup>2</sup>. Les isolants, très différents les uns des autres, dépendent d'une production particulière dont les informations sont diffusées de manière limitée par les industriels. Lorsqu'il s'agit d'isolants ultra-performants tel que le *Vacuum Insulated Panel* (VIP), la documentation de référence se trouve essentiellement dans les rapports scientifiques établis par l'EMPA, sous la direction entre autre de H. Simmler. Dans l'histoire de la science, le philosophe des sciences T. S. Kuhn observe les grands changements et définit en 1962 dans son livre "La structure des révolutions scientifiques"<sup>3</sup>, une structure qui permet de les expliquer. Ce principe peut être appliqué à tous les domaines scientifiques. Le tournant historique dont parlent G. Fanelli et R. Gargiani dans leur livre sur l'architecture moderne peut aussi s'expliquer par le modèle que propose T. S. Kuhn.

Les prémisses de la véritable préfabrication en béton à Genève sont représentées par le "système HA" (Honegger Afrique) des Frères Honegger, ingénieurs et entrepreneurs. Ce système a duré une dizaine d'années et a été appliqué à de nombreuses constructions de bureaux et de logements. Dans le livre "Honegger Frères"<sup>4</sup>, Y. Delemontey, sous la direction de F. Graf, écrit sur le déclin du "système HA" la chose suivante : "[...] En effet, alors que le "système HA" est fondé sur le recours à un grand nombre de petits éléments, il se trouve pour la première fois en inadéquation avec un cadre de production industrialisé dans lequel l'évolution rapide des moyens de levage et de manutention privilégie au contraire l'augmentation de la taille des composants et leur réduction à un minimum de types". A partir de 1965, la préfabrication connaît un changement fondamental dans son mode de faire valable encore aujourd'hui. Un grand nombre d'objets seront construits sur ces nouveaux principes en Suisse romande et en particulier à Genève.

1 G. Fanelli et R. Gargiani, *Histoire de l'architecture moderne Structure et revêtement*, PPUR, Lausanne 2008, p. 7

2 A. Deplazes, *Architektur konstruieren*, Birkhäuser, Basel 2004

3 T. S. Kuhn, *The structure of scientific revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago 1962

4 F. Graf, C. Bischoff, Y. Delemontey, P. Grandvoinet, *Honegger Frères, de la production au patrimoine*, Infolio, Genève 2010, p. 164

Cette évolution est due à l'introduction, dans le domaine de la construction, de machines plus puissantes qui ont remplacé les nombreuses opérations manuelles. La machine réclame des nouvelles règles. Il existe une littérature exhaustive sur les procédés de préfabrication qui succéderont au "système HA". En 1973, le choc pétrolier marquera un nouveau changement dans cette production et de cette architecture. La littérature sur ces techniques va disparaître. La spécialisation et la fragmentation de l'industrie de la préfabrication provoquent une introversion du savoir technique dans les entreprises. Le savoir-faire sera nettement moins documenté et accessible par la littérature. Le débat européen actuel sur la préfabrication tourne autour de la robotisation des processus dans la production. La littérature disponible se base alors plus sur l'intelligence des machines et l'automatisation de la production<sup>1</sup> que sur le produit et son architecture.

Dans la littérature de l'architecture de préfabrication, on peut retenir le travail de l'architecte M. Breuer<sup>2</sup>. Il débute son architecture en béton préfabriqué selon le procédé de J. Baretts après une première expérience de béton en France. Sa démarche est originale car il construira simultanément aux Etats-Unis et en Europe. L'intégration systématique des solutions éprouvées lors de ses projets rend son travail évolutif. De même, les premiers bâtiments en béton de l'architecte I. M. Pei rappellent une architecture qui suit une logique constructive en modules de béton préfabriqué<sup>3</sup>.

La machine moderne, qui a une importance primordiale dans la logique de la préfabrication, trouve son origine avec la découverte, au XIX<sup>e</sup> s., de la thermodynamique. Ce domaine de la physique connaîtra une reconsidération avec les premières images de la Terre vue de l'Univers, le *Blue Marble* (p. 6). Cette image de notre planète sera la première représentation intégrale de notre biosphère. Elle sera comprise comme un grand système thermique autorégulateur. A partir de cette date, une conscience écologique va naître qui sera alimentée par des écrits scientifiques<sup>4</sup>. Certains principes de ce grand système thermique seront étudiés et rapportés sur l'architecture de l'habitat des hommes, et les principes de l'habitation passive seront établis. Dans ce débat sur la pensée écologique et environnementale, je retiens la contribution de S. Erkman<sup>5</sup>. La problématique actuelle est la crise des ressources fossiles. En Suisse, la vision de la *Société à 2000 Watts* est une réponse aux problèmes du réchauffement climatique, de la raréfaction des énergies fossiles et des matières premières. Soutenu par la Confédération, ce projet est important pour l'architecture, car 45% de l'énergie totale est consommé par les bâtiments. C'est donc dans cette perspective que s'oriente ma recherche. **Mon hypothèse soutient que l'architecture se base sur les principes de la physique et en particulier de la thermique.** Développé par les physiciens du bâtiment de l'entreprise Estia, sous la direction entre autre de F. Flourentzou, le logiciel DIAL+ m'a permis de comprendre les comportements thermiques dans l'espace architectural et de donner un sens à l'importance de l'enveloppe du bâtiment et de sa conception.

1 H. Kuch, J-H. Schwabe, U. Palzer, *Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen*, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2009

2 R. F. Gatje, Marcel Breuer, *A memoir*, The Monacelli Press, New York 2000

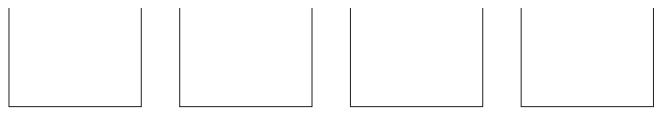
3 P. Jodidio, *I. M. Pei Architecte*, Edition du chêne, Paris 2008

4 D. Meadows, J. Randers, D. Meadows, *The limits to growth*, Universe Books, New York 1972

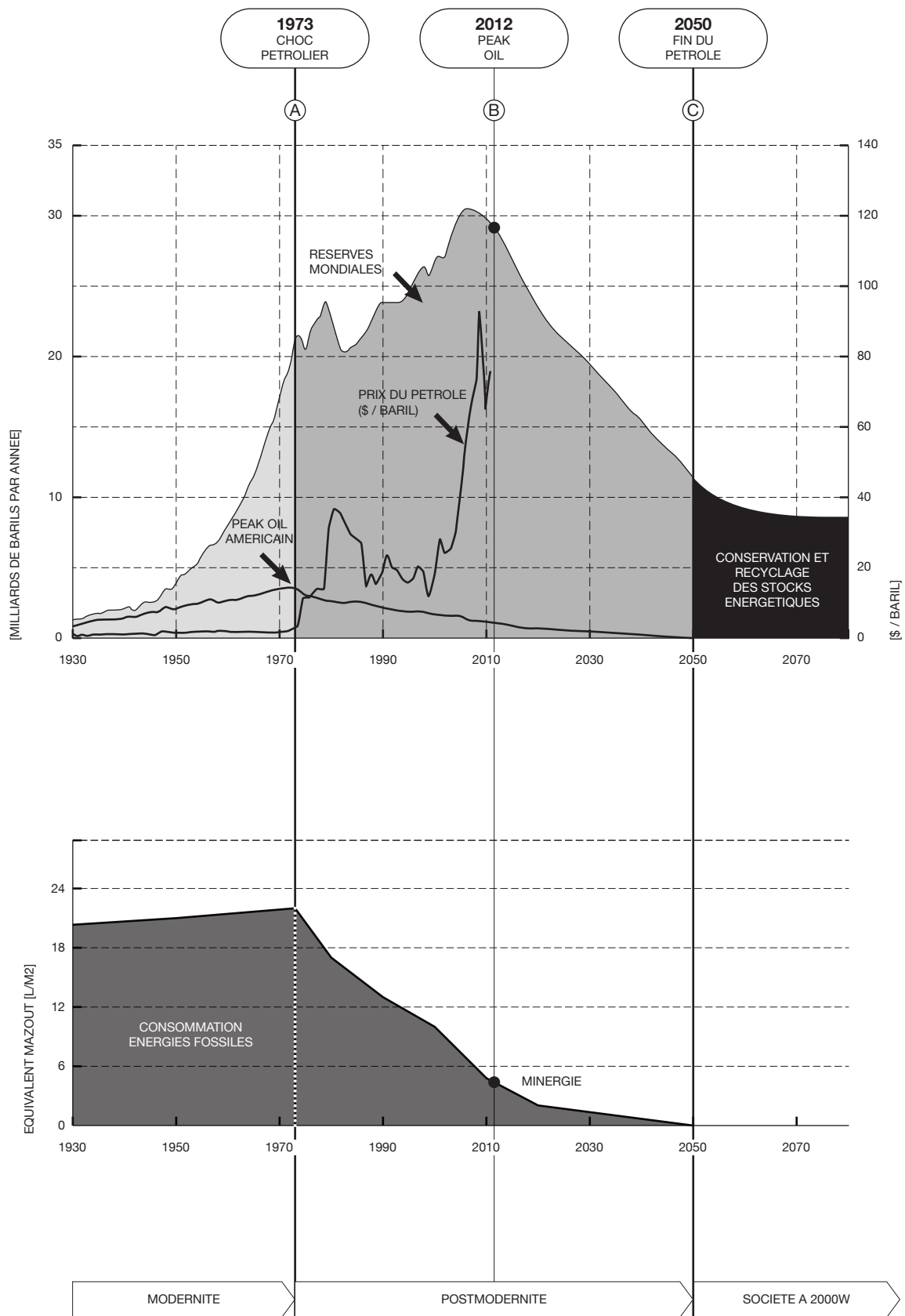
5 S. Erkman, *Vers une écologie industrielle*, Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer, Paris 1998







# MATIERE



**Haut : profil de la production du pétrole mondiale**  
 LAURE EPFL d'après The Association for the Study of Peak Oil&Gas, *diagramme Oil & Gas Production profiles*, ASPO, Uppsala 2005

**Bas : chaleur nécessaire des nouveaux bâtiments en Suisse**  
 LAURE EPFL d'après Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie, *diagramme Chaleur nécessaire des nouveaux bâtiments*, EnDK, Coire 2009

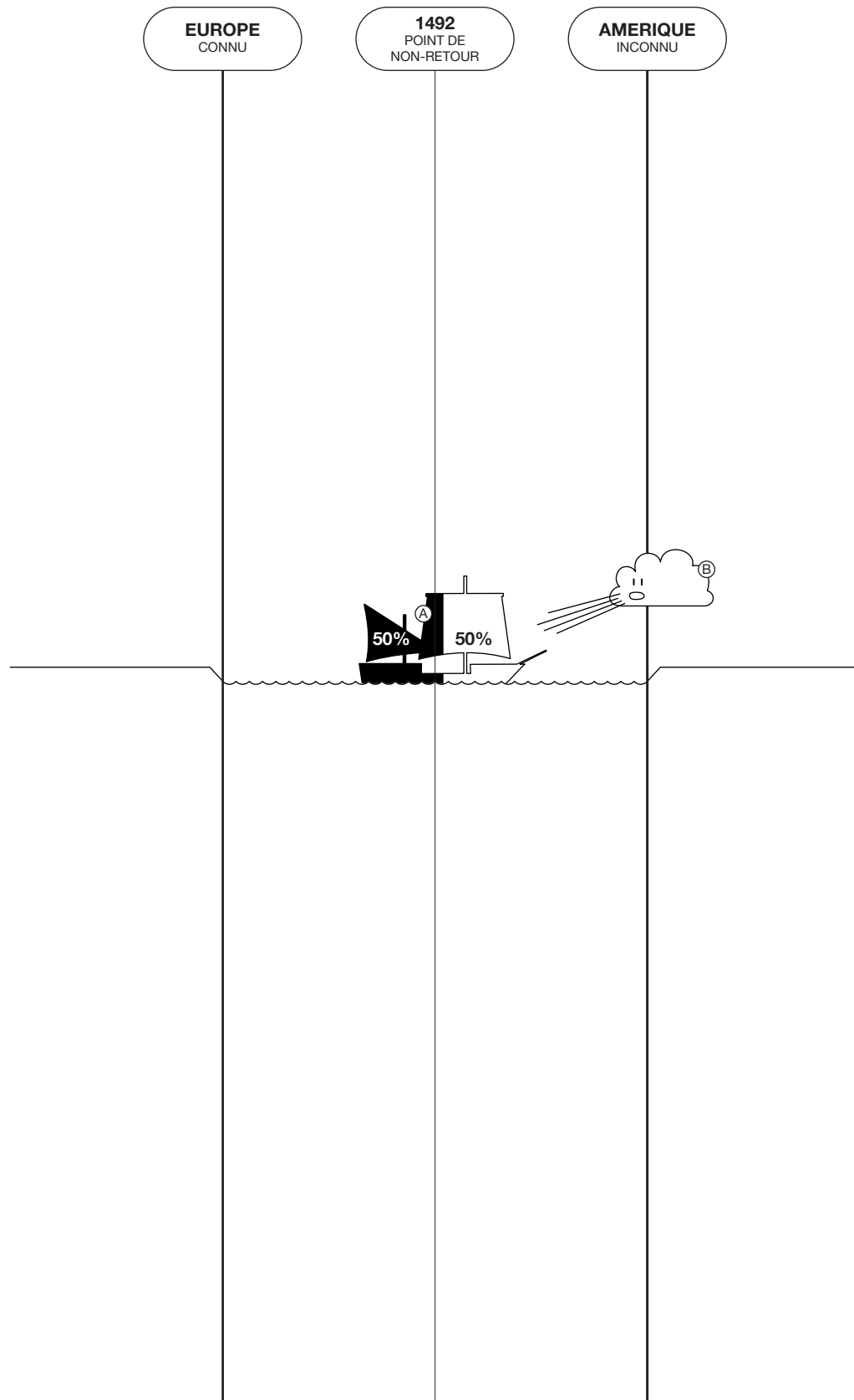
# TEMPORALITE

Ⓐ Le géophysicien M. K. Hubbert a constaté déjà dans les années 40 que la production du pétrole suivrait une courbe en cloche et atteindrait un pic inévitable. Il en déduisit que la production de pétrole américain atteindrait son plafond maximum en 1970. En effet, conformément à ses prédictions, il s'est avéré qu'en 1971, la production américaine atteignit son apogée puis amorça son déclin. Un bouleversement de l'économie se produisit avec la fin des accords de Bretton Woods, l'adoption du régime des changes flottants en mars 1973, et le premier choc pétrolier en octobre 1973. Un nouveau rapport à l'énergie s'installa.

Ⓑ Nous nous situons aujourd'hui en pleine crise des ressources planétaires. Elle aura un impact important sur tous les domaines, spécifiquement ceux liés à la consommation d'énergie. Le moment que nous vivons est marqué par le pic pétrolier mondial, ce qui signifie que nous avons consommé plus de la moitié des réserves mondiales. La production de pétrole plafonne avant de commencer à décliner du fait de l'épuisement des réserves exploitables. La prise de conscience de ce pic pétrolier et surtout l'arrivée d'une période décroissante en matière de ressources fossiles, impose une redéfinition généralisée de notre mode de vie, qui est directement en relation avec l'architecture des bâtiments.

Ⓒ Dans les années à venir, un effort important devra être déployé afin de réduire l'utilisation des ressources fossiles. En Suisse, les directives sur la consommation d'énergie dans le bâtiment se sont actualisées et ont évolué depuis les années 70. Elles visent aujourd'hui des exigences de type Minergie. Les nouvelles constructions soumises à ces directives suivent le module de base du modèle de prescription MoPEC. Ces constructions consomment en moyenne 4,8 l/m<sup>2</sup> de mazout pour le chauffage. Dans le cas de rénovation, la limite est de 6 l/m<sup>2</sup>. Les modèles de construction les plus optimistes en matière d'énergie sont les bâtiments dits "autonome". Ils sont énergiquement indépendants et produisent la totalité de l'énergie dont ils ont besoin. Ils sont les modèles vers lesquels nous tendons. Le but de cette démarche consiste à réduire la consommation d'énergie ainsi qu'à exploiter des ressources énergétiques renouvelables.

Nous nous situons aujourd'hui dans un moment charnière de l'histoire, car le retour vers une situation du passé n'est plus envisageable. La population mondiale est en pleine expansion tandis que les ressources sont en diminution. Nous avons sans doute franchi un point de non-retour et devons tourner nos regards vers l'avenir.



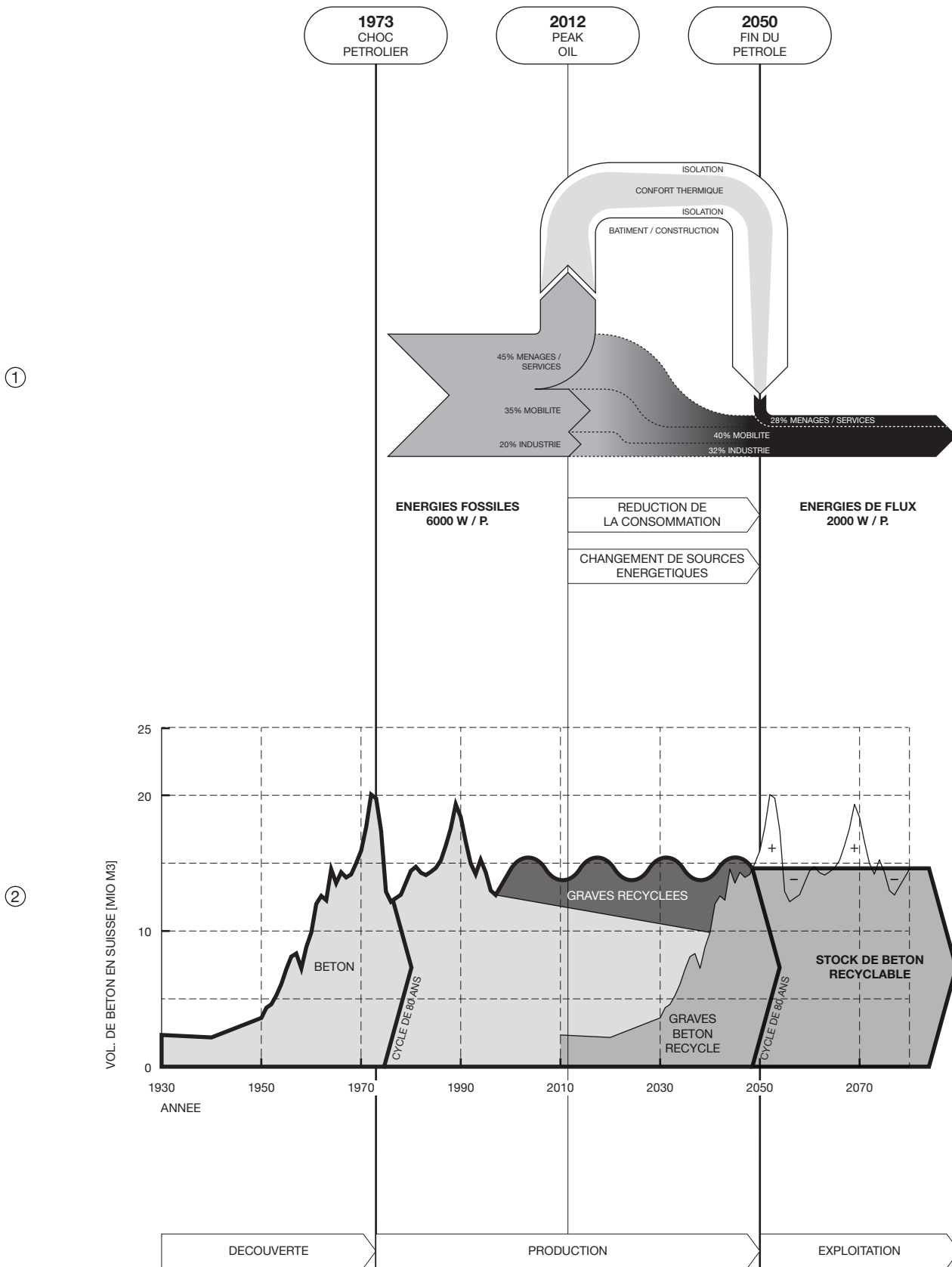
Passage du point de non-retour  
LAURE EPFL

# LE POINT DE NON-RETOUR

Ce passage du point de non-retour peut s'illustrer par la traversée de l'Atlantique réalisée par Christophe Colomb lors de la découverte de l'Amérique. En effet, la longueur de la route était incertaine, et les ressources alimentaires à bord limitées. Lorsque la deuxième moitié de ses ressources a été entamée, la décision de poursuivre sa route plutôt que de rebrousser chemin a dû être prise. Le choix de continuer sur sa conviction l'engagea définitivement dans la direction planifiée. A partir de là, deux stratégies se sont imposées. La première <sup>(A)</sup> a été de diminuer la consommation des aliments pour prolonger l'autonomie de la caravelle en mer et la deuxième <sup>(B)</sup>, d'optimiser les flux énergétiques pour raccourcir le temps de voyage.

Nous sommes actuellement dans une situation identique à celle de Christophe Colomb. La même question peut se poser par rapport au fait que nous progressons dans le temps. Mais contrairement à lui, nous n'avons pas le choix d'un retour. Les ressources que nous consommons sont non renouvelables et par conséquent, le seul retour possible serait d'adopter une ancienne forme d'usage de ressources soit l'énergie de la biomasse. Le problème est que la démographie mondiale actuelle est bien supérieure et qu'elle entraînerait une consommation de ressources plus importante que celle du passé. Les énergies de la biomasse n'auraient pas le temps de se renouveler et nous les épuiserions de la même manière que nous sommes en train d'épuiser les énergies fossiles. La fragilisation et la diminution de la biomasse aurait un impact sur notre biosphère et notre espace de vie. Nous ne pouvons donc plus revenir en arrière sur une ancienne forme d'énergie. De l'expérience de Christophe Colomb nous pouvons retenir les deux stratégies appliquées soit :

- <sup>(A)</sup> la réduction de notre consommation énergétique afin d'augmenter notre autonomie dans le temps ;
- <sup>(B)</sup> l'optimisation des énergies de flux, produites et engendrées en majeure partie par le soleil afin d'assurer une énergie durable pour le futur.



**Haut : efficacité énergétique SIA**

LAURE EPFL d'après Société suisse des ingénieurs et des architectes, *diagramme Effizienzpfad Energie*, SIA, Zürich 2010

**Bas : béton estimé en Suisse dans la construction**

LAURE EPFL d'après C.Hoffmann, F.Jacobs, *Recyclingbeton aus Beton und Mischabbruchgranulat, Sachstandbericht*, EMPA, Dübendorf 2007, Fig 2

# REFORME ENERGETIQUE

La raréfaction des ressources fossiles, ainsi que le réchauffement climatique, ont incité des chercheurs de l'ETHZ à formuler un objectif énergétique à atteindre pour l'an 2050. Il s'agit du projet de la *Société à 2000 Watts* soutenu par la Confédération et appliqué par les cantons.

① Son but est de réduire la consommation d'énergie de 6000 Watts à 2000 Watts par personne d'ici 40 ans. Afin d'atteindre cet objectif, il faudra, d'une part, axer la production d'énergie sur les ressources durables comme les énergies de flux et, d'autre part, réduire les besoins énergétiques au moyen de nouvelles techniques. Les énergies renouvelables, présentes souvent sous forme de flux dans la nature, doivent être exploitées à la place des énergies fossiles, car elles seront toujours disponibles. On peut les classer selon les quatre éléments : l'air, l'eau, la terre et le feu (soleil). Les éoliennes utilisent les forces du vent pour produire leur énergie. Le soleil est capté par les panneaux thermiques, photovoltaïques et thermodynamiques, ainsi que par le bâtiment. La géothermie va chercher sa chaleur dans les profondeurs de la terre. La puissance de l'eau est exploitée par l'hydraulique et les énergies de la mer. Les biogaz et le bois de chauffage, éléments de la biomasse, peuvent être aussi considérés comme des énergies renouvelables, si on leur laisse le temps de se renouveler. Malgré tout, l'ensemble de ces énergies ne possèdent pas la même efficacité que les énergies fossiles et ne peuvent, à elles seules, répondre aux demandes actuelles. Il est donc nécessaire de réduire les besoins énergétiques dans tous les domaines. La consommation d'énergie dans les bâtiments en Suisse représente aujourd'hui 45%<sup>1</sup> de l'énergie totale consommée. Cette énergie est essentiellement utilisée pour le chauffage des bâtiments. La chaleur émise sert à la satisfaction du besoin thermique de l'homme. Elle est donc indispensable et vitale. Elle doit dans l'avenir être considérablement réduite grâce à une isolation adéquate des bâtiments. Le principe d'isoler consiste à conserver la chaleur à l'endroit où l'on en a besoin. Ce principe est celui du thermos que l'on peut utiliser comme métaphore.

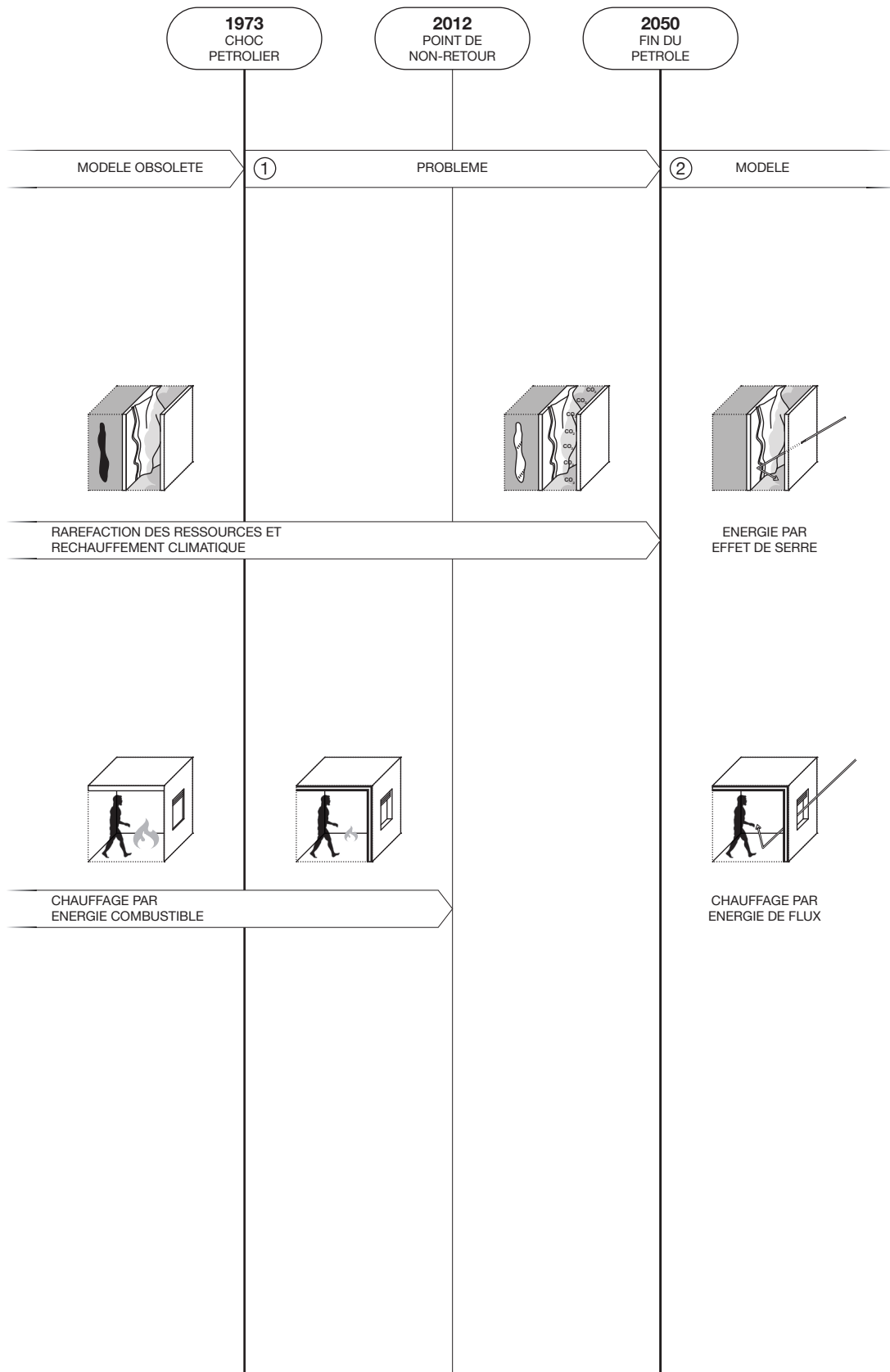
② Le béton sera utilisé, d'ici 2050, comme une matière recyclable. Si l'on part du principe que les constructions en béton sont démolies après quatre-vingt ans de vie, leurs graves peuvent être alors recyclées. Dans quarante ans, nous bénéficierons d'un stock de béton à recycler qui nous permettra de ne plus exploiter directement les matières de la Terre. Les réserves seront nos propres villes<sup>2</sup>. Actuellement, les graves disponibles destinées aux bétons recyclés proviennent de bâtiments en briques de terre cuite des années 30. Ces composants, introduits dans la fabrication d'un nouveau béton absorbent l'eau en plus grande quantité et modifient le rapport eau-ciment de la recette<sup>3</sup>. La part de ciment est augmentée et le surcoût est important. Aujourd'hui, ces bétons sont produits avec un souci de gestion de déchets<sup>4</sup>. La véritable production de béton recyclé commencera lorsque la matière première proviendra intégralement de la filière du béton.

1 Société suisse des ingénieurs et des architectes, diagramme *Effizienzpfad Energie*, SIA, Zürich 2010

2 S. Erkman, *Vers une écologie industrielle*, Éditions-Diffusion Charles Léopold Mayer, Paris 1998

3 C. Hoffmann, F. Jacobs, *Recyclingbeton aus Beton und Mischabbruchgranulat*, Sachstandbericht, EMPA, Dübendorf 2007

4 Office fédéral de l'environnement, *Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux*, OFEV, Bern 2006





# PROBLEMATIQUE

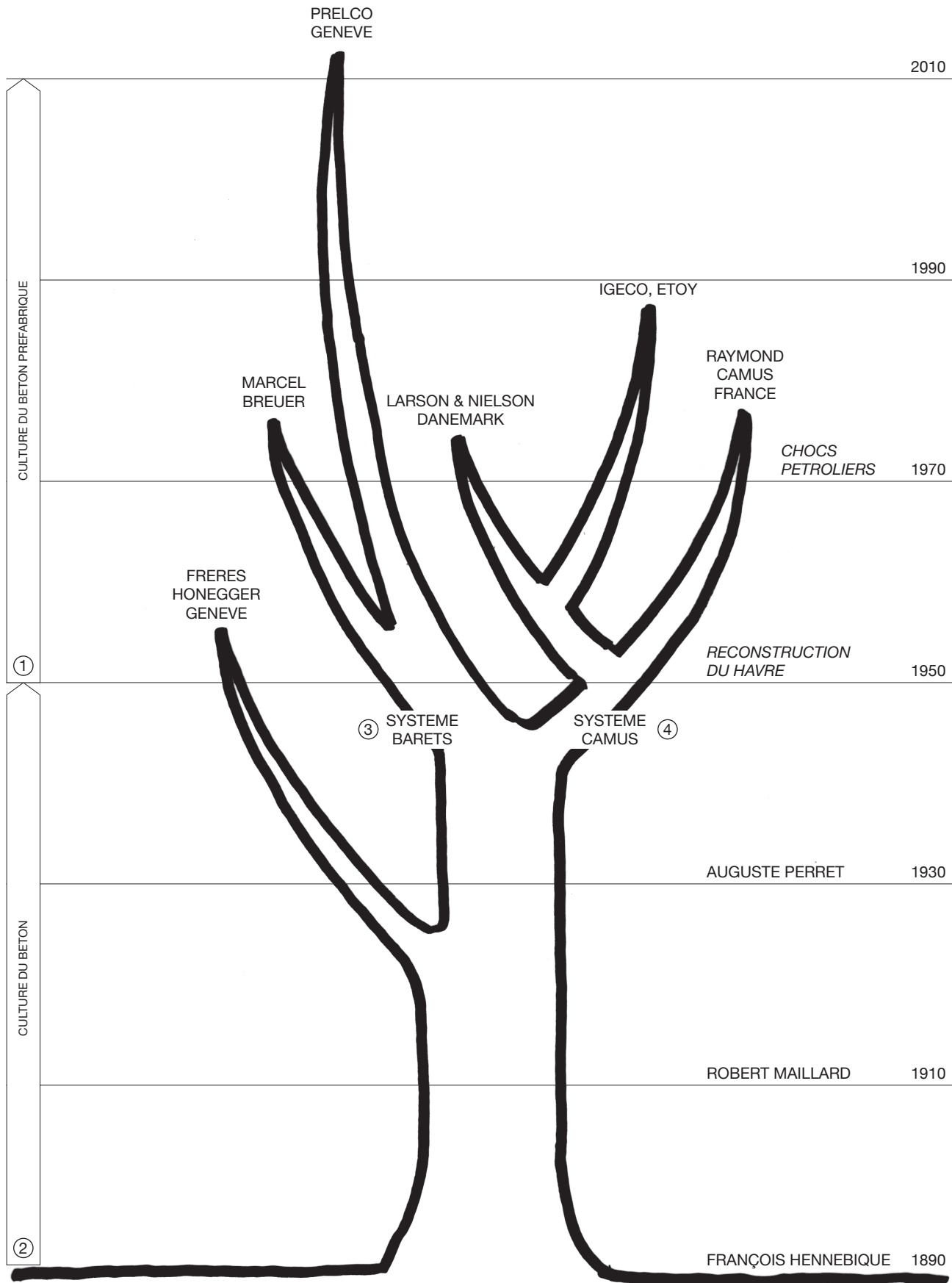
① Le projet de la *Société à 2000 Watts* base ses principes de réflexion sur la raréfaction des ressources fossiles et le réchauffement climatique planétaire. En Suisse, le secteur du bâtiment consomme 45%<sup>1</sup> de l'énergie totale. La plus grande part de ce pourcentage est utilisée pour des besoins de chauffage afin de satisfaire un besoin élémentaire sous nos latitudes ; le confort thermique. Cette chaleur sert à maintenir des températures stables à l'intérieur des bâtiments. Aujourd'hui, elle est produite essentiellement par la combustion d'énergies fossiles. L'effet secondaire de cette combustion est la production de CO<sub>2</sub>. Ces gaz rejetés dans l'atmosphère densifient la couche à effet de serre. Cette couche toujours plus dense emprisonne le rayonnement infrarouge (IR) émis par la surface terrestre. Celui-ci engendre un réchauffement climatique considérable, modifiant ainsi l'écosystème de la Terre.

② Le modèle proposé ici pour l'avenir est une interprétation physique du système thermique de la biosphère. Ce mécanisme de l'effet de serre assure une température constante moyenne de 15°C sur la surface de la Terre<sup>2</sup>. Dans un bâtiment, la température constante recherchée est d'environ 18°C. Pour répondre à ce besoin il faut d'une part isoler thermiquement et empêcher l'air chaud de s'échapper. Dans la biosphère, ce rôle est assuré par la couche à effet de serre. D'autre part, il faut intercepter les IR et les stocker dans une masse thermique. En architecture, un bon dimensionnement des ouvertures capte les rayons du soleil et la masse thermique des murs intérieurs et des dalles les absorbe. Dans cette optique, la consommation d'énergie dans le bâtiment peut se réduire considérablement, à condition d'utiliser une enveloppe à haute performance thermique et un contrôle minutieux des échanges de flux énergétiques. De plus, pour garantir une régulation passive de la chaleur, il est important de tenir compte des fluctuations de température entre le jour et la nuit, et des variations saisonnières.

Concrètement, une régulation passive consiste à se protéger de ou à capter les rayons et la chaleur du soleil, à ventiler la nuit, en été, pour réduire la température intérieure ou, en hiver, conserver la chaleur en descendant les stores. Les concepts du "bâtiment autonome" ou de la "maison passive" sont basés sur le même principe que le modèle décrit. Le mécanisme de l'effet de serre de la biosphère doit nous servir d'exemple naturel car il fonctionne remarquablement bien.

1 Société suisse des ingénieurs et des architectes, diagramme *Effizienzpfad Energie*, SIA, Zürich 2010

2 La lune, par exemple, ne possède pas ce genre de mécanisme, et ses températures varient entre jour et nuit de 100°C à -150°C.



Arbre généalogique de la préfabrication en Suisse Romande (LAURE EPFL)

# PREFABRICATION EN BETON

① Les applications du béton armé aboutissent à leur apogée de développement après la deuxième guerre mondiale. Les innovations technologiques comme les nouveaux malaxeurs, les engins de levage et les tables de coffrage, donneront un nouveau visage à la construction en béton. La préfabrication connaîtra alors son essor par sa rationalité industrielle de construction et ses moyens de production. Elle sera à ce moment plus avantageuse, efficace et économique que le bétonnage *in situ*<sup>1</sup> ②.

Deux méthodes particulières se démarqueront à cette époque. Tout d'abord, la "Kleintafelbauweise" ③, qui se caractérise par l'assemblage de petits éléments coulés au pied des bâtiments sous des abris forains. Ces systèmes de construction seront appliqués sous licence, par des entreprises de construction locales de taille moyenne. Le système français Barets sera à l'origine des constructions des établissements scolaires à Genève. Durant quinze ans, une dizaine de cycles d'orientation sera érigée sur la base de ce principe. Ce système propose une structure longitudinale, dont les modules de façades sont porteurs. Les premiers chantiers de production à Genève seront rapidement rationalisés et la production passera d'un état forain "provisoire" à un état forain "sédentaire".

Ensuite, la "Grosstafelbauweise" ④ propose l'assemblage de plaques coulées en usine et dimensionnées en fonction du transport en camion de l'usine au chantier. Cette technique sera avant tout utilisée dans la construction de logements. Les tailles des plaques se baseront sur l'unité d'une pièce habitable. Les murs transversaux feront office de structure portante. En Suisse romande, une usine sera implantée à Etoy<sup>2</sup>. Son système de préfabrication se basera sur le modèle de Larson & Nielson, importé du Danemark<sup>3</sup>. Ce système danois se différencie des nombreux systèmes français par des détails de préfabrication très élaborés. Celui-ci a été conçu pour des pays à climat froid dans lesquels la construction *in situ* est difficile durant la période hivernale.

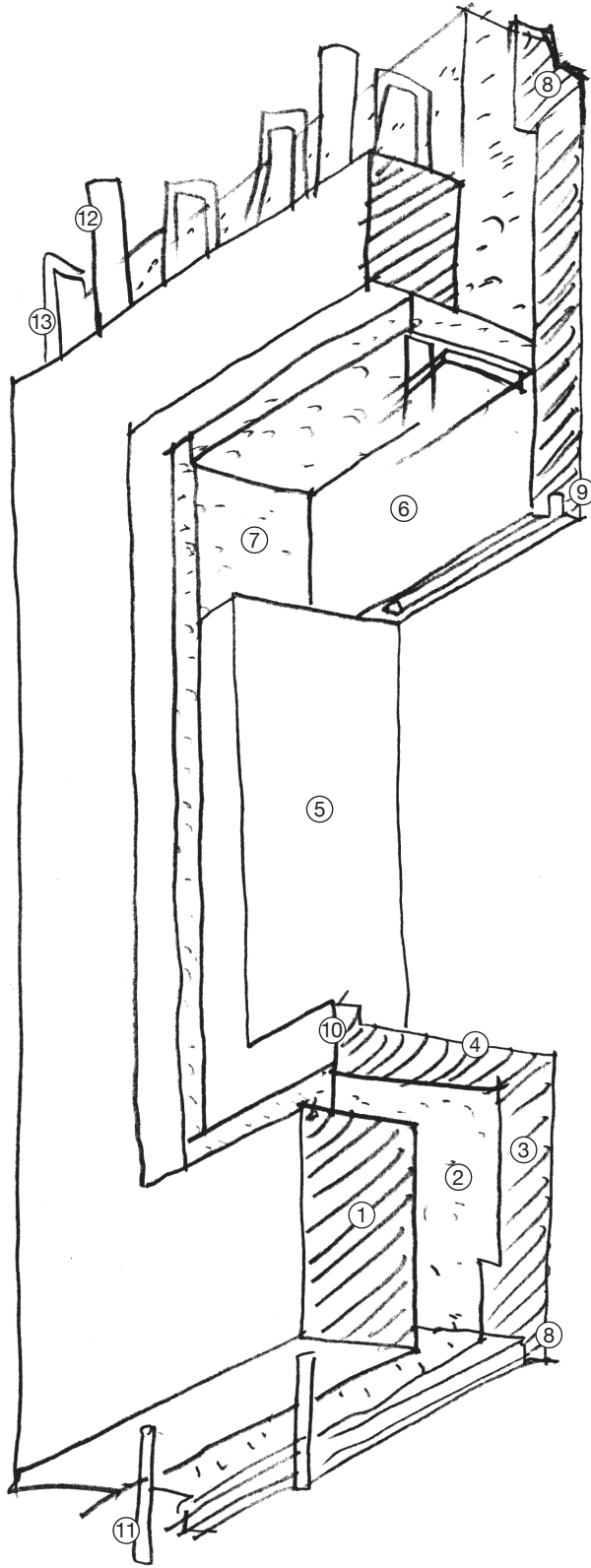
Suite aux deux chocs pétroliers des années 70, les programmes de construction de logements se réduisent considérablement dans les pays d'Europe occidentale. Les usines de préfabrication et de grande production fermeront leurs portes, y compris l'usine d'Etoy<sup>4</sup>. A cette époque, la conscience environnementale collective ainsi que les préoccupations énergétiques prennent une place prépondérante. L'économie de l'énergie dans le bâtiment devient impérative et conduit au développement des isolants. Désormais, les murs de façade comprendront dans notre pays une nouvelle couche : l'isolant.

1 J. Bovet, *La préfabrication lourde à Genève*, Bulletin technique de la Suisse romande, vol. 89, 1963, pp. 192-198

2 S. Pereswiet-Soltan, *edilizia residenziale prefabbricata*, itec-la prefabbricazione, Milano 1980, pp. 97-108

3 Dalla rivista "Industria Italiana del Cemento", *Industrializzazione e prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, A.I.T.E.C., Rome 1966, pp. 210-214

4 D. Zanghi, *Espoir et aléas de la préfabrication en Suisse romande, Le cas de l'usine Igeco à Etoy*, matières vol. 3, Lausanne 1999, pp. 86-94



**DETAILS DE CONSTRUCTION**

- ① PORTEUR
- ② ISOLATION
- ③ PAREMENT

- ④ TABLETTE
- ⑤ RETOURNEMENT DE PAREMENT
- ⑥ CAISSON DE STORE
- ⑦ RESERVATION STORE
- ⑧ DETAIL DE LA TUILE

- ⑨ GOUTTE PENDANTE
- ⑩ REJINGOT
- ⑪ GOUJON
- ⑫ RESERVATION GOUJON
- ⑬ FER EN ATTENTE POUR DALLE

**Axonométrie d'un mur sandwich en béton préfabriqué (LAURE EPFL)**

# MUR SANDWICH

Dans le cadre de ma recherche, le mur de façade que je traite comprend trois couches distinctes ; une strate de béton porteur, une couche intermédiaire, l'isolant, et une couche de finition en béton, le revêtement extérieur<sup>1</sup>.

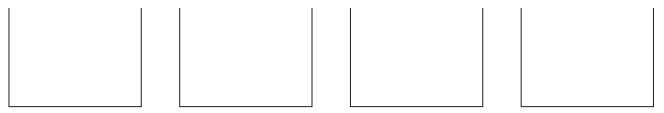
① La couche structurelle est une strate dont la résistance statique constitue le principal intérêt. Elle est dimensionnée en fonction de la charge qu'elle reprend et des exigences normatives de sécurité anti-feu. Cette strate est dans son épaisseur déjà optimisée. On ne lui accorde pas d'attention esthétique particulière car, sur sa face intérieure, on appliquera un enduit de plâtre. Elle sera réalisée avec un béton ordinaire. En plus de son rôle statique, sa masse thermique est importante car elle contribue à la régulation passive du climat intérieur. Elle conserve la chaleur et la diffuse par déphasage. L'optimisation de cette strate se fait essentiellement dans le format et la découpe du panneau sandwich fini. Ses dimensions sont liées à une répartition architecturale des panneaux sur la façade du bâtiment. Un mauvais calepinage peut augmenter les mètres linéaires de joints ou provoquer des raccords compliqués. Ceux-ci nécessitent ensuite un soin et des traitements particuliers de mise en œuvre sur le chantier.

② **La strate de l'isolant est aujourd'hui la couche la plus variable, par son coût, sa mise en œuvre et son épaisseur. Différents isolants peuvent être employés. Le choix de l'isolant se justifie par un calcul thermique de physique du bâtiment et un point de vue écologique, mais n'est pas un choix architectural. Cette strate est invisible et n'a pas de raison esthétique. Cette variation dans l'épaisseur est une indécision entre valeur physique et matière, qui n'est pas liée à une rationalité constructive. C'est dans ce domaine que l'on peut innover aujourd'hui. Il s'agit de maîtriser cette couche isolante afin de rationaliser un processus de fabrication rendu complexe par le caractère très variable de celle-ci. Cette couche est impérative pour la thermique, mais ne contribue pas à la statique du bâtiment. Elle a néanmoins depuis 1973 un statut à part entière.**

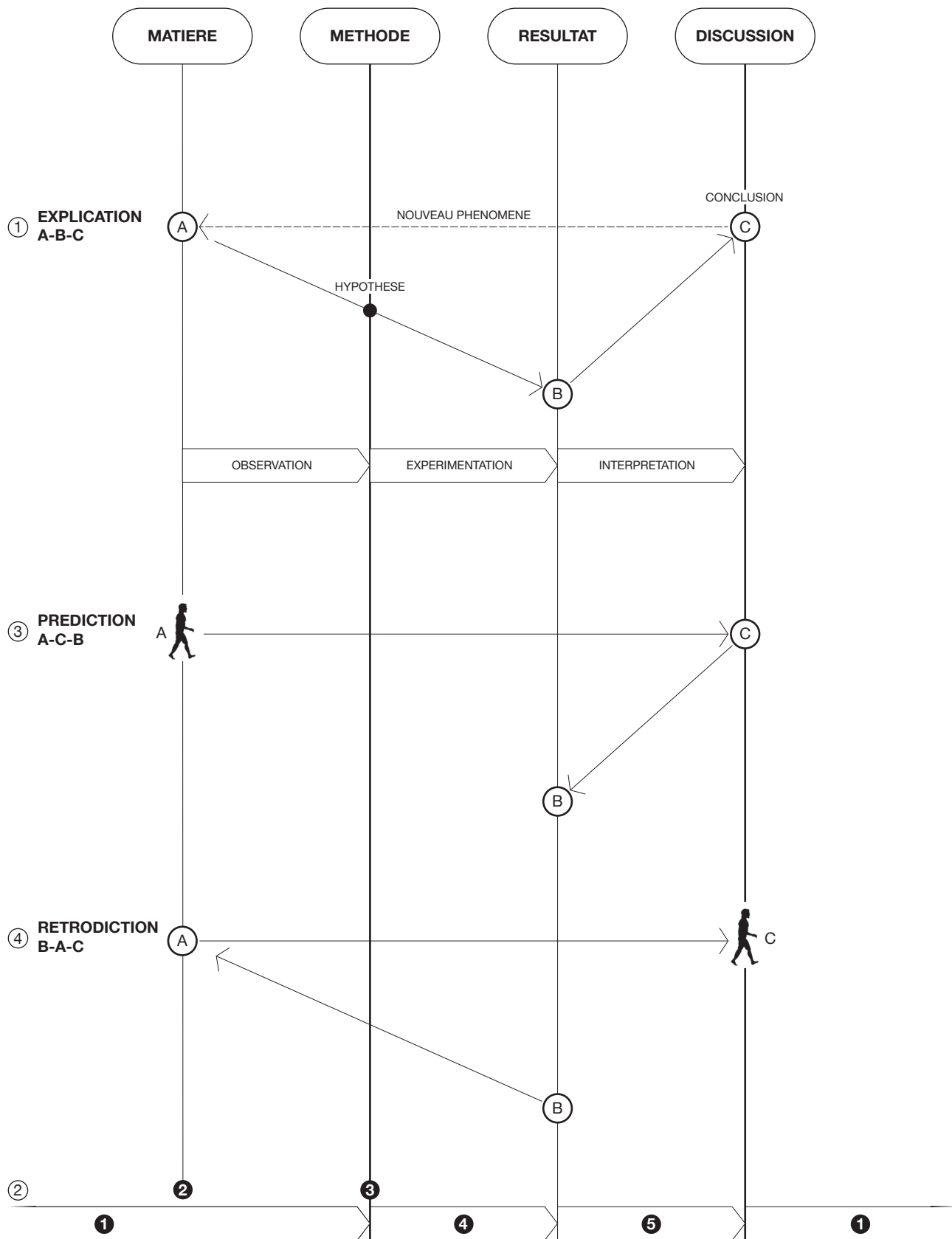
③ La strate de parement est la seule à être en contact avec l'environnement extérieur. Elle devra donc avoir d'excellentes qualités face aux variations climatiques. En sus de ses propriétés protectrices, elle est aussi la surface de finition du bâtiment, l'image finie de la construction, avec des possibilités de teintes et traitements de surface variés.

1 P. L'Hôte, E. Boget, *Guide pratique des façades préfabriquées en béton*, Association Suisse des professionnels du Béton Préfabriqué, Genève 1985





# METHODE



- REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN**
- ① ETAT NORMAL
  - ② ANOMALIES DANS LE MODELE
  - ③ CRISE DU MODELE
  - ④ MODELES DE REVOLUTION
  - ⑤ NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

Disposition de la méthode dans le temps  
LAURE EPFL



# LA METHODE

La règle de mon travail se développe sur une structure issue de l'appropriation d'une trame classique utilisée de manière originale pour la construction d'un rapport de thèse<sup>1</sup>. Il dispose dans le temps les thèmes suivants, *Matière, Méthode, Résultats, Discussion*. En relation avec ces thèmes, j'ai juxtaposé la méthode expérimentale décrite par Claude Bernard<sup>2</sup> ①, avec ses actions dans l'espace et la méthode scientifique de Thomas Kuhn<sup>3</sup> ②, qui s'inscrit dans le temps. La relation de ces deux méthodes me permet de mettre en rapport des conditions particulières liées à un thème et d'en extraire une explication chronologique.

En architecture, on a affaire, d'une part, à un certain nombre d'objets de prédiction ③, correspondant à un futur projeté, comme la *Société à 2000 Watts, l'habitat passif, le mur à haute performance thermique* et, d'autre part, à un nombre important d'objets de retrodiction ④ se référant à l'histoire, comme les traités d'architecture. Dans mon travail, je mets en rapport la retrodiction *origine du besoin thermique de l'homme* avec la prédiction *haute performance thermique*. J'ai réalisé plusieurs actions de recherche. Introduites dans la *Méthode*, ces étapes expérimentales aboutiront à la conclusion de cette thèse.

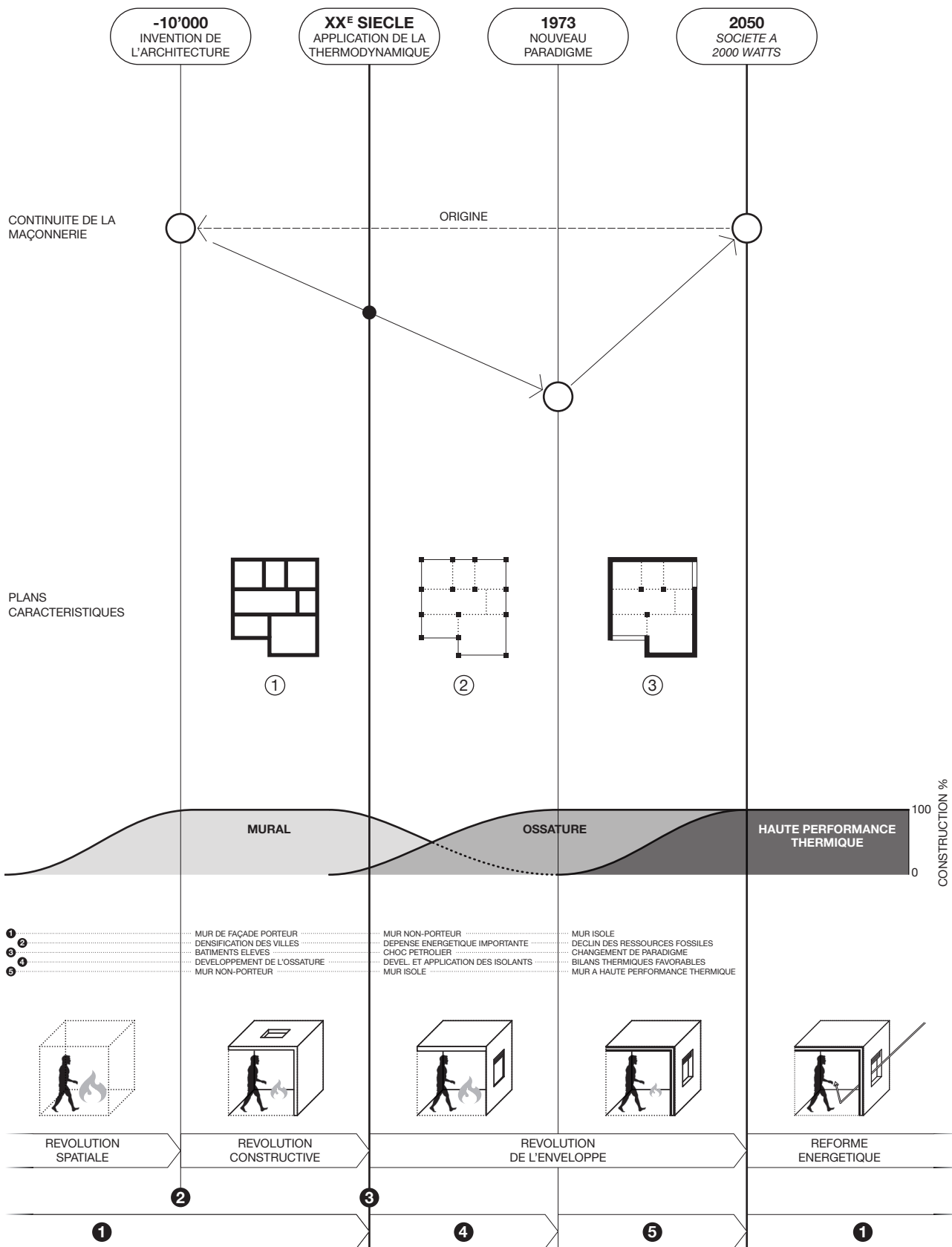
Tout d'abord, j'ai effectué un travail d'observation ciblé sur l'architecture en béton préfabriqué à Genève. Cette démarche m'a permis de constater un changement de l'architecture de façades. Celui-ci s'illustre par l'introduction des isolants suite aux modifications des normes thermiques dues au choc pétrolier de 1973. Ensuite, dans le cadre d'un projet de recherche sur l'optimisation des panneaux sandwich à haute performance thermique, j'ai développé des solutions concrètes et constructives pour l'avenir. Enfin, convaincu que dans le futur nous devons utiliser des murs à hautes performances thermiques, j'ai mis en place une représentation graphique mettant en rapport des événements du passé afin d'identifier les changements significatifs de l'histoire. De cette méthode découle la construction d'une pensée qui se base sur des suites logiques d'événements dans le temps.

La première partie des résultats explique l'évolution de la statique dans la façade jusqu'à nos jours. La deuxième partie, l'évolution future de la thermique des façades. Ces deux progressions marquent la révolution de l'enveloppe en architecture, c'est-à-dire un passage définitif à une nouvelle architecture.

1 A. Reichenbach, *Anleitung für das Schreiben der Dissertation*, Paul-Flehsig-Institut, Universität Leipzig 2007

2 C. Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris 1865, p. 54

3 T. S. Kuhn, *The structure of scientific revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago 1962



**REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN**

- ① ETAT NORMAL
- ② ANOMALIES DANS LE MODELE
- ③ CRISE DU MODELE
- ④ MODELES DE REVOLUTION
- ⑤ NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

Disposition de l'histoire de l'architecture dans la méthode (LAURE EPFL)

# APPLICATION DE LA METHODE

L'histoire intégrale de l'architecture peut être comprise comme un progrès dans le temps. J'ai adopté la structure des révolutions scientifiques que propose T. S. Kuhn<sup>1</sup> pour ranger et subdiviser cette histoire particulière. Dans le cas de l'architecture, je constate une grande révolution que j'appelle une réforme. Cette "réforme" est un changement de paradigme de l'origine de la source de chaleur. Avant la réforme, je distingue trois révolutions successives ; la révolution spatiale, constructive et celle de l'enveloppe. Les révolutions sont des changements d'état. Selon T. S. Kuhn, une révolution se structure en cinq étapes ① - ⑤.

La première révolution est spatiale. Elle trouve son origine dans la préhistoire. L'homme perd sa fourrure et ressent un nouveau besoin, celui du confort thermique. Pendant des millénaires, il se couvre de vêtements primitifs et s'organise autour du feu. Cet handicap semble avoir touché l'ensemble de l'espèce humaine. Ces difficultés ont poussé à développer la nécessité du partage et de l'entraide qui, elle aussi, était devenue vitale. L'espèce ne pouvait survivre que si l'harmonie au sein du groupe était garantie. L'homme comble ses besoins par des artifices pour exister dans son espace de vie, la Nature.

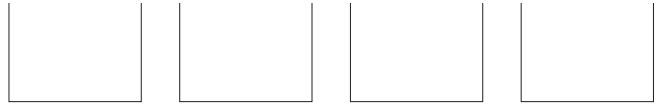
La deuxième révolution est constructive. A l'aube du néolithique, un réchauffement de la planète de 12°C<sup>2</sup> transforme le climat sur la Terre. Les rennes, principale ressource des hommes, suivent le froid et migrent vers le nord. Abandonnant cette chasse et n'ayant plus besoin de peaux grâce à des températures plus douces, l'homme découvre les vertus de la végétation et devient sédentaire. Il développe l'agriculture, l'élevage, l'économie, l'architecture, le tissage et aussi la guerre. La construction des premières habitations se réduisent à quatre murs et un couvert. Cette enveloppe permet à l'homme de conserver la chaleur et d'optimiser les apports énergétiques nécessaires à son confort thermique. Le mode de vie reste organisé autour du feu et respecte une hiérarchie des espaces en fonction des activités et de la source de chaleur disponible ①. L'architecture est marquée par une compartimentation spatiale et constructive.

La troisième révolution est celle de l'enveloppe. L'invention de l'électricité sera une nouvelle forme d'énergie qui sera intégrée dans l'habitat sous différentes formes telles que l'ascenseur, la lumière artificielle, les réfrigérateurs et plus tard d'autres appareils électroménagers. Les constructions s'élèveront vers de nouveaux gabarits. L'ossature sera développée et l'espace intérieur décloisonné ②. Des systèmes de chauffage pour l'ensemble de l'habitat seront développés. Un confort thermique homogène sera garanti sur l'ensemble de l'espace de vie de manière équilibrée. Cette caractéristique de l'habitat se différencie d'une organisation autour d'un foyer. A partir de 1973, l'enveloppe du bâtiment sera thermiquement consolidée et optimisée ③. La réforme vers laquelle nous tendons est la substitution définitive du feu de notre habitat. Dans cette optique, l'architecture est un *piège à chaleur* est se distancie d'une construction pétrifiée autour d'une source de chaleur.

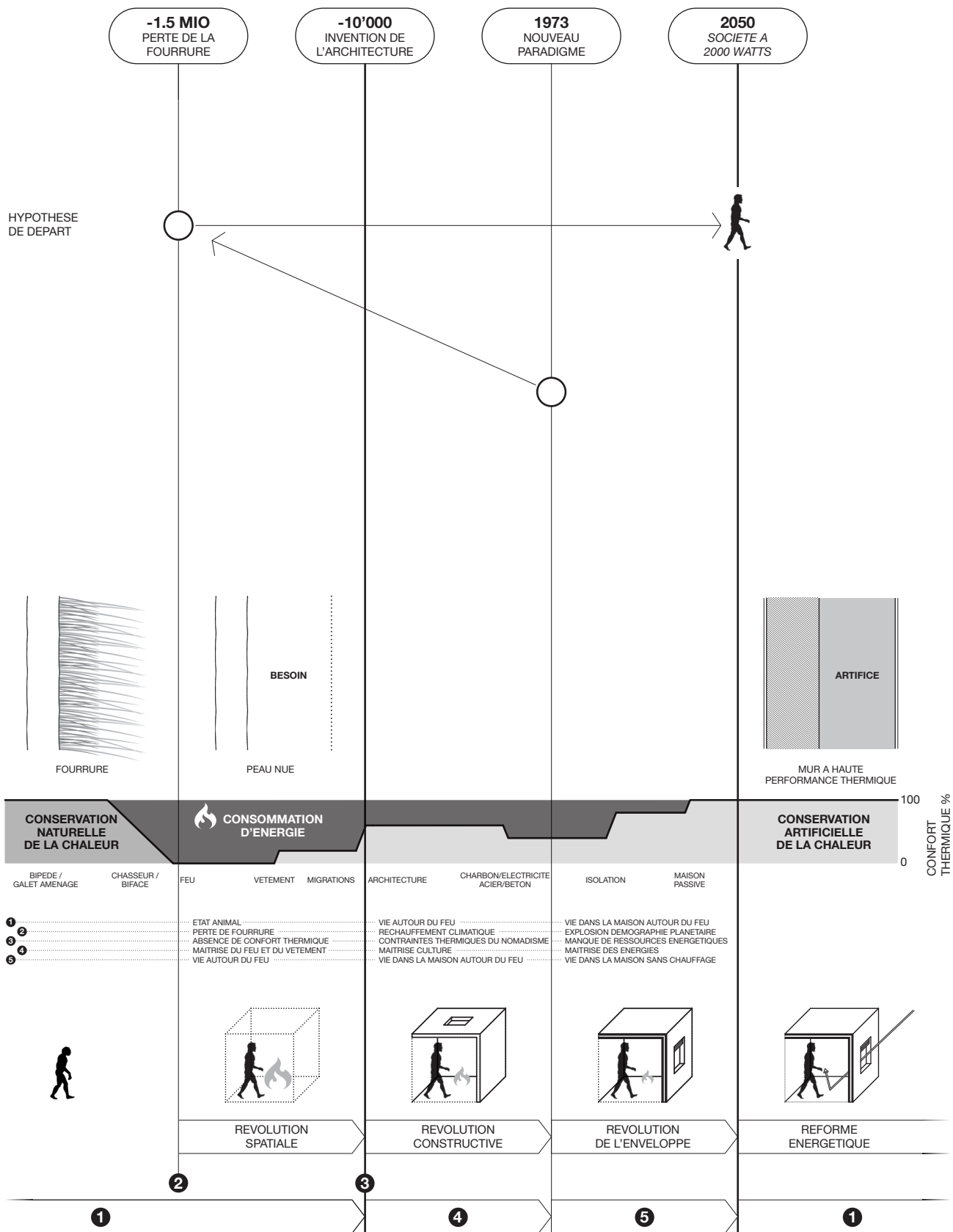
1 T. S. Kuhn, *The structure of scientific revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago 1962

2 J. R. Petit, *Climate and atmospheric history of the past 420'000 years from the Vostok ice core, Antarctica*, Nature, vol. 399, 1999, pp. 429-436





# DISCUSSION



**REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN**

- ÉTAT NORMAL
- ANOMALIES DANS LE MODELE
- CRISE DU MODELE
- MODELES DE REVOLUTION
- NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

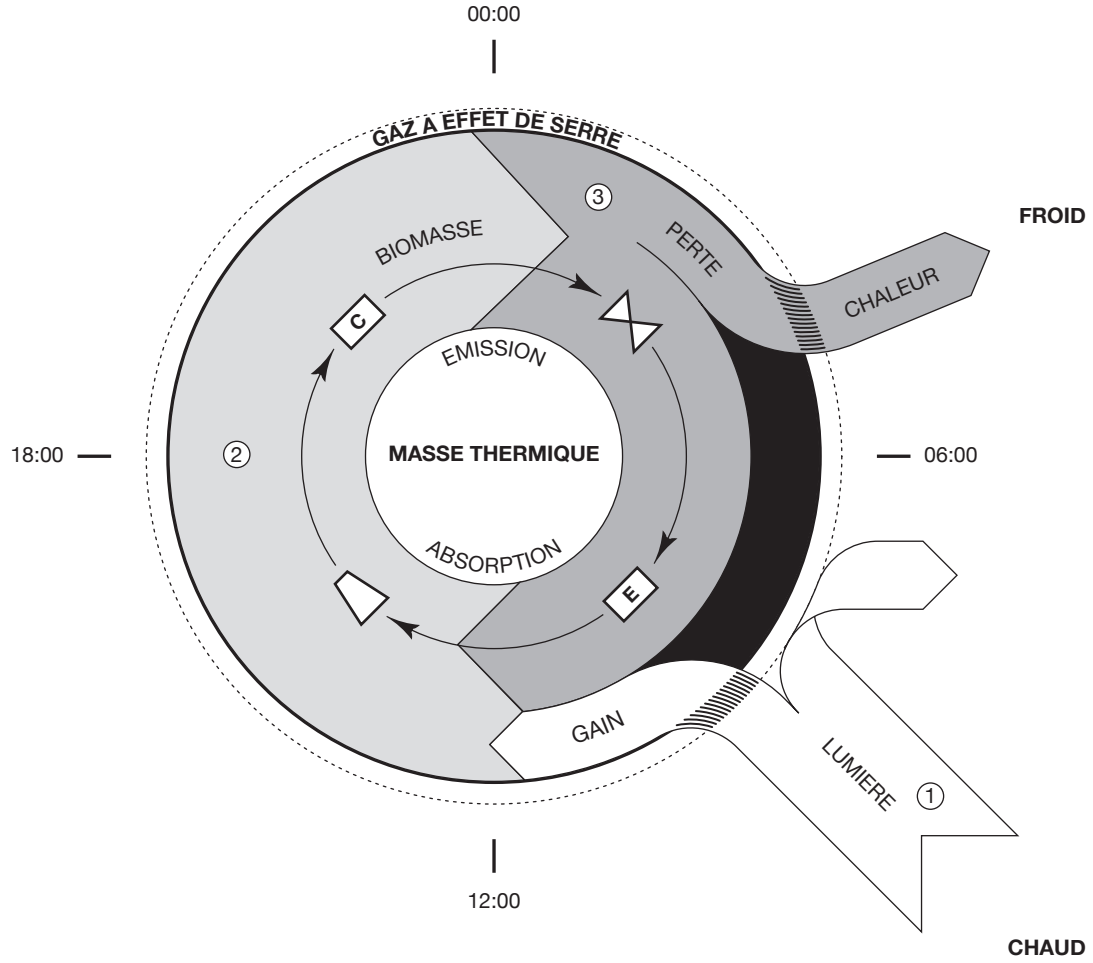
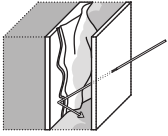
**Histoire de l'humanité introduite dans la méthode**  
LAURE EPFL

# DU BESOIN A L'ARTIFICE

L'hypothèse de départ soutient que l'homme se détache de la Nature par la perte de sa fourrure. Pour conserver une température corporelle constante de 37°C, il doit maintenir son confort thermique à 18°C. L'appropriation du feu, sa culture du vêtement et l'invention de l'architecture seront ses premiers artifices et perdureront pendant des siècles. La révolution de l'architecture moderne débute avec l'introduction de l'électricité et du chauffage central dans l'habitation. Simultanément, l'ossature et le découloignement spatial apparaissent. Le climat intérieur pousse les logements à une homogénéité des espaces de vie. L'enveloppe extérieure perd son rôle statique et sera traitée comme une cloison intérieure améliorée. A partir de la deuxième guerre mondiale et l'invention de l'astronautique, l'homme découvre la Terre depuis l'Univers. Ces images représentent un changement de paradigme de la vision du monde, tant d'un point de vue littéral que figuratif. C'est durant la dernière mission d'Apollo que la première photo intégrale de la Terre illuminée a été prise quelques mois avant le choc pétrolier. Cette image correspond vraisemblablement à ce que T.S. Kuhn appelait dans sa théorie le *Gestaltshift*. On découvre un astre muni d'une biosphère qui possède une fine couche autorégulatrice, dans laquelle nous vivons et qui est tempérée. La conservation de la chaleur sur Terre se fait grâce à un dispositif thermique complexe et global. A partir de cette date, l'homme cherche à projeter ce phénomène sur son propre habitat. L'introduction systématique de l'isolation est vraisemblablement la conséquence de ce changement de paradigme. A partir de 1973, les bâtiments seront isolés pour réduire les dépenses énergétiques. Cette réaction est globale et naît d'une conscience collective sur un nouveau rapport à la conservation de l'énergie. La question thermique est maintenant abordée avec les nouveaux matériaux qui ont essentiellement des propriétés thermiques et sont détachés d'un quelconque rôle statique. Ces dernières années l'optimisation de cette nouvelle couche tend vers la disparition de la source de chaleur intérieure et s'oriente vers la source de chaleur extérieure pour la capter. Ce renversement de la conception climatique dans l'espace intérieur appelle une réforme en architecture. Les énergies captées de l'environnement remplacent les énergies à combustion.

Je représente le principe de fonctionnement thermique de la biosphère à l'aide d'un diagramme *Sankey* ou diagramme de flux. Cette forme d'illustration<sup>1</sup> permet de dessiner le premier principe de la thermodynamique, soit la conservation des énergies appliquée à la disposition des flux de la biosphère. Le fonctionnement d'une architecture dont les murs sont conçus à haute performance thermique se base sur le même principe. Je pense que l'architecture est le substitut d'une couche que l'homme a perdu, sa fourrure. Le principe de fonctionnement idéal de son espace habitable est équivalent au fonctionnement thermique de la biosphère.

1 H.J. Leibundgut, *Low Ex Building Design*, vdf Hochschulverlag ETHZ, Zürich 2011, p. 28, p. 30



**MACHINES THERMIQUES**  
 ① PREMIERE MACHINE THERMIQUE  
 ② POMPE A CHALEUR  
 ③ TROISIEME MACHINE THERMIQUE

**POMPE A CHALEUR**  
 □ EVAPORATEUR  
 ▽ COMPRESSEUR  
 ⊞ CONDENSATEUR  
 ⊗ DETENDEUR

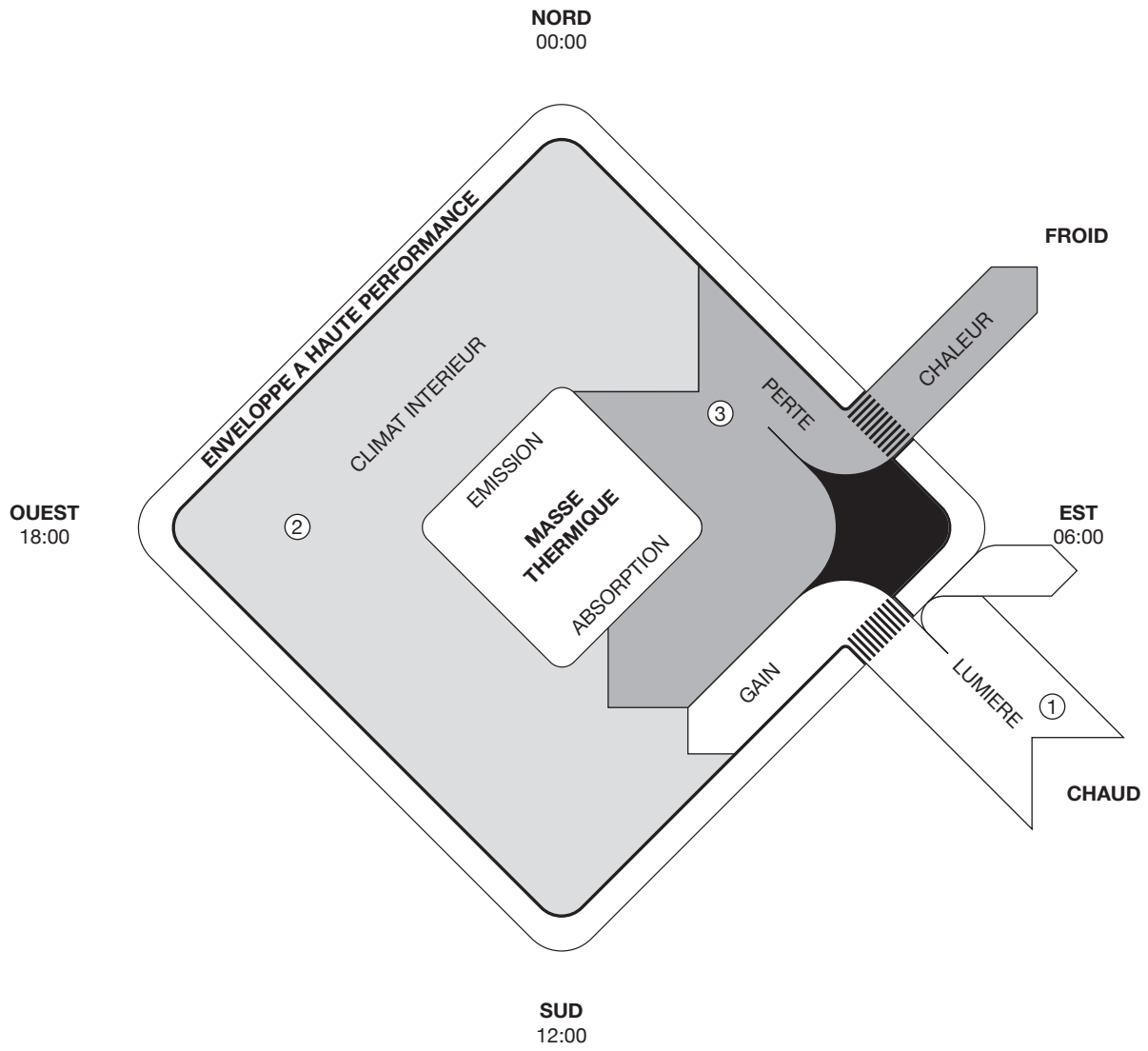
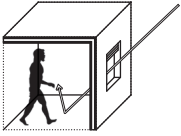
Plan schématique de la Terre avec le principe de son système thermique (coupe sur l'équateur à l'équinoxe).  
 LAURE EPFL



# LE PIEGE A CHALEUR NATUREL

La biosphère peut être vue du point de vue physique comme un système thermique. Plus précisément comme trois machines thermiques en série ou encore un moteur à quatre temps. La première machine ① thermique sert à laisser pénétrer dans la biosphère une certaine quantité d'énergie provenant du soleil pendant le jour. La deuxième machine ② utilise l'énergie dégagée par la première machine et entraîne la biomasse. Cette machine thermique fonctionne comme une pompe à chaleur. Dans une journée, il est possible de distinguer quatre périodes spécifiques. La première est le matin où la lumière solaire actionne une évaporation ☐. La deuxième phase s'enchaîne à midi avec une compression de l'air ▷. Ensuite, l'émission de la masse thermique commence le soir et provoque la condensation de la vapeur d'eau ◻. La dernière phase se fait pendant la nuit avec une réduction de la pression de l'eau qui fonctionne comme un détendeur ✕. Et le cycle recommence au matin suivant avec l'évaporation ☐. La troisième machine ③ conserve d'une part l'énergie de la biomasse pendant la nuit et d'autre part perd une quantité d'énergie équivalente à celle de l'apport énergétique du soleil pendant le jour. La particularité de cette grande machine thermique est que sa température au sol est quasiment constante avec une moyenne de 15°C. Elle permet la vie dans une épaisseur relativement fine de plus ou moins 1 m au-dessus et au-dessous de la ligne de terre. Ce système thermique assure et contribue à l'équilibre de notre écosystème. Celui-ci est composé de trois groupes majeurs d'acteurs, les producteurs (végétaux), les consommateurs (animaux) et les décomposeurs (champignons). Ensemble, ils forment la chaîne alimentaire par laquelle l'énergie et les matières circulent et sont stockées. Les producteurs sont des organismes capables de subvenir seuls à leurs besoins métaboliques. Ils utilisent comme sources principales la lumière, le CO<sub>2</sub> et l'apport de matière nutritive provenant des minéraux. Les consommateurs s'alimentent de la production végétale et d'autres consommateurs. Les décomposeurs sont les champignons et micro-organismes qui décomposent et minéralisent les fragments et débris de végétaux et de consommateurs. Chaque acteur libère une énergie sous forme de chaleur et contribue aussi à la présence des gaz à effet de serre autour du globe en produisant du CO<sub>2</sub>. Les océans produisent de la vapeur d'eau qui est aussi importante dans la production de gaz à effet de serre.

L'effet de serre est un processus naturel qui, pour une absorption donnée d'énergie électromagnétique confère une température de surface du globe nettement supérieure à une situation sans effet de serre. Ce phénomène est dû à la présence de gaz à effet de serre (GES) contenu dans l'atmosphère. Une partie du rayonnement solaire traverse l'atmosphère, atteint le sol où il est absorbé. Cette chaleur est restituée pendant la nuit. Ce rayonnement thermique du sol est reflété par les GES. L'atmosphère conserve ainsi sa chaleur pendant la nuit. Il s'agit donc d'un *piège à chaleur* unique et original qui garantit un équilibre parfait. Ce dispositif peut être transposé et pris comme modèle pour l'architecture.



- MACHINES THERMIQUES**  
① PREMIERE MACHINE THERMIQUE  
② POMPE A CHALEUR  
③ TROISIEME MACHINE THERMIQUE

Plan schématique du système thermique d'une maison passive comprenant une masse thermique  
LAURE EPFL

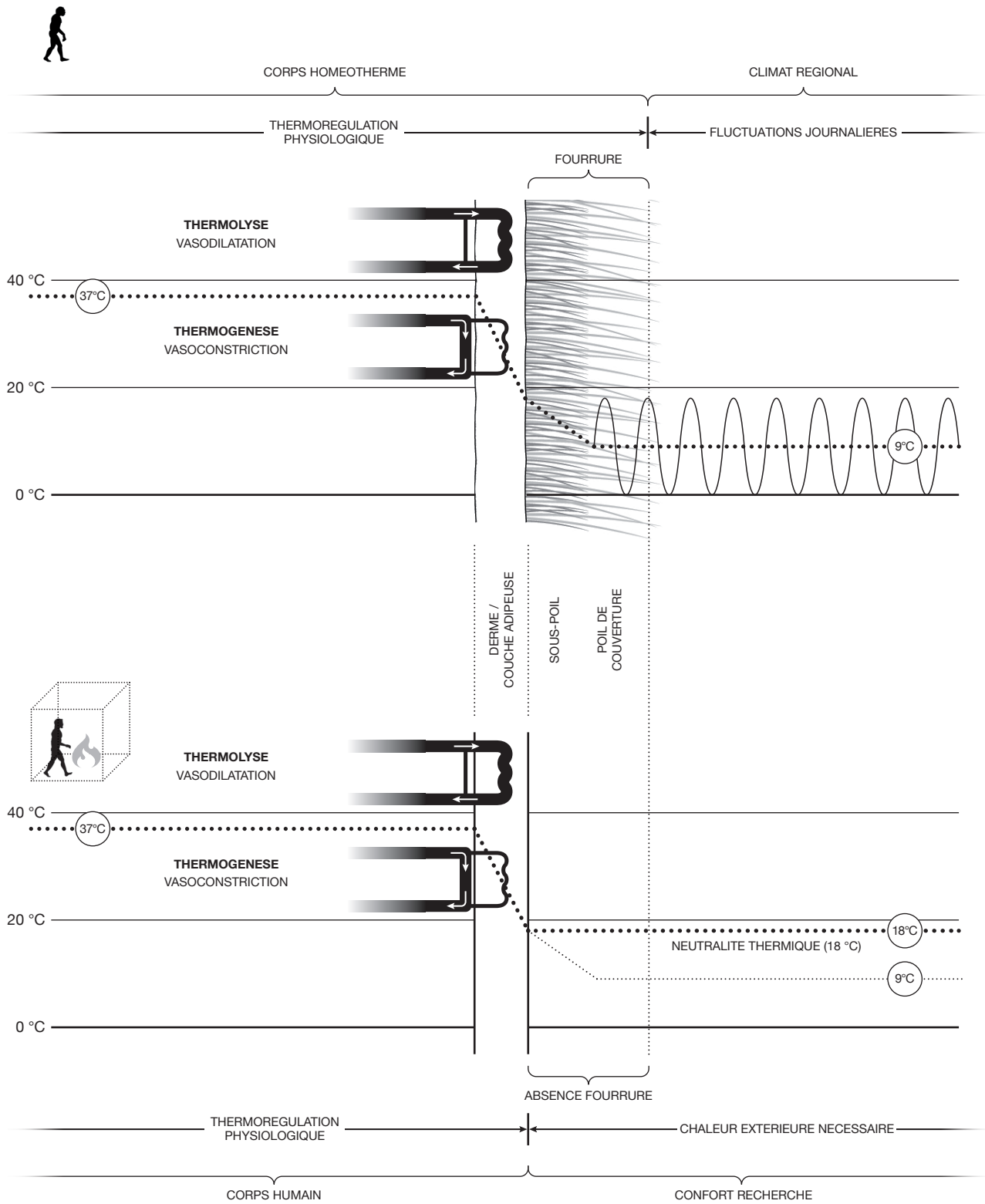
# LE PIEGE A CHALEUR ARTIFICIEL

Le modèle de l'effet de serre atmosphérique peut être considéré comme le modèle naturel d'un *piège à chaleur*. Celui-ci se présente comme un espace fermé et étanche à l'air qui capte une partie du flux solaire selon la période de la journée et le stocke provisoirement dans la croûte terrestre. Durant les périodes où la source n'est pas active, il bénéficie alors de la chaleur accumulée dans la masse. Il génère ainsi une température stable sans apport énergétique supplémentaire.

L'espace habitable en architecture peut fonctionner, au fond, comme une micro-biosphère. Le même mécanisme permet de s'alimenter à une source d'énergie permanente et inépuisable sans autre apport d'énergie. Cette machine thermique en architecture se base sur trois conditions. Elle doit pouvoir régler l'intensité des flux entrants, intercepter les infrarouges (IR) et les stocker dans une masse thermique. De plus, elle doit assurer que les pertes de chaleur ne soient pas plus grandes que les gains possibles. Pour régler l'intensité des flux entrants, il faut disposer d'ouvertures appropriées. Elles doivent, d'une part, être dimensionnées pour capter le plus de soleil possible durant les périodes froides. D'autre part, dans les périodes chaudes, elles ne doivent pas laisser entrer les rayons solaires et ces ouvertures devront être protégées par des avant-toits ou des stores. L'inconvénient de la protection des stores est la diminution de la luminosité dans les espaces intérieurs. Le rayonnement solaire (UV) une fois entré à travers la vitre dans l'espace est absorbé par les murs et transformé en rayonnement IR. Il est donc impératif d'avoir une masse thermique qui accumule cette chaleur et la restitue durant les périodes où il n'y a pas d'apports de chaleur. Si le bâtiment est isolé correctement alors cette masse thermique peut être elle aussi réduite à son minimum. La masse d'accumulation thermique de manière générale sert dans le bâtiment à favoriser la régulation passive du climat intérieur. Une masse thermique va de pair avec un isolant. Une isolation performante donne à la masse thermique uniquement un rôle de stockage d'énergie. Son épaisseur active est de 8 cm<sup>1</sup>. Comme expliqué au paragraphe "Structure et façade" en p. 65, sous nos latitudes, le mur de façade doit présenter une obstruction de 50% pour fournir sa meilleure efficacité énergétique. Le raisonnement logique est d'utiliser cette masse d'obstruction en lui attribuant aussi les propriétés de la masse thermique. Ceci réduit le besoin de masse d'accumulation dans l'espace intérieur et permet le décroisement. Cette proposition est idéale pour les typologies de bureaux qui demandent des espaces ouverts et dont les planchers et plafonds techniques ne permettent pas de stocker la chaleur.

Pour que les pertes thermiques à travers les fenêtres et les murs n'excèdent pas les gains, il faut empêcher l'air chaud de s'échapper. Ceci réclame une enveloppe performante et étanche. L'isolation contribue à la protection contre la perte et le gain de chaleur à la fois. L'hiver, elle permet d'éviter le transfert de chaleur en réduisant sa déperdition. Inversement l'été, elle maintient l'intérieur frais en empêchant la chaleur de pénétrer.

1 J.-P. Gay, *Énergétique du Bâtiment 1*, Architecture 2<sup>e</sup>, LESO Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment EPFL, Lausanne 1991, p. 48



••• MOYENNE DE TEMPERATURES

..... PIEGE A CHALEUR

**Thermorégulation rapportée à l'environnement**

LAURE EPFL d'après R. Eckert, D. Randall, *Physiologie animale : mécanismes et adaptations*, De Boeck Université, Paris 1999, p. 683

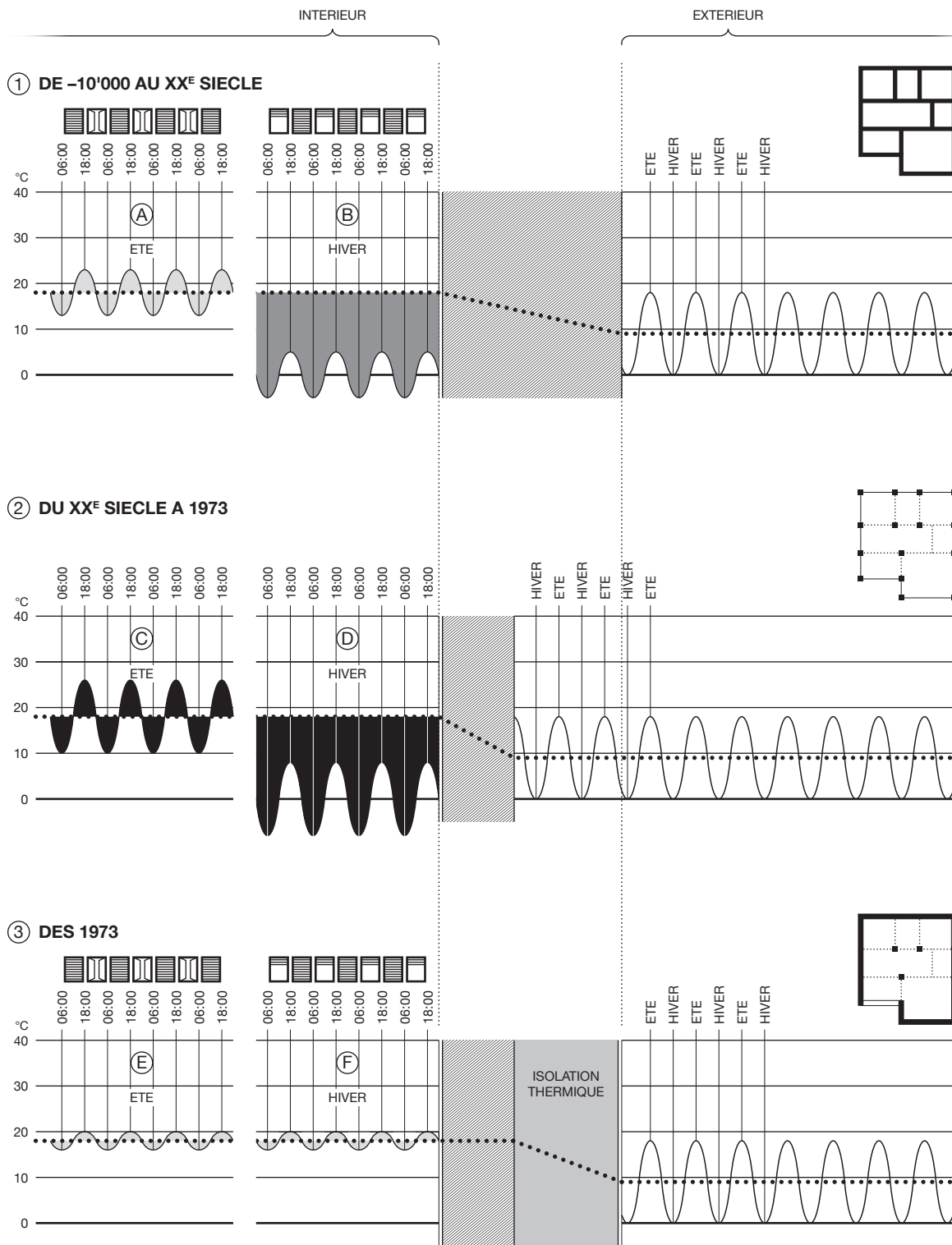
# LE PIEGE A CHALEUR DEFECTUEUX

Pour mieux comprendre le besoin thermique de l'homme, il faut remonter à l'époque où il était revêtu d'une fourrure comme tous les autres homéothermes<sup>1</sup>. Une fourrure est composée en général de poils de couverture et de sous-poils. Les poils de couverture servent de protection contre la pluie tandis que les sous-poils, ou duvet, d'isolation thermique. Ces poils sont fins, courts et souples.

La thermorégulation est indispensable à l'équilibre thermique du milieu intérieur d'un homéotherme. Elle englobe tous les mécanismes qui permettent de maintenir l'organisme à la température idéale. Le système de régulation thermique est composé d'une source d'énergie (le travail musculaire), de la protection isolante de la peau et d'un système de radiateurs et de thermostats (transmis par le sang et le système circulatoire). Pour maintenir la température, il faut un équilibre entre la thermolyse et la thermogenèse. La thermolyse évacue la chaleur, tandis que la thermogenèse conserve et produit de la chaleur. Au niveau de la peau, la première se manifeste par une vasodilatation. Le sang arrive à l'extrémité des vaisseaux sanguins dans la peau et transmet la chaleur aux glandes sudoripares qui permettent la fabrication et l'évacuation de la sueur. L'évaporation de l'eau par convection refroidit le corps. Durant la vasoconstriction, le sang court-circuite la peau et reste à l'intérieur des couches adipeuses qui forment une partie de l'isolation. La chaleur est renvoyée à l'intérieur du corps. Durant la thermogenèse un autre mécanisme est activé qui est connu sous le nom de "chair de poule". Il s'agit d'une réaction de l'organisme face au froid. Ce mécanisme réflexe entraîne la contraction des muscles reliant les poils à la peau, ce qui a pour effet de les dresser à la surface du corps et de créer ainsi un volume d'air isolant. Cette couche permet de réduire les pertes de chaleur et de conserver la température interne corporelle.

Depuis que l'homme a perdu sa fourrure, sa thermogenèse est déficiente. Son corps recherche une neutralité thermique pour satisfaire son confort. Afin de remédier à cet handicap, il doit d'une part se vêtir et d'autre part assurer un climat à température constante autour de lui. Dans les climats froids, ce confort réclame un apport de chaleur supplémentaire qui doit être assuré par une source de chaleur. Aujourd'hui, nous avons la capacité de supprimer la source de chaleur active et de n'avoir réellement besoin que de vêtements et d'une architecture intelligente. Les besoins physiologiques d'une enveloppe et d'un climat stable sont indispensables à la survie de l'homme. L'histoire de la construction, depuis que l'homme a perdu sa fourrure jusqu'à nos jours, a été d'optimiser le microclimat dans lequel il vit. Aujourd'hui, ce climat peut être contrôlé et assuré par l'architecture, sans aucun apport d'énergie active.

<sup>1</sup> Se dit d'un animal dont la température centrale est constante, Larousse 2008



- |                          |  |                               |                                   |                                   |  |
|--------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>TEMPERATURES [C°]</b> |  | <b>GESTION DES OUVERTURES</b> |                                   | <b>STATIQUE / MASSE THERMIQUE</b> |  |
| ••••                     | MOYENNE                                    |                               | GAIN SOLAIRE (OUVERTURE DU STORE) |                                   | ENERGIE DE LA BIOMASSE (CHAUFFAGE A BOIS)          |
|                          | FLUCTUATIONS JOURNALIERES / ANNUELLES      |                               | PERTE DE CHALEUR (AERATION)       |                                   | ENERGIE FOSSILE (CHAUF. A MAZOUT/GAZ ET AIR COND.) |
|                          | FLUCTUATIONS AMORTIES (PAR INERTIE THERM.) |                               | CONSERV. DE CHALEUR (STORE FERME) |                                   | ENERGIE DE FLUX (REGULATION PASSIVE)               |

# RECAPITULATION

Dans l'histoire de l'architecture, on peut retenir trois évolutions distinctes de la façade.

L'architecture vernaculaire, la première période de l'architecture moderne avec l'invention de l'ossature et la gestion d'un climat homogène et la deuxième période de la modernité avec la prise en compte de l'enveloppe contenant une isolation et une masse thermique.

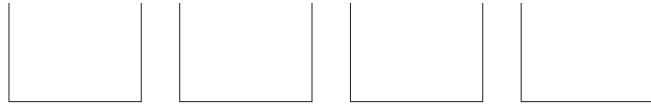
① Dans l'architecture vernaculaire le mur de façade servait à la fois de mur porteur et avait en plus une fonction thermique. La masse thermique du mur contribuait à la régulation passive du climat intérieur par la gestion des ouvertures <sup>Ⓐ</sup>. La différence entre la température du lieu et les 18°C du confort thermique de l'homme était comblée en hiver par des énergies d'appoint tels que des combustibles issus de la biomasse <sup>Ⓑ</sup>.

② Dans la première période de la modernité, les chauffages à bois seront remplacés par le charbon, celui-ci ayant un pouvoir calorifique plus important. Contrairement au bois, cette ressource extraite de la mine est non renouvelable. Les retombées de ce nouveau combustible sur la société et l'économie furent le développement de la thermodynamique et l'invention des machines. Dans le domaine de l'architecture, ce changement se traduit par l'arrivée de l'électricité et l'introduction du chauffage central. Cet élan sera accéléré après la deuxième guerre mondiale. Le pétrole devient une ressource plus intéressante que le charbon, car son état liquide facilite son extraction et son transport. Il sera la nouvelle matière énergétique de référence. Le mur sera réduit car il n'aura plus systématiquement de fonction statique. Le climat intérieur sera géré par le chauffage et l'air conditionné <sup>Ⓒ</sup> <sup>Ⓓ</sup>. Les nouveaux bâtiments seront réalisés en construction légère ce qui mettra en crise la régulation du climat intérieur des locaux.

③ Depuis 1973, la tendance est de réduire la consommation d'énergie en introduisant l'isolation dans la construction de façade. L'optimisation de la couche de l'isolant et la présence d'une masse thermique permettent aujourd'hui de créer des *pièges* énergétiques qui ne nécessitent plus de chauffage à combustion. Cette disposition, qui n'est rien d'autre que le principe de fonctionnement de la biosphère, permet d'éviter l'usage de matières fossiles pour rétablir le confort thermique exigé. Une masse thermique adéquate permet une régulation passive du climat intérieur partiellement identique à celle de la période du vernaculaire <sup>Ⓔ</sup> <sup>Ⓕ</sup>. L'emploi d'isolants à hautes performances thermiques permet de ramener les pertes au niveau des gains possibles. Cette démarche est une réforme en architecture vers des énergies de flux. Elle doit se faire de manière consciente et globale. Le climat n'est pas une question individuelle, il concerne toute la planète. **Il nous faudrait acquérir la conviction que l'énergie ne doit pas être puisée dans la matière, par essence limitée, mais à sa source, inépuisable à l'échelle de l'homme, le soleil.**

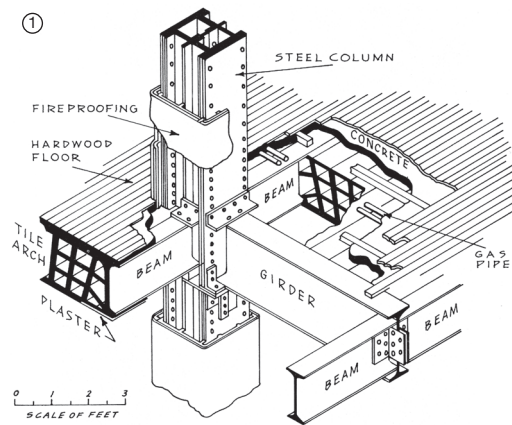




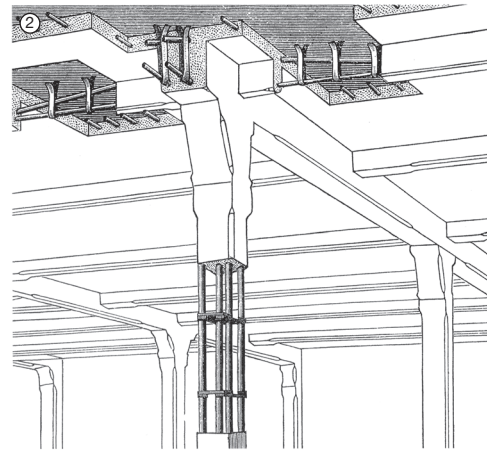


**RESULTATS**

**STATIQUE**



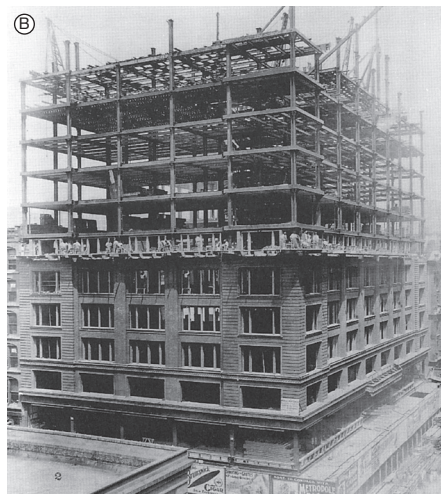
FAIR STORE, 1890-91  
WILLIAM LE BARON JENNEY



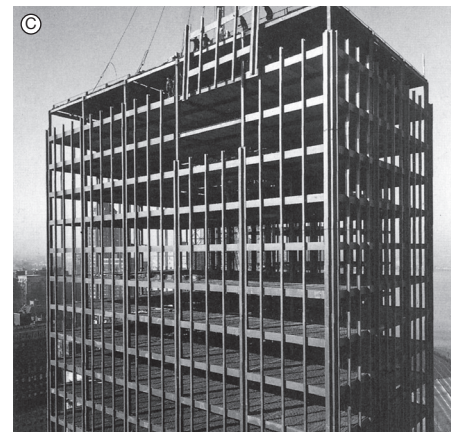
LOGO DE LA FIRME HENNEBIQUE, 1896



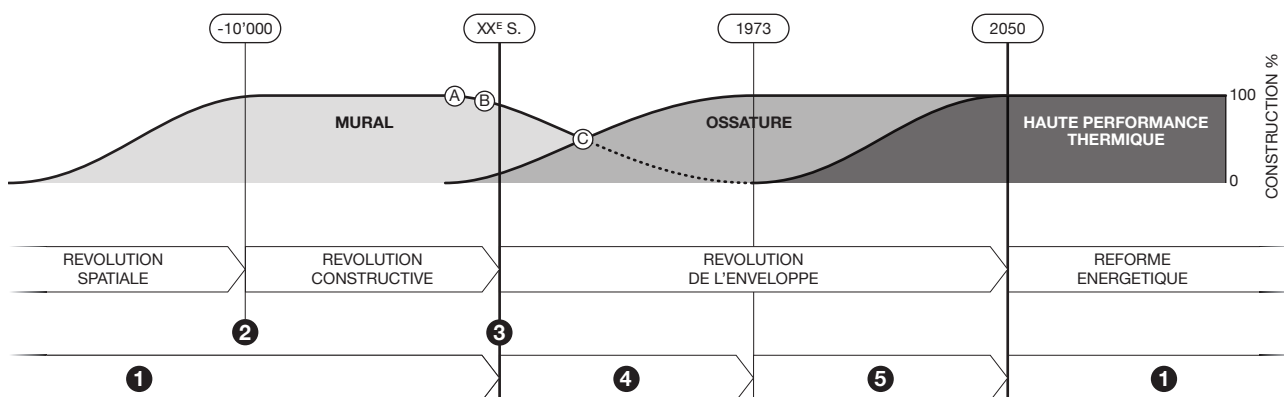
MONADNOCK BUILDING, 1889-91  
BURNHAM & ROOT



MARQUETTE BUILDING, 1893-94  
HOLABIRD & ROCHE



LAKESHORE DRIVE, 1948-51  
MIES VAN DER ROHE



- REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN
- ① ETAT NORMAL
  - ② ANOMALIES DANS LE MODELE
  - ③ CRISE DU MODELE
  - ④ MODELES DE REVOLUTION
  - ⑤ NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

Tournant en architecture (LAURE EPFL)

- ① ① C. W. Condit, *The Chicago School of Architecture*, The University of Chicago Press, Chicago 1964, fig. 28, fig. 512
- ② G. Delhumeau, J. Gubler, R. Legault, C. Simonnet, *Le béton en représentation*, Editions Hazan, Paris 1993, p. 46

- ③ R. Brueggemann, *The Architects and the City*, The University of Chicago Press, Chicago 1997, p. 27
- ④ P. Carter, *Mies van der Rohe at work*, Phaidon Press Limited, London 1974, p. 47

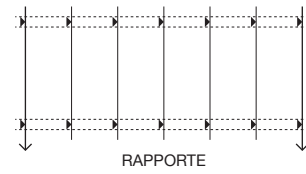
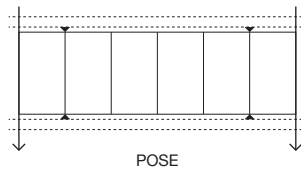
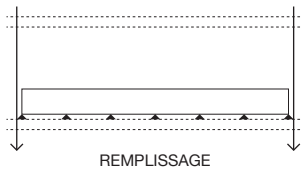
# L'OSSATURE

L'invention de l'ossature ① ② est le premier changement révolutionnaire de l'enveloppe en architecture. A la fin du XIX<sup>e</sup> s., une nouvelle architecture naît. Le progrès technique, la croissance démographique ainsi que la centralisation des activités provoquent l'exode vers les villes. Ils seront les moteurs de ce développement. L'invention de l'électricité permettra de déporter la puissance énergétique de son lieu de production à son lieu de consommation. Des nouveaux engins, comme l'ascenseur, seront inventés et intégrés dans le bâtiment. La nouvelle économie réclamera des espaces de bureaux et des logements à haute densité et engendra un nouveau défi en architecture<sup>1</sup>.

Le premier bâtiment à haute densité, le Monadnock Building ① construit à Chicago en 1891, suit une logique de construction murale. Pour reprendre les charges colossales dues à sa grande hauteur, les ingénieurs ont surdimensionné les murs des étages inférieurs et calculé des épaisseurs allant jusqu'à 1.80 m. Pendant les travaux, ce mastodonte s'est enfoncé dans le sol de quelques dizaines de centimètres et des escaliers en négatif ont dû être rapportés afin d'accéder au rez-de-chaussée. Cette expérience contribua à convaincre les ingénieurs et architectes qu'il fallait appliquer de nouvelles solutions plus rationnelles à l'usage de la matière ②. Ils recoururent à des techniques permettant de diminuer le poids propre de ces nouvelles constructions. Les descentes de charges furent centralisées et les murs porteurs remplacés par une grille de poteaux métalliques assemblés à un système déjà exploité de poutres et hourdis ①. A la même époque, en Europe, les ingénieurs développèrent le béton armé sous forme d'ossature ② et inventèrent l'armature d'acier. Cette dernière sera composée de tiges et d'étriers métalliques et noyée dans une matrice de béton. Les ingénieurs européens ne s'intéresseront plus à l'acier pour sa forme constructive mais pour ses propriétés physiques.

Cette nouvelle architecture, développée tant en Amérique qu'en Europe, aura deux conséquences majeures sur la nature de l'enveloppe des bâtiments ③. La première est la disparition de la masse thermique qui contribuait à une régulation passive du climat intérieur. La deuxième, l'invention de la façade légère. Le climat intérieur est assuré par un nouveau système de chauffage, centralisé et plus efficace. Il est produit par la combustion de charbon qui sera plus tard remplacé par le mazout. La perte de la masse thermique du mur de façade provoque la disparition de la régulation passive de la chaleur à l'intérieur des bâtiments. A cause de cette réduction du mur, durant les saisons chaudes, on assiste à des surchauffes intérieures et on voit apparaître l'air conditionné. Ces inventions sont les nouveaux instruments pour maintenir un climat stable et homogène dans l'ensemble de l'espace intérieur. Chauffage pour les périodes froides, air conditionné pour les périodes estivales. Avec l'invention de l'ossature, la façade n'a donc plus de rôle statique et la thermique est gérée par la régulation intérieure centralisée. Le rôle de la façade restera ainsi secondaire jusqu'en 1973.

1 C. Willis, *Form Follows Finance*, Princeton Architectural Press, New York 1995



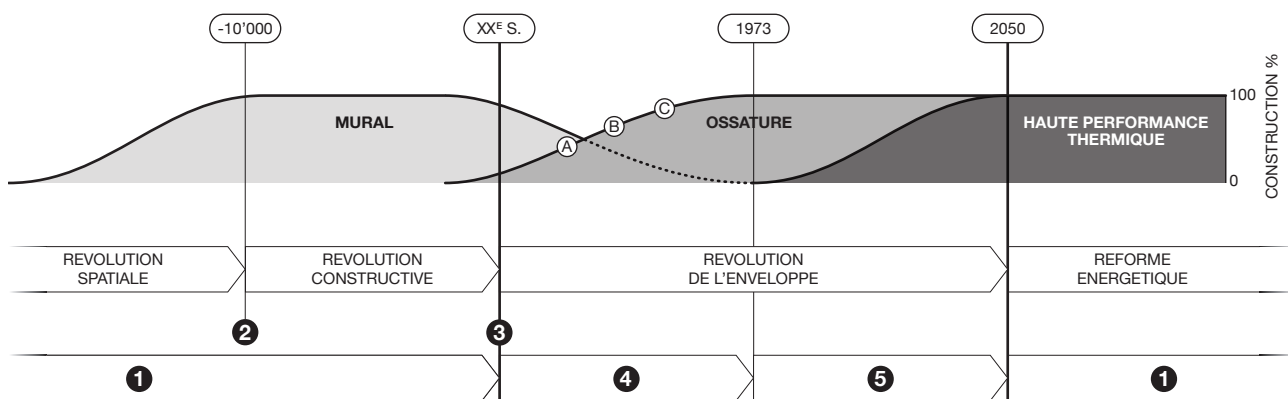
PROMONTORY APARTMENTS, 1946-49



COMMONWEALTH PROMENADE, 1953-56



COLONNADE APARTMENTS, 1958-60



REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN

- ① ETAT NORMAL
- ② ANOMALIES DANS LE MODELE
- ③ CRISE DU MODELE
- ④ MODELES DE REVOLUTION
- ⑤ NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

Développement de la façade non-porteuse (LAURE EPFL)

- Ⓐ Archive photo A. Bassi, Genève
- Ⓑ © P. Carter, *Mies van der Rohe at work*, Phaidon Press Limited, London 1974, p. 49

# NOUVELLE TYPOLOGIE DE FAÇADE

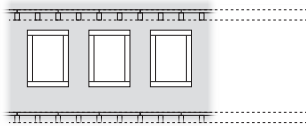
Cette révolution de l'enveloppe amènera de nouvelles typologies de façade. Dans le cas de l'ossature en béton, les façades et les cloisons intérieures formeront des murs de remplissage. Jusqu'en 1973, la seule différence entre les cloisons intérieures et les murs de façade sera que ces derniers devront assurer une parfaite étanchéité à l'eau. Les premières façades qui s'adaptent à l'ossature métallique seront des solutions hybrides qui conservent une maçonnerie en brique, héritée du passé. Le Marquette Building, à Chicago (p. 54 <sup>ⓑ</sup>), est un des premiers immeubles dont l'ossature métallique en façade est enveloppée de briques. Ce revêtement en briques sera substitué dans les années 40 par des façades légères en verre et acier. Comme pour les bâtiments à ossature en béton, les façades sont réduites à leur pure fonction d'étanchéité à l'eau. Ce que les architectes et les ingénieurs ignoraient encore, était qu'ils avaient inventé des *pièges à chaleur*. Ils fonctionnent à l'inverse du bon sens. En hiver, ces bâtiments ont des déperditions de chaleur importantes, tandis qu'en été, les apports de chaleur sont considérables à cause de l'activation du phénomène d'effet de serre. L'air conditionné est développé pour compenser ce nouveau problème. La réduction de la façade à l'essentiel statique, considéré comme un progrès, conduira, de fait, au point zéro de la thermique du mur de façade. La méconnaissance de la logique thermique durera jusqu'en 1973. On peut distinguer de manière générale trois nouveaux types de façades, qui marquent les typologies contemporaines. Dans son travail, l'architecte Mies van der Rohe, à lui seul, exploite ces trois formes et fait évoluer leur mise en œuvre sur des grands bâtiments américains.

Ⓐ *La façade à remplissage* s'appuie de manière linéaire sur la dalle. En général, le remplissage est réalisé par une maçonnerie en briques. Les longueurs de mur correspondent à la logique de la travée et s'intercalent entre les descentes de charges. Depuis l'introduction de l'isolation, cette expression de façade n'est plus lisible et n'a plus sa raison d'être.

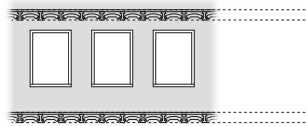
Ⓑ *La façade posée* ou le *Grand module* est constitué d'éléments de grandes tailles. Chaque élément est préfabriqué et mis en place tel une poutre. L'élément s'appuie en deux points sur la dalle et se cale à d'autres en périphérie. Il recouvre toute la travée structurelle et est placé à l'aide d'un système de levage ancré sur un des étages supérieurs de la construction. Les éléments sont agencés par niveau selon un ordre de montage rappelant une pose de tuiles.

Ⓒ *La façade rapportée*, est constituée d'éléments de taille et de formes différentes rapportées et assemblées sur la façade. Il existe une hiérarchie entre les verticales et les horizontales. Les éléments peuvent recouvrir un ou plusieurs niveaux. Ils sont soulevés par des petites grues moins importantes. La façade se monte alors selon ses propres règles, indépendante de la travée structurelle et de la position des dalles.

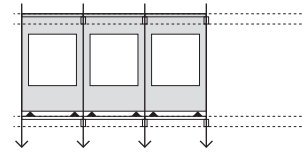




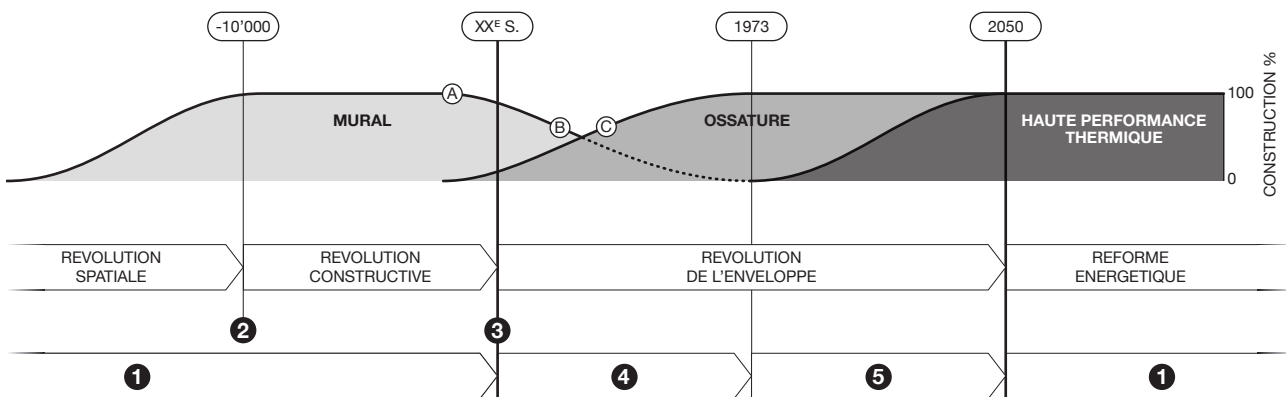
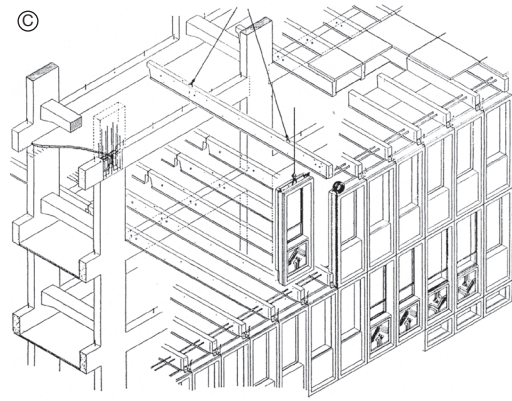
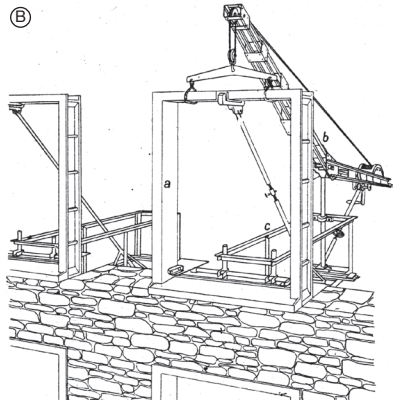
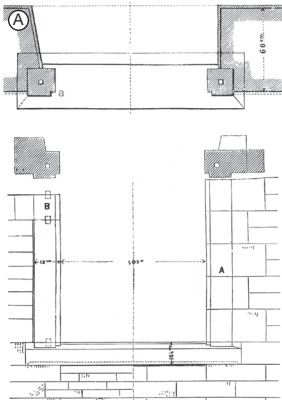
EMBRASURE EN PIERRE



SYSTEME POL ABRAHAM



SYSTEME BARETS



- REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN**
- ① ETAT NORMAL
  - ② ANOMALIES DANS LE MODELE
  - ③ CRISE DU MODELE
  - ④ MODELES DE REVOLUTION
  - ⑤ NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

**Développement des éléments préfabriqués porteurs dans le mur de façade (LAURE EPFL)**

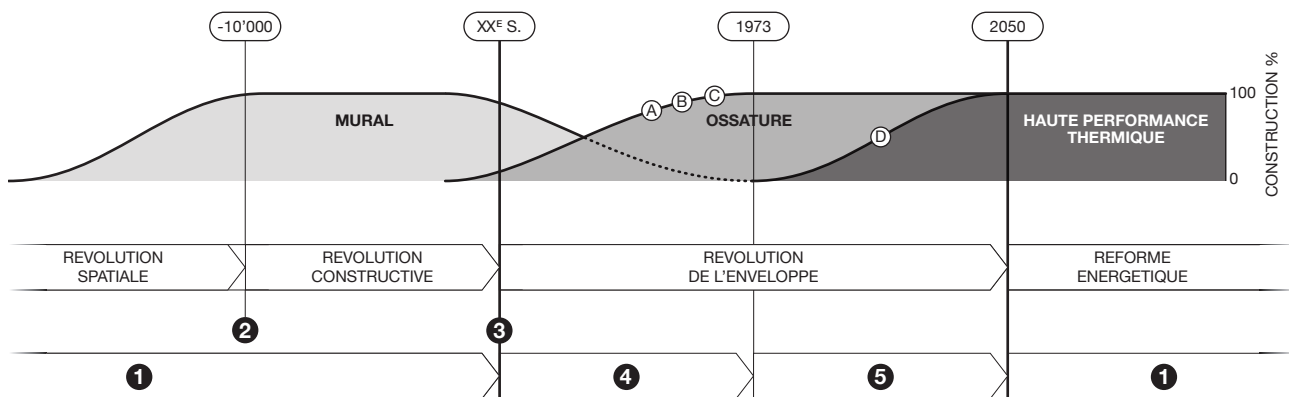
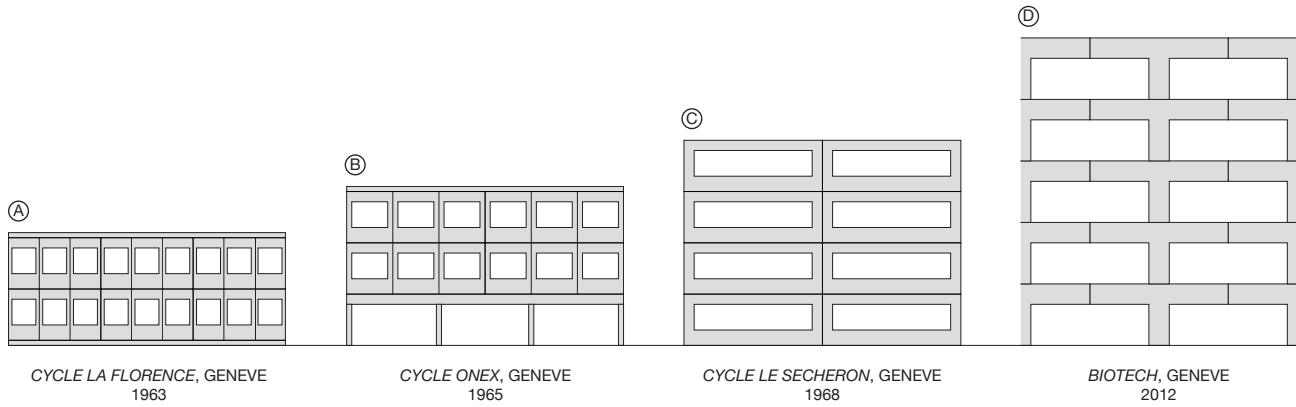
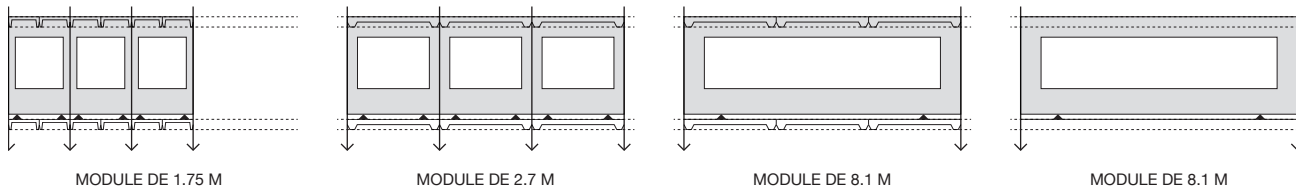
Ⓐ Musso, Petzinka, Roudolphi, *Refurbishment Manual*, Edition Detail, Munich 2009, p. 140  
 Ⓒ T. Koncz, *Handbuch de Fertigteiltbauweise*, Bauverlag GMBH Wiesbaden-Berlin, Berlin 1962, p. 367  
 Ⓔ P. Abraham, *Architecture préfabriquée*, Dunod, Paris 1946, p. 56

# LES ELEMENTS PREFABRIQUES ET PORTEURS DE FAÇADE

J'explique le développement de la façade porteuse en béton préfabriqué par l'analyse des éléments préfabriqués qui ont une fonction statique. Les pierres de taille des murs de façade dans l'architecture vernaculaire étaient les premières pièces préfabriquées. Celles qui m'intéressent s'articulent autour de la fenêtre, le linteau, les jambages et la tablette. En Suisse, ces trois pièces se retrouvent aujourd'hui sous une forme plus abstraite dans un élément préfabriqué en béton. Dans les nouvelles usines de préfabrication des pays émergents, la plupart de ces détails ont été abandonnés. En effet, les éléments sont en grande partie réalisés par des chaînes de production automatisées qui ne peuvent plus assurer ce type de complexité. Ces dispositions sont un appauvrissement de la construction qui laissent de côté la rationalisation de l'architecture pour servir des desseins liés à l'économie de moyens.

Le linteau reprend les charges et les transmet aux jambages. Les charges sont ensuite transmises au mur. Quelquefois, les jambages s'appuient sur une tablette, qui répartit les charges de manière linéaire. La tablette a surtout un rôle d'étanchéité et de protection de la tranche du mur exposée aux intempéries. Dans le cas du mur en pierres (A), les éléments de jambages sont des pièces de petite taille encastrées dans le mur ; lui-même est construit de pierres en général plus ordinaires. Quant à la brique, sa modularité permet la mise en œuvre de jambages simplifiés. Sur ce même principe, l'architecte P. Abraham invente, pour la reconstruction d'un quartier à Orléans en 1945, un système basé sur un cadre en béton préfabriqué réunissant le linteau, les jambages et la tablette en une pièce (B). La complexité de sa mise en œuvre constituait le principal inconvénient de son système. En effet, il fallait maintenir en équilibre la pièce préfabriquée durant le temps de sa consolidation dans le mur. C'est un système hybride, mêlant technologie machinée et maçonnerie traditionnelle. L'ingénieur J. Baretts développe un système sur le même principe<sup>1</sup>. Linteau, jambage, tablette et allège forment un tout, soit un module (C). Les modules sont agencés les uns par rapport aux autres et le mur en maçonnerie disparaît. Les poutres préfabriquées reposent sur les clavages, et des dalles sous forme de plaques sont posées sur les poutres. Les descentes de charge transitent sur chaque extrémité des panneaux. Elles sont ponctuelles et rapprochées. Le linteau perd son rôle car les charges de la dalle sont transmises directement par les poutres sur les jambages ; il sert de liaison aux deux jambages et à maintenir la pièce préfabriquée durant la construction. J. Baretts développera son système de dalles-poutres et proposera à la place des dalles nervurées préfabriquées avec un système de grands caissons de 8 m de portée. Il simplifiera les détails d'assemblage entre les dalles et les murs. La production et la manutention des pièces en seront très avantageuses. Ce nouvel assemblage dalle-mur aboutira à un scellement dans la partie haute du panneau.

1 J. Baretts, *Les procédés et l'organisation Baretts*, *Journal de la construction Suisse Romande*, vol. 36, N° 9, 1962, pp. 43-51



- REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN**
- ① ETAT NORMAL
  - ② ANOMALIES DANS LE MODELE
  - ③ CRISE DU MODELE
  - ④ MODELES DE REVOLUTION
  - ⑤ NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

**Développement du module porteur à Genève (LAURE EPFL)**

- Ⓐ Dalla rivista "Industria Italiana del Cemento", *Industrializzazione e prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, A.I.T.E.C., Rome 1966, pp. 94-95
- Ⓑ idem, pp. 228-231



# LES CYCLES D'ORIENTATION A GENEVE

Le développement de la façade porteuse en béton préfabriqué à Genève trouve son origine dans l'application du système Barets<sup>1</sup>. L'entreprise Prelco débutera une production d'éléments de façade porteurs sous la licence de ce procédé et l'adaptera durant une dizaine d'années de manière indépendante et originale. Suite à son expérience lors de la construction de certains logements dans la ville satellite d'Onex, elle se voit confier la construction et l'équipement des cycles d'orientation du canton de Genève<sup>2</sup>. Grâce à la construction de ces cycles, l'entreprise développera, dans les années 60 et 70, un savoir-faire spécifique à la fabrication d'éléments de façade porteurs préfabriqués. La raison qui explique le choix de ce système parmi d'autres est vraisemblablement lié au besoin de dalles d'une portée de 8 m<sup>3</sup>. Les dimensions des classes des cycles, aux surfaces d'environ 70 m<sup>2</sup>, réclamaient de telles portées. Prelco était la seule entreprise à savoir les construire en préfabrication dans la logique du système Barets. Le premier cycle: "la Florence" fut réalisé selon les principes de J. Barets. Les éléments ont été coulés à pied d'œuvre, sous des abris forains. Ce principe d'organisation dans le contexte des cycles d'orientation était rendu difficile par son installation de chantier relativement importante et sa nécessité d'être souvent déplacée. Le besoin de construire rapidement l'ensemble de ces établissements scolaires poussa alors la centralisation des installations de chantier. Cette installation de chantier foraine décentralisée s'implanta près d'une gravière au Bois-de-Bay à Satigny<sup>4</sup>. Un programme de productions groupées fut alors établi englobant trois cycles sur trois lieux différents. Chaque nouvelle production apporta une amélioration. Cette nouvelle condition de préfabrication s'était distancée du procédé que J. Barets avait mis en place. La nouvelle situation poussera à produire des éléments en fonction des contraintes de transport. L'élément de façade mesurait alors 1.75 m (A) et correspondait à la trame imposée par les équipements scolaires de l'après guerre en France. Lors de la deuxième volée de construction des cycles, les éléments seront agrandis et passeront à 2.7 m (B). Les grues, devenues plus puissantes, permettront d'allonger encore les éléments à 8.1 m (C). Les modules de dalle passeront de 0.9 m à 2.7 m. L'agrandissement des formats de panneaux engendrera une réduction du nombre d'éléments par bâtiment. A partir des années 70, le panneau de façade porteur est structurellement abouti et correspond à la travée d'une ossature en béton optimisée. Les descentes de charges s'effectuent dans les extrémités du panneau préfabriqué, ses jambages. L'élément est posé sur la dalle inférieure et consolidé par la dalle supérieure. Cette typologie de façade repose donc sur le principe de la *façade posée* ou du *Grand module*.

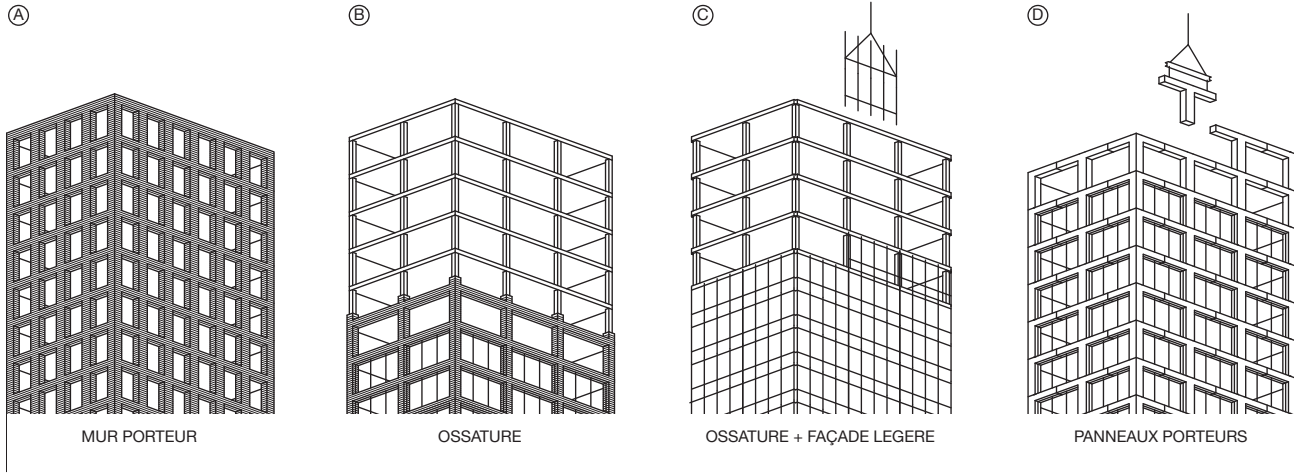
Dans les milieux urbains actuels, l'usage du *Grand module* est préféré pour des immeubles de logements et de bureaux de taille moyenne. En général, la place au pied de bâtiment est limitée, l'accès difficile et le stockage de matériaux problématique. La préfabrication en *Grand module* (D) est donc une forme très rationnelle, car elle optimise le travail sur le chantier par la réduction du nombre d'éléments, des mouvements et de l'espace de manutention.

1 J. Barets, *Les procédés et l'organisation Barets*, *Journal de la construction Suisse Romande*, vol. 36, N° 9, 1962, pp. 43-51

2 I. Charollais, J. M. Lamunière, M. Nemeč, *L'architecture à Genève 1919-1975*, Edition Payot, Lausanne 1999, pp. 618-621

3 J. Bovet, *La préfabrication lourde à Genève*, *Bulletin technique de la Suisse romande*, vol. 89 1963, p. 194

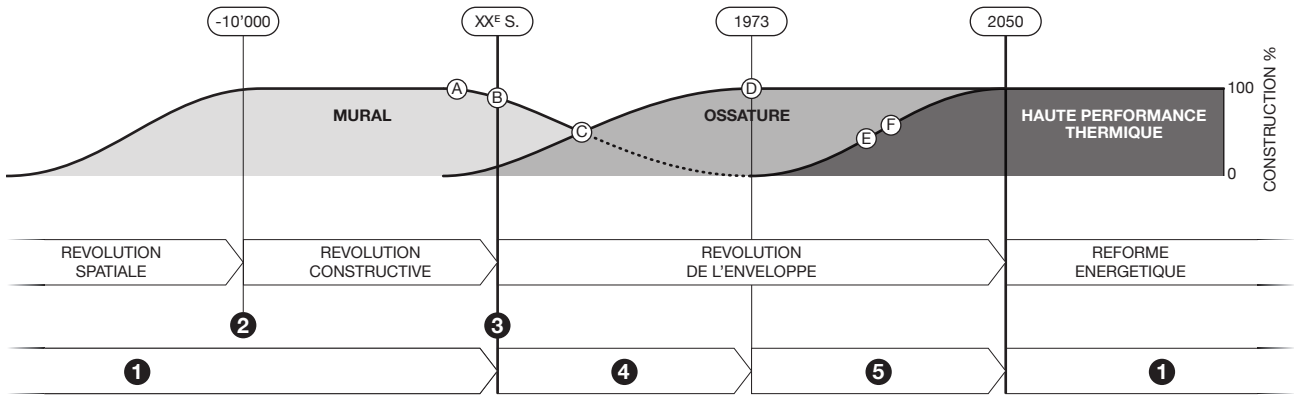
4 Dalla rivista "Industria Italiana del Cemento", *Industrializzazione e prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, A.I.T.E.C., Rome 1966, pp. 226 et 227



OSSATURE + PANNEAUX  
BANQUE PICTET, GENEVE, 2005



PANNEAUX PORTEURS THERMIQUES  
BIOTECH, GENEVE, 2012



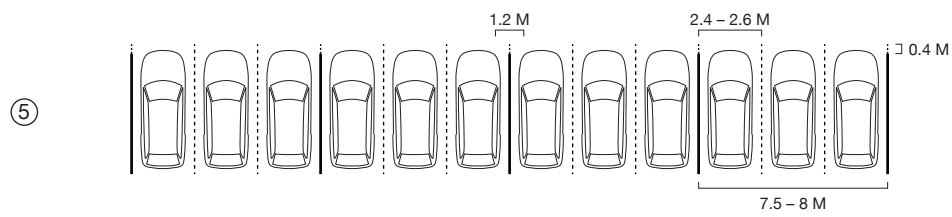
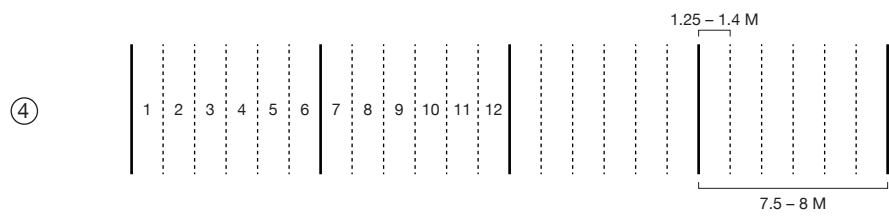
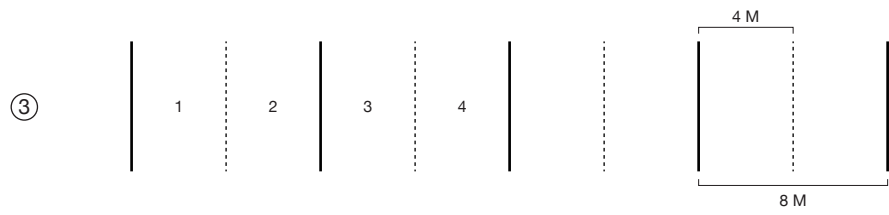
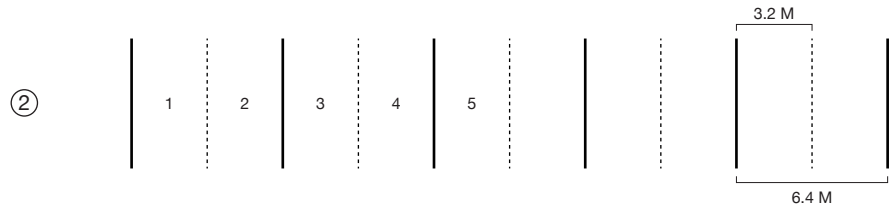
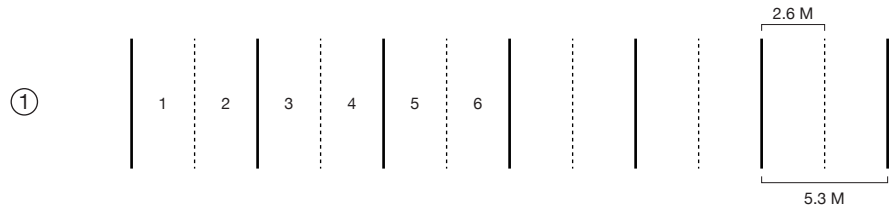
- REVOLUTION SCIENTIFIQUE SELON T. S. KUHN
- 1 ETAT NORMAL
  - 2 ANOMALIES DANS LE MODELE
  - 3 CRISE DU MODELE
  - 4 MODELES DE REVOLUTION
  - 5 NOUVEAU MODELE (NOUVEAU PARADIGME)

Evolution : du mur porteur au panneau porteur thermique (LAURE EPFL)

# DEVELOPPEMENT DES PANNEAUX PORTEURS THERMIQUES

A la fin des années 70, la construction de l'ensemble des cycles et de certains collèges à Genève est terminée. A travers ces bâtiments, le développement statique des façades est optimisé et pratiquement abouti. La nouvelle conjoncture orientera la préfabrication en béton vers de nouveaux marchés. Trois usines de préfabrication fusionneront en Suisse romande. C'est un moment de nivellement des technologies et de transfert de savoir-faire. Les nouveaux marchés seront alors des immeubles de logements isolés thermiquement. Prelco développera le panneau porteur isolé ou, autrement dit, le panneau sandwich. Dans l'architecture de logement, les travées structurales sont plus serrées que celles des écoles. Contrairement aux écoles, ce type de façade est organisé avec des espaces extérieurs, tels que balcons et loggia qui interrompent la continuité du mur. Les éléments deviennent plus petits, plus découpés et plus morcelés. L'innovation se fera essentiellement dans les solutions techniques intelligentes des calepinages. Cette période est marquée par le développement des bétons de parement. Ces éléments sont conçus pour protéger l'isolation et sont devenus des éléments esthétiques qui ont une influence directe sur une nouvelle image de l'architecture. En 2005, dans la réalisation de la Banque Pictet à Genève (E), le *Grand module* en façade est repris par le Bureau Bassi-Carella. Ce bâtiment est implanté au centre de la ville dans un milieu urbain. De forte densité, il abrite des bureaux et est construit sur un parking souterrain. Le *Grand module* concorde avec l'ossature en béton optimisée à des travées de 8.10 m. Cette trame économique se marie parfaitement à celle du parking. La disposition des éléments préfabriqués, soit meneaux et allèges, renoue avec le savoir-faire développé lors de la construction des bâtiments scolaires dans les années 70. Le cas de la banque Pictet est une image de ce que pourrait être, dans le futur, la préfabrication en béton. Dans ce projet de transition, les éléments n'ont cependant qu'un rôle de parement. En revanche, dans le récent projet de la Biotechnologie (F) développé par le même bureau Bassi-Carella, les *Grands modules* sont constitués d'un mur sandwich porteur et isolé. La grande taille du bâtiment pousse à des stratégies de rationalisation et à une efficacité de la construction. Précisément, dans la préfabrication, les éléments sandwich sont optimaux s'ils ont une grande portée, idéalement correspondante à l'ossature en béton. La rationalité du *Grand module* le rend plus adapté, économiquement, à la façade de bureaux qu'à celle de logement.

S'il l'on résume l'histoire de la façade porteuse (A)-(F), on peut dire qu'elle a subi une mutation irréversible. A l'origine de l'architecture, ses propriétés statiques et thermiques étaient confondues. Dans la première période de l'architecture moderne, les aspects statiques ont été perfectionnés. Ensuite, les aspects thermiques ont été à leur tour améliorés. Aujourd'hui, les fonctions structurelle et thermique du mur sont séparées. De cette manière, chaque domaine respectif peut être traité au meilleur de ses qualités. Les performances ainsi recherchées dictent une rationalisation et une économie de la matière et des moyens.



**Principe des travées structurelles dans le logement et les bureaux (LAURE EPFL)**

- ①② Travée logement
- ③④ Travée et sous trame bureaux
- ⑤ Parking

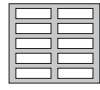
# STRUCTURE ET FAÇADE

Avec le savoir actuel de la thermique, une façade, sous nos latitudes, doit présenter une obstruction d'environ 40-60%<sup>1</sup>. Cette obstruction protège, pendant les périodes chaudes, des rayons ultraviolets (UV) qui, une fois dans l'espace intérieur, se transforment en rayon IR et dégagent de la chaleur. Pour exploiter ce phénomène dans le bon sens, il est important de dimensionner les ouvertures de façon optimale. Pour bénéficier des apports thermiques en hiver, elles doivent être plus grandes au sud et plus petites au nord, afin de réduire les déperditions de chaleur. On peut donc dire de manière générale qu'une façade doit contenir une obstruction d'environ 50%. Cette matière opaque doit être maintenant répartie de manière rationnelle sur la surface de la façade. Celle-ci représente un potentiel de stockage de chaleur important qu'il faut exploiter, car elle participe à la régulation passive du climat intérieur du bâtiment.

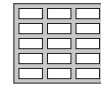
Il subsiste donc assez de "surface opaque" pour y intégrer la statique du bâtiment. Une descente de charge correspond à un fragment de mur de 30 cm sur une épaisseur de 14 cm. Elle ne doit pas correspondre impérativement à l'ossature interne du bâtiment, elle peut suivre sa propre logique. La hauteur statique d'une dalle supporte des descentes de charge distantes d'au maximum 8 m. Au-delà de cette portée, l'usage de sommiers est nécessaire et engendre un surcoût dans la construction. De plus, ceux-ci entrent en conflit avec la réservation du caisson de store. Dans les bâtiments de grande dimension, la structure de la façade concorde, en général, avec celle de la structure interne. Lors d'une grande répétition d'éléments, les deux logiques de structure finissent par se confondre. Par conséquent, la longueur statique la plus rationnelle est de 8 m pour ce type de bâtiment ③.

En architecture, cette mesure est appliquée pour les trames de bureaux, soit des multiples de sous-trame de 1.25 m à 1.40 m ④. La même trame correspond à un multiple de trois places de parking soit de 2.4 m à 2.6 m ⑤. Ces dimensions sont donc optimales et économiques des points de vue statique et fonctionnel. Dans les typologies de logements, les unités spatiales, soit les chambres, sont, en général, basées sur une trame de 2.6 m à 3.2 m ① ②. La concordance avec les places de parc en sous-sol est possible sur les petites trames par contre, sur les grandes, les descentes de charges doivent, au rez-de-chaussée, être reportées sur des *voiles* structurels qui reprennent la trame des places de parc. Pour les projets à haute densité et mixité programmatique, logements-bureaux-parking, les trames des descentes de charges ne concordent pas forcément. Il faut alors prévoir des *voiles* qui rattrapent les différentes logiques structurelles aux niveaux des étages concernés. Dans tous les cas, les descentes de charges en façade peuvent déroger aux règles internes de la structure. Mais une obstruction de 50% exclut une expression de type ossature en élévation.

1 Société suisse des ingénieurs et architectes, *Bâtiments vitrés – Confort et efficacité énergétique*, cahier technique 2021 SIA, Zurich 2002, p. 5

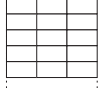


2 OUVERTURES

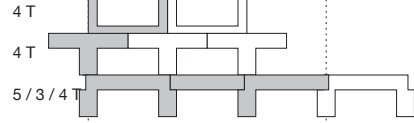


3 OUVERTURES

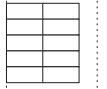
16M



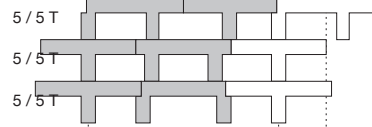
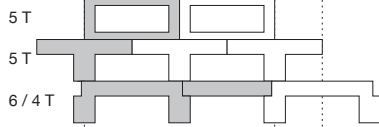
TRAVEE 5.3M



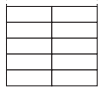
12.8M



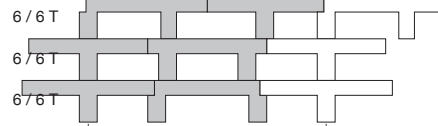
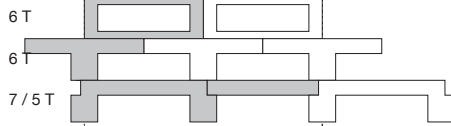
TRAVEE 6.4M



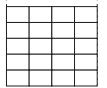
16M



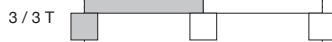
TRAVEE 8M

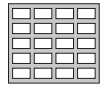


16M

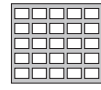


TRAVEE 4M / 8M

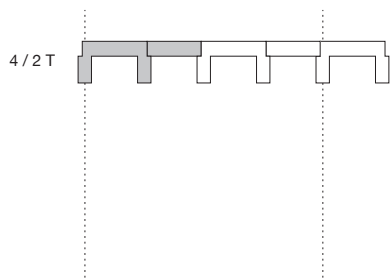
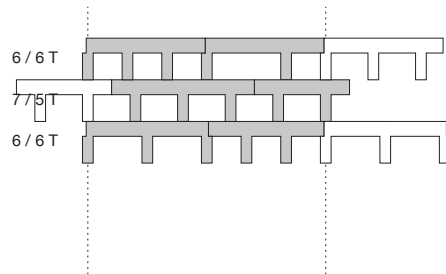
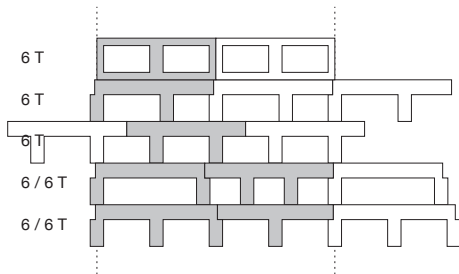
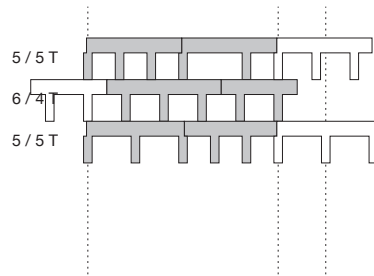
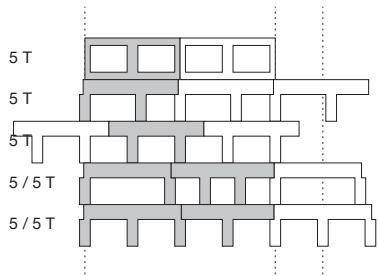
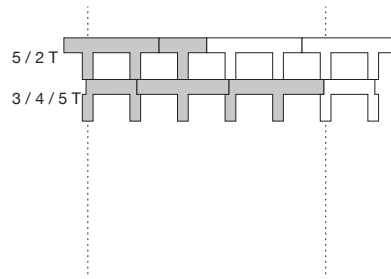
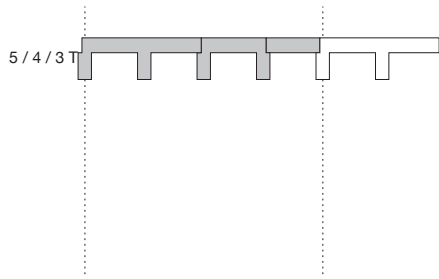




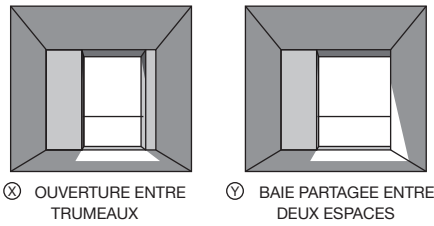
4 OUVERTURES



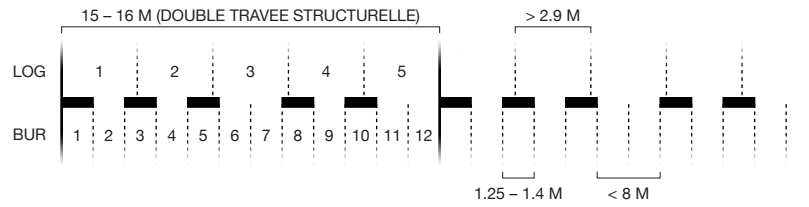
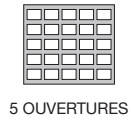
5 OUVERTURES



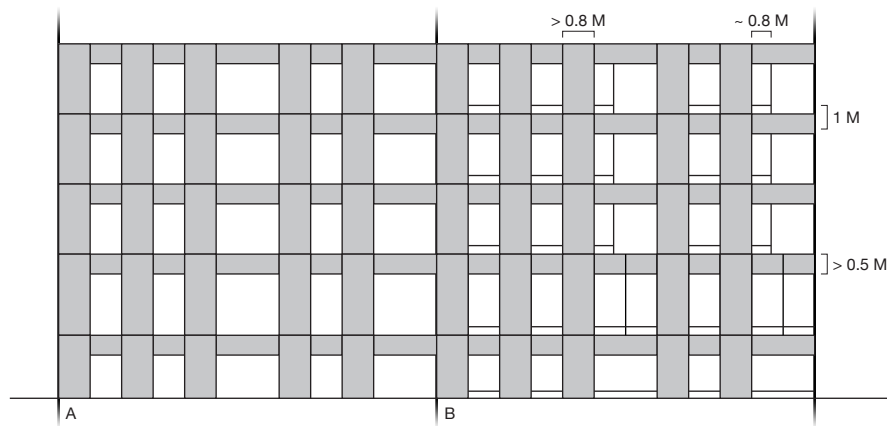
①



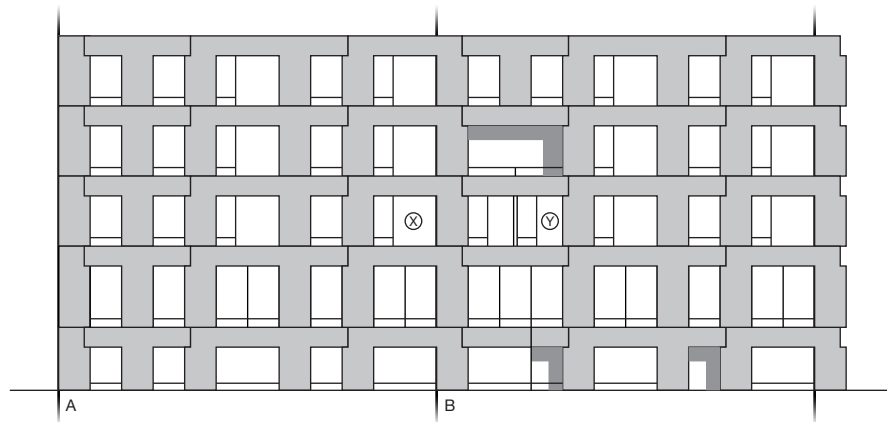
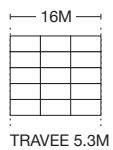
②



③



④



**METHODE POUR LE CALEPINAGE**

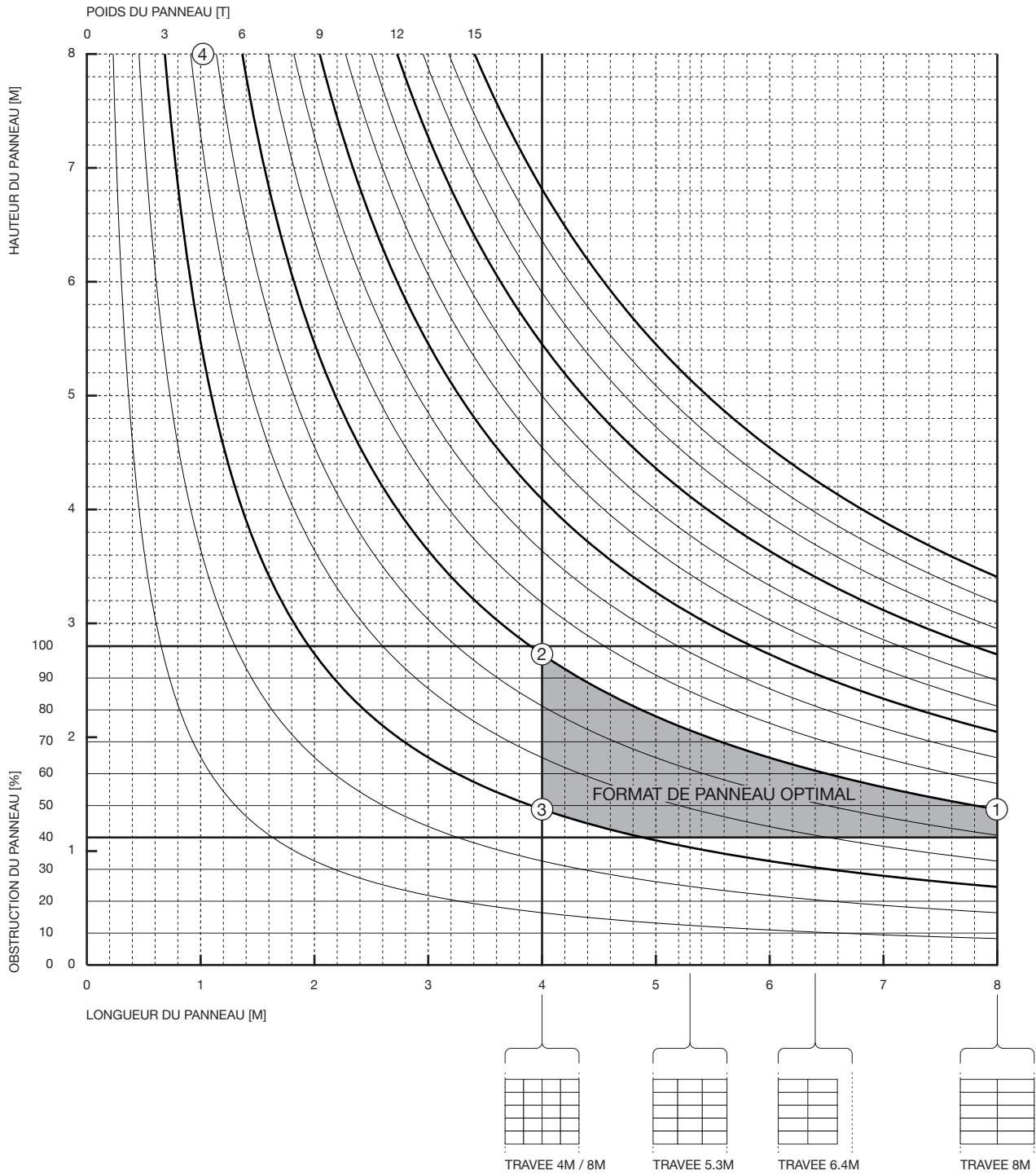
- ① ESPACE INTERIEUR PERÇU
- ② CONCORDANCE DES UNITES SPATIALES / MISE EN PLACE DES TRUMEUX (EN PLAN)  
MINIMUM 2 TRUMEUX PAR DOUBLE TRAVEE
- ③ A. DESSIN DES TRUMEUX (ELEMENTS EN BETON), B. DESSIN DES BAIES ET LEUR CADRE
- ④ A. DESSIN DU CALEPINAGE (2-4 ELEMENTS PREFA PAR DOUBLE TRAVEE), B. EXCEPTION / DEVELOPPEMENT



# CALEPINAGE

Le calpinage est l'agencement des éléments sur la façade ou le découpage en modules de celle-ci. La logique constructive des façades en béton préfabriqué porteur a évolué depuis leur début. L'architecture en béton préfabriqué des années 60 est caractérisée par la similitude et la répétition des éléments. Cette monotonie s'explique par le fait que le module sortait d'un moule unique. En effet, les façades étaient dessinées selon le module réalisable. Le panneau préfabriqué donnait la règle à la composition de l'élévation et non le contraire. Aujourd'hui, la situation s'est inversée. Lors de la composition de la façade, l'architecte choisit un principe de famille de modules. Le moule est construit en fonction de la famille des éléments choisis (pp. 66-67). La taille des bâtiments, plus petits qu'à l'époque, explique ce changement : les séries de pièces sont plus petites, un moule a donc une durée de vie plus courte. Par conséquent, un moule peut être constitué d'une matière moins résistante et plus adaptable. Un moule malléable offre la possibilité d'être modifié et adapté à des variations du module-type.


La façade en béton préfabriquée et porteuse du passé donnait l'image d'une disposition d'éléments alignés de manière mécanique dont la logique était détachée de l'ossature intérieure. Aujourd'hui, l'image de la façade n'est plus liée à une rigueur issue de la production, mais à l'agencement harmonieux des pièces. L'expression de la façade passe d'une image statique à un aspect tectonique ④, c'est à dire une composition d'éléments constructifs placés les uns avec les autres. Cette nouvelle esthétique résulte principalement de l'introduction de l'isolant, qui pousse la façade à être plane et non plus nervurée ou en relief. Le dessin des façades ne peut plus se développer en profondeur mais doit suivre les règles de la planéité, la façade redevient murale comme celle connue avant la modernité. Dans la façade en béton préfabriquée porteuse, deux facteurs de composition sont à prendre en considération. Il s'agit de la relation entre la découpe du panneau ④ et la disposition des ouvertures ②. De manière générale plus l'ouverture est située en hauteur, plus la lumière peut pénétrer en profondeur dans la pièce ⊗ ⊙. La partie basse de l'ouverture amène peu de luminosité mais de la chaleur qui est stockée dans la dalle. Durant les périodes estivales, il faut descendre le store pour se protéger de la chaleur, ce qui réduit la lumière qui pénètre dans l'espace. On distingue des différences conséquentes entre l'ouverture des locaux de bureaux et celles des logements. Pour les bureaux, la fenêtre horizontale est plus adaptée car les cloisons intérieures sont souvent mobiles et secondaires, et donc des trumeaux ne sont pas nécessaires. En revanche, les cloisons dans le logement sont en général permanentes et réclament des trumeaux. Par conséquent, les ouvertures auront plutôt une orientation verticale favorisant un rapport visuel entre l'espace intérieur et l'espace public. Les pièces sont plus petites, car elles doivent s'intercaler avec les espaces extérieurs et ouverts, tels que les loggias.



Abaque pour l'optimisation de panneaux porteurs en béton préfabriqué (LAURE EPFL)

# OPTIMISATION DES PANNEAUX

La taille optimale d'un panneau est de 8 m de portée avec une obstruction de 50 % ①. Son poids correspond à un panneau plein de 4 m de long ②. Sachant que certaines opérations sont doublées, par exemple : décoffrage, stockage, chargement, transport, déchargement, pose, réglage, étayage, ancrage ; le plus petit élément ne doit pas être inférieur à 4 m. En effet, ceci conditionnerait une augmentation du temps de travail et provoquerait un surcoût considérable. Un panneau de 4 m de long, avec une obstruction de 50% ③, représente, sur une façade, le double d'éléments par rapport au nombre idéal. Dans les projets de logements, la découpe idéale ne peut souvent pas être atteinte. Le plus petit trumeau ne devrait de préférence pas être inférieur à 0.8 m, car les pertes thermiques dans les raccords des fenêtres sont proportionnellement trop importantes par rapport à la résistance thermique offerte par le mur.

Le poids d'un élément de 8 m de long avec une obstruction de 50%<sup>1</sup> est de 6 t. Ce poids correspond au levage qu'une grue de chantier traditionnelle peut élever à une distance respectable. Si l'élément excède ce poids, alors il faut faire appel à une grue plus puissante ou mobile, qui engendre un surcoût. Opérant dans la fourchette de 3-6 t par élément ④, les installations de chantier habituelles suffisent. L'exécution des joints entre les panneaux est une opération qui peut s'avérer délicate sur un chantier, en partie parce que les entreprises qui posent les panneaux ne sont pas nécessairement celles qui les ont fabriqués. Les joints représentent donc une forme de risque pour la qualité d'exécution d'un bâtiment. Deux stratégies s'imposent. Plus l'élément est grand, moins il y a de joints linéaires. Si les joints de raccords des fenêtres sont superposés aux joints du panneau, alors l'ensemble des joints est réduit au maximum. Les éléments auront alors des formes en  (pp. 66-67).

## Conclusion

Suite à la crise actuelle des ressources, nous progressons vers une optimisation thermique et une optimisation statique traduites par la réduction de la matière. Dans la construction, l'optimisation thermique se fait essentiellement en façade tandis que l'optimisation statique est visible sur l'intégralité de la structure du bâtiment. Une façade, sous nos latitudes, doit avoir une obstruction de 50% pour empêcher la surchauffe. Cette surface opaque peut contenir une masse thermique contribuant à la régulation passive de la chaleur de l'espace intérieur et ainsi libère de tout mur porteur. La masse thermique de la façade peut être maintenant exploitée pour ses propriétés statiques et intégrer les descentes de charges. Dans la préfabrication, le module idéal est le *Grand module*. Sa surface extérieure est aujourd'hui plate à cause de la couche d'isolation continue. La nouvelle esthétique de cette architecture résidera dans l'agencement harmonieux des éléments constructifs.

1 SIA 2021, *Bâtiments vitrés – Confort et efficacité énergétique*, cahier technique 2021 SIA, Zurich 2002, p. 5



# MATERIALITE

# METAMORPHOSE DE LA MATERIALITE

D'un point de vue esthétique, le deuxième changement de la révolution de l'enveloppe est visible dans les bâtiments ordinaires en béton préfabriqué par la métamorphose de leur matérialité. Il s'exprime par une nouvelle esthétique détachée de la matière brute de construction, mais liée à la sensibilité de son auteur. De manière générale, on peut dire qu'un objet possède trois caractéristiques distinctes : sa forme, qui peut être identique à celle d'un autre objet, sa matière, qui le constitue, et sa matérialité, qui le différencie des autres éléments. La matérialité est l'ensemble des qualités sensorielles qui émane d'une matière. Dans le cas du béton, sa préparation repose sur des recettes plus ou moins complexes et élaborées. Au début des années 70, le béton va connaître une renaissance. Dans la préfabrication, le béton va dépasser son simple impératif chimique/construc-tif. Il va évoluer d'une masse grise à des matières subtiles issues de recettes plus pointues offrant un spectre varié de couleurs, allant du plus petit grain de ciment à la nature du plus gros granulat. Son expression dans les façades contribue maintenant à l'identité même de l'objet architectural.

## Le béton

Introduit voilà soixante ans, le béton est devenu un matériau familier très fréquemment utilisé dans la construction. Son image dans nos mémoires est souvent associée à une couleur grise ainsi qu'une expression marquée par les traces du coffrage, nécessaire à sa mise en œuvre. Mais si nous regardons un béton et essayons de mieux le comprendre alors nous pourrions différencier le béton d'un élément porteur et le béton d'un élément de revêtement. Une autre différence peut être comprise par la qualité de finition résultant d'une technique de mise en œuvre bien précise, ou encore d'une teinte et d'une couleur rappelant une époque définie de l'histoire. Malgré l'image, dans nos mémoires, d'une matière grise et monotone, le béton est employé dans diverses circonstances et peut, par conséquent, porter des matérialités diverses. Ce qui nous intéresse, c'est cette ambivalence entre matériau brut de construction et matériau noble de finition. Ce que nous voulons approfondir, comprendre et mieux exploiter, c'est la richesse esthétique des bétons. Un choix esthétique est aussi une décision architecturale.

Parmi les bétons, il faut différencier le béton coulé *in situ* du béton préfabriqué. Les techniques de coulage sont différentes. L'une est réalisée avec des coffrages verticaux et l'autre avec des coffrages horizontaux. La préfabrication est choisie lorsqu'il est plus avantageux de couler les éléments à l'horizontale. Depuis son invention, cette méthode a évolué. Dans les années 60, elle a dû répondre à une production de masse, une fabrication en série, et la chaîne de montage se standardise. Elle se réoriente après le choc pétrolier. Ses nouveaux attraits correspondent à des éléments complexes qui intègrent l'isolation thermique et la couche de revêtement extérieur. Certains éléments, comme les dalles, seront abandonnés par ce mode de production, en effet leur fabrication n'est pas plus rationnelle en préfabrication, que par coulage *in situ*.

L'organisation du chantier est devenue, elle aussi, plus complexe et hybride et réclame de nouveaux critères de rationalité. Celle-ci n'est plus liée à un produit ou un système, mais à un ensemble de différents types de produits. La matérialité d'un béton de construction n'a aujourd'hui plus d'importance, puisqu'il n'est plus visible. La nouvelle *continuité thermique* oblige un retrait de la partie porteuse de la structure du mur, qui ne sera plus visible en façade. Cette strate n'a plus qu'une fonction structurelle. Elle est réalisée en un béton ordinaire, sans décision particulière sur la qualité esthétique. Sa couleur sera grise. Cette teinte est issue du ciment gris qui est obtenue lors de sa fabrication et du mélange entre le calcaire et l'argile. Notre observation se portera donc uniquement sur des bétons visibles des murs en béton préfabriqués porteurs.

### La teinte

Le souci archaïque dans la préfabrication est de garantir une homogénéité de teinte dans les éléments en béton, car des différences en façade seraient mal venues. Les variations de teintes dans les bétons peuvent avoir de multiples causes. D'une part, l'inexactitude des proportions d'un mélange ou d'une recette de béton, d'autre part, les conditions climatiques changeantes pendant la préparation du béton, son coulage ou durant son durcissement. Dans les années 60, les appareils, malaxeurs et godets d'engins étaient utilisés de manière plus grossière. Les bonnes proportions étaient moins bien respectées qu'aujourd'hui. La qualité esthétique du béton était moins bonne car la quantité d'humidité dans les matières et les températures durant la prise du béton étaient moins bien contrôlées. Pour effacer les différences de teintes, on badigeonnait les éléments préfabriqués d'un enduit blanc<sup>1</sup>. Au milieu des années 60, à Genève, on s'oriente vers des ciments clairs (ceux à base de clinker clair) en choisissant parmi les ciments gris, car les teintes claires réduisent les différences de teinte. De plus, on économise l'application d'enduit. Ceux-ci seront plus tard remplacés par les ciments blancs venant de différents pays d'Europe. L'éclaircissement des ciments est le premier paramètre qui sera mis en place lors du développement de la matérialité des bétons esthétiques en préfabrication. A cette période, ils sont encore des bétons porteurs. On passe du gris au gris clair.

### L'abrasion

L'usage primaire de l'abrasion dans la préfabrication a été d'effacer les traces issues du coffrage sur l'élément fini. Les premières abrasions appliquées seront les bétons dits lavés ou balayés. Mais celles-ci seront faites uniquement sur la partie supérieure du moule, avant durcissement du béton. En général, la face supérieure du moule est la face intérieure du mur dans l'édifice. Il existe néanmoins des exemples qui montrent le contraire. On retient les projets du promoteur suisse-allemand E. Göhner. Les premiers bétons à abrasion<sup>2</sup> sur la face inférieure du moule sont les bétons ondulés dits "cannelés et cassés", autrement dit les bétons *Rudolph*, du nom de l'architecte qui a appliqué ce principe aux Etats-Unis. Cette technique n'était pas liée directement à la préfabrication, car elle a aussi été utilisée dans le coulage de mur *in situ*. La première abrasion liée à un procédé propre à la préfabrication a été le sablage<sup>3</sup>. Il est inspiré par le principe de sablage utilisé en serrurerie. Ce traitement s'effectue une fois l'élément durci. Plus tard, les inventions des peintures de désactivation sont appliquées en fond de coffrage<sup>4</sup>. Elles permettent simplement de retarder la prise de la

1 Cycles d'orientation de Genève : La Florence 1962, Budé 1963, Marais 1964, Pinchat 1965, Renard 1966

2 Cycles d'orientation de Genève : Voirets 1967, Claparède 1968, Grandes-Communes 1969, Sécheron 1970

3 Cycles d'orientation de Genève : Coudriers 1971, Foron 1972

4 Cycles d'orientation de Genève : Vuillonex 1975

laitance du béton qui est en contact avec le coffrage. Ce système était la technique la moins onéreuse. Ces abrasions de quelques millimètres de profondeur permettaient ainsi d'effacer les traces de coffrage sur l'élément et mettaient en avant la nature et les propriétés du sable et du granulat. On l'utilisa beaucoup comme nouveau moyen d'expression.

### Les granulats

L'importance de la nature du granulat se pose à partir du moment où l'abrasion s'effectue sur la surface du béton, car le sable et le granulat deviennent visibles. Cette révélation du granulat, poussa les architectes à choisir des granulats pour leurs propriétés esthétiques (granit, marbre, basalte, porphyre, quartz, etc). Les premiers granulats importés à Genève furent les granulats de la Plaine de l'Ain<sup>1</sup>. Il s'agit d'un granulat alluvionnaire roulé et varié, mais de teinte plus claire et plus chaude que le granulat local.

### Nouvelle cuisine des bétons

Suite au choc pétrolier de 1973, une réaction se produit dans la construction. Les premiers règlements thermiques sur l'enveloppe du bâtiment sont mis en place. C'est à partir de cette date que sont introduits systématiquement les isolants dans nos murs de façades. La nouvelle composition du mur pour l'avenir est constituée d'un porteur, d'un isolant et d'un revêtement. Le porteur est toujours conçu en béton ordinaire tandis que le parement sera un béton esthétique. Les premiers bétons de parement seront des mélanges de granulats à couleurs différentes. Ils proviendront de carrières des Alpes et d'Italie du nord. Les premiers mélanges de béton à granulats importés sont en général, des granulats de couleur monotone, sans veine ni variation dans leur couleur. L'image de ces bétons rappelle les mélanges de confettis. L'introduction des pigments permet de travailler la couleur en profondeur. Deux niveaux en particulier peuvent être retenus : celui des granulats et celui des sables fins alliés aux ciments et teintés par des pigments<sup>2</sup>.

### Les moules

La conséquence du changement constructif dans le cadre de la préfabrication de mur en béton, est une surprofondeur des moules de coffrage. Aujourd'hui, le perfectionnement des surfaces de coffrage s'affinent et la qualité esthétique des bétons est devenue parfaitement lisse<sup>3</sup>. A la fin des années 70, les grands programmes de logements sociaux voient leur achèvement. La production dans la préfabrication ne sera plus axée sur la production de masse, mais s'orientera vers une échelle plus petite, celle de l'immeuble d'habitation unique. Ce changement aura un impact sur les techniques de moule. Les moules en acier et en béton seront remplacés par des moules en bois, car ils seront assez robustes pour de petites séries d'éléments (par exemple quarante pièces) et faciles à rénover. Les moules en bois seront plus aisément modifiables et construisibles dans le cas de pièces exceptionnelles. Les moules deviendront de plus en plus élaborés. L'épaississement du mur a nécessité l'emploi de bois lamellé-collé pour monter en potence des joues plus hautes. Les fonds de coffrage en bois bakélisé ont allongé la durée de vie des moules, tout en créant un nouvel effet de matière dû à l'étanchéité de ce matériau : état de surface parfaitement lisse, mais

1 Cycles d'orientation de Genève : Vuillonex 1975

2 Banque Pictet, Genève, 2005

3 Cycles d'orientation de Genève : Colombières 1973, Bois-Caran 1974



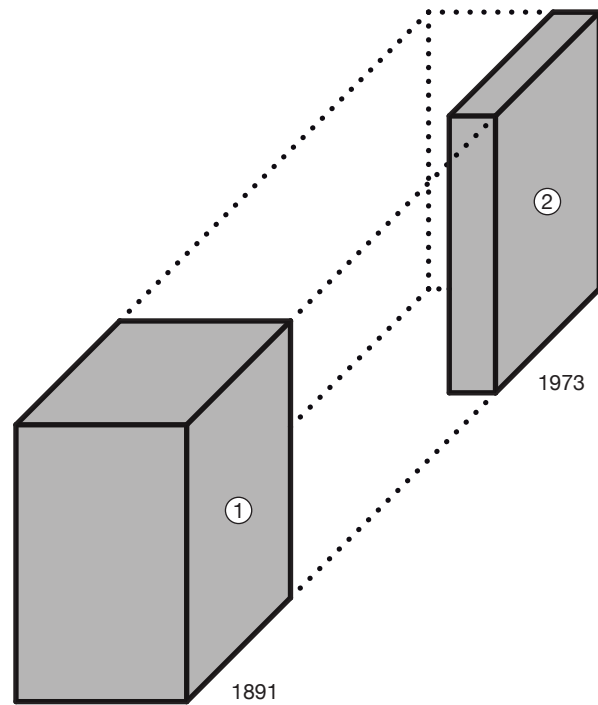
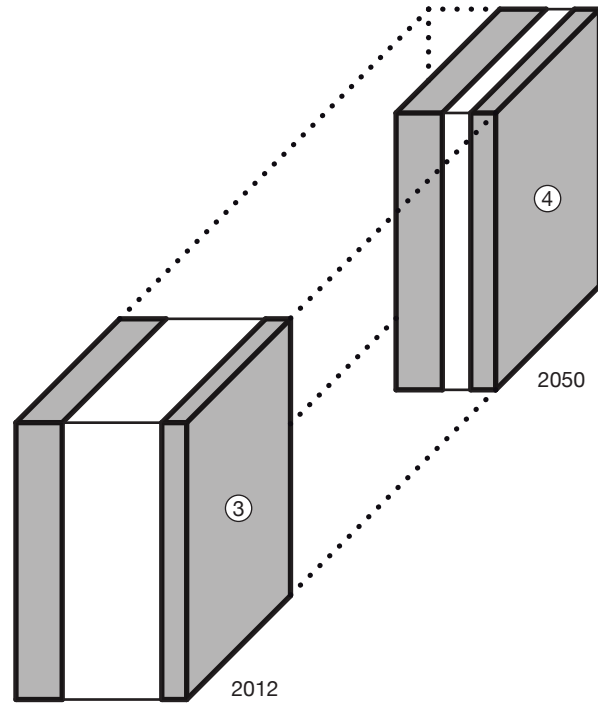
également moirures liées à une réaction chimique lors de la prise du béton. Cette finition appelée “propre de décoffrage” a poussé les architectes à concevoir des bétons qui se caractérisent par leur pigmentation. Leur volonté est de mettre l’accent sur la matérialité de l’élément préfabriqué.

### **Conclusion**

La deuxième période de révolution de l’enveloppe se manifeste visuellement par une métamorphose de la matérialité. Elle n’est pas dans ce cas un caprice décoratif insignifiant mais la matérialisation d’une nouvelle fonction indispensable soit d’une couche qui protège un matériau sensible, l’isolation. C’est devenu un attribut qui demande la sensibilité et le savoir-faire de l’architecte. La recette du béton dans la préfabrication est devenue l’opportunité pour l’architecte de tendre vers la matérialité recherchée pour son objet. Elle précise notamment les quantités et les qualités de chaque ingrédient, ainsi que le mode de finition. Les composantes sont les suivantes : ciment gris ou ciment blanc, granulats, sable, pigment et abrasion. Depuis 1973, la couleur fleurit sur les revêtements d’éléments de façade isolés et porteurs. C’est l’émergence d’une nouvelle architecture. On observe dans les projets récents en béton préfabriqué de Suisse romande, une résonance de *l’accord de trois notes* : la recette de béton, le calepinage des éléments préfabriqués et la forme urbaine du bâtiment.



# THERMIQUE



- MURS**
- ① MONOLITHIQUE
  - ② PORTEUR OPTIMISE
  - ③ PORTEUR THERMIQUE
  - ④ PORTEUR THERMIQUE OPTIMISE

Optimisation de la statique du mur porteur dans le bâtiment et de la thermique du mur porteur de façade à Genève  
LAURE EPFL

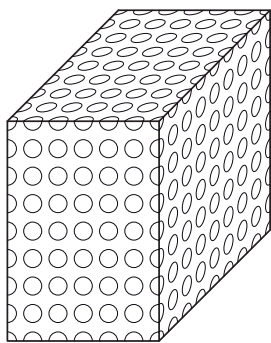
# L'ÉPAISSEUR DU MUR

Du point de vue physique, le deuxième changement de la révolution de l'enveloppe est la prise de conscience de l'importance de l'isolant et de son intégration dans la façade. Nous pouvons dire que cette nouvelle donnée n'est pas encore totalement maîtrisée. Son dimensionnement et son utilisation appropriée à un type particulier de construction sont encore aléatoires. L'épaisseur de isolation dépend, d'une part, du climat dans lequel le bâtiment est construit, et d'autre part de la nature de l'isolant. Dans un climat tempéré, d'une moyenne de température annuelle de 18°C, l'isolation n'a pas d'importance car le climat intérieur peut être géré uniquement par la masse thermique du bâtiment. Par contre, dans les climats où les températures sont inférieures à 18°C, l'isolation est *impérative*. Tandis que dans les climats aux températures supérieures à 18°C, l'isolation est simplement *conseillée*. Cette prise de conscience est une nouvelle contrainte pour l'architecture. Ces nouveaux objectifs thermiques provoquent des solutions constructives surdimensionnées — comparables à l'expérience, pour la statique, du Monadnock Building de Chicago (① et p. 54 ②). L'épaisseur du mur de façade dépend des exigences thermiques demandées et devient de plus en plus important.

Nous partons du principe que d'une part, un mur optimal doit garantir à l'intérieur de l'espace un climat autonome (Minergie-P, objectif de la *Société à 2000 Watts*) et que d'autre part, l'isolant doit répondre aux exigences écologiques actuelles. Pour une qualité optimale, l'épaisseur minimale de l'isolant, sous nos latitudes, s'élève à 29 cm (EPS graphité)<sup>1</sup>. Il s'agit d'une épaisseur importante. La question de réduction de la matière se pose, comme elle s'était posée au début de la modernité ② avec les questions statiques qui ont conduit à l'invention de l'ossature. Or, aujourd'hui, l'optimisation thermique ④ vise à conserver les performances thermiques exigées et réduire la matière de la façade qui occupe des surfaces exploitables. La bonne épaisseur d'un mur est donc d'une part liée à son emprise au sol, et d'autre part à sa possibilité de mise en œuvre. L'épaisseur d'une matière isolante ne convient pas forcément au mode de construction de la technique de préfabrication. Celle-ci demande que les choix des isolants ou leurs combinaisons soient réalisés en harmonie avec ses règles de mise en œuvre. Ces questions se posent pour tous les types de construction et pas seulement la préfabrication. La réduction de l'épaisseur de la couche d'isolation ne peut se faire qu'en lui substituant un isolant dont la conductivité thermique est plus faible.

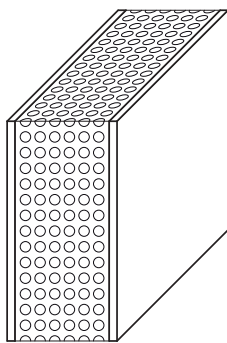
L'enjeu principal et décisif pour la réduction de l'épaisseur d'un panneau sandwich en béton est la couche de l'isolant. Pour une performance donnée, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur, le coût et l'impact sur l'environnement. La mise en place d'un procédé d'analyse pour optimiser les murs à hautes performances thermiques m'a permis de trouver des solutions pour évaluer les risques et la faisabilité de ce type de murs (pp. 90, 91, 96 et 97). Ceci m'a aussi permis de déterminer les essais à réaliser sous forme de prototypes.

1 v. p. 95



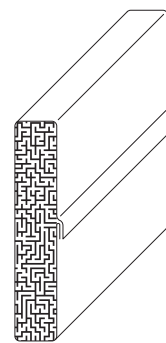
BRUTS  
 $\lambda$  0.026 – 0.1 W/MK

①



SEMI-FINIS  
 $\lambda$  0.020 – 0.026 W/MK

②



FINIS  
 $\lambda$  0.004 – 0.020 W/MK

③

# ISOLANTS

La strate la plus variable et incertaine dans la construction aujourd'hui est sans doute la couche d'isolation. Cette strate dépend des contraintes climatiques, du bilan thermique du bâtiment et des caractéristiques du produit lui-même. Il existe de multiples isolants aux qualités thermiques différentes qui réclament des quantités respectives différentes pour répondre aux exigences particulières<sup>1</sup>. La valeur de référence d'un isolant est sa conductivité thermique, soit sa valeur lambda. Par "isolant" nous entendons tous les produits et matériaux dont le lambda est inférieur à 0,1W/mK. Il existe des isolants dont les finitions sont plus ou moins complexes. On peut distinguer trois familles d'isolant :

- ① les isolants bruts                    lambda 0,026-0,1 W/mK
- ② les isolants semi-finis            lambda 0,020-0,026 W/mK
- ③ les isolants finis                    lambda 0,004-0,020 W/mK

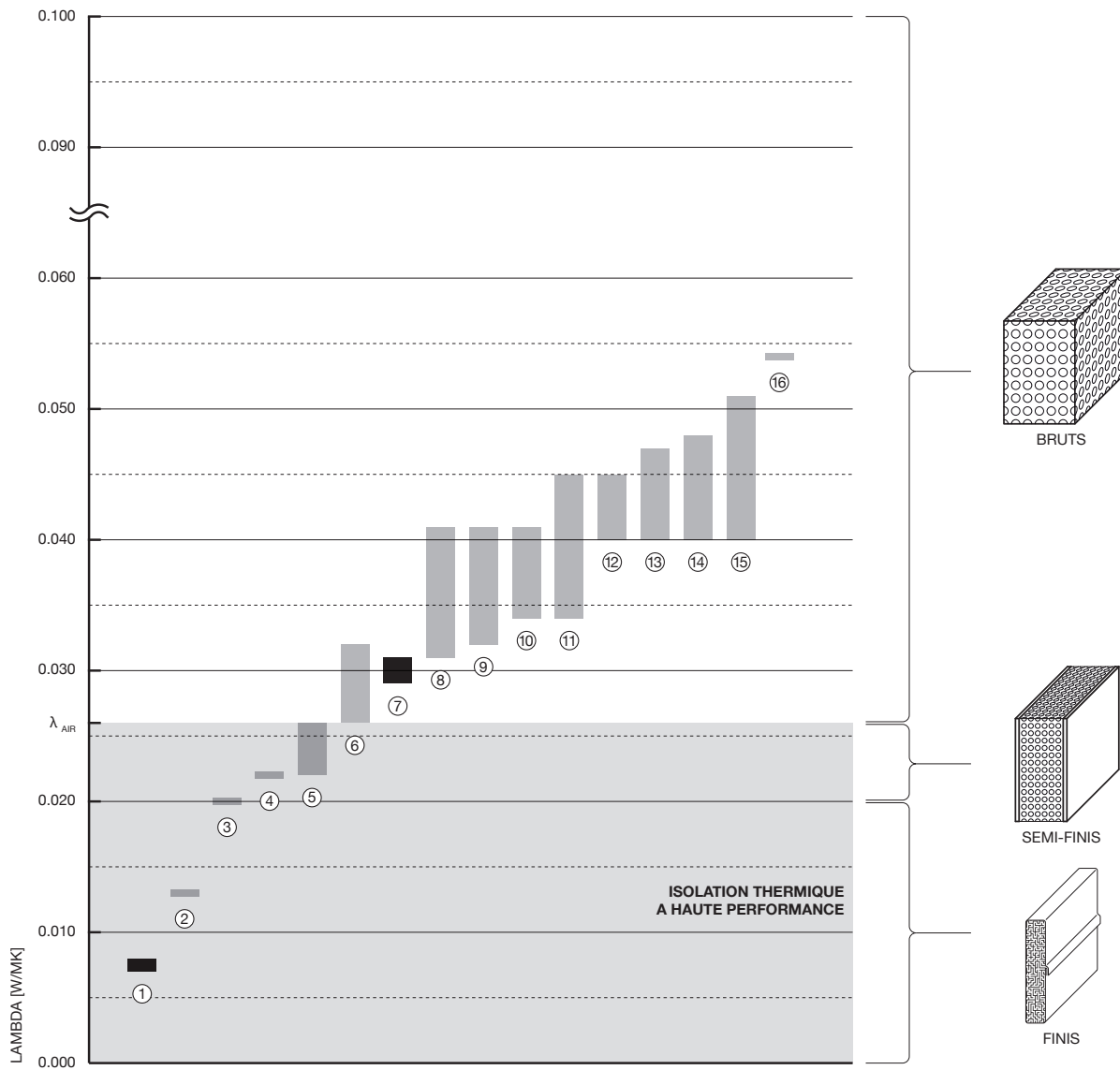
Plus l'isolant est fini, plus il est performant. Un isolant conducteur présentera un état plus brut. Vice versa, un isolant peu conducteur, donc performant, aura généralement une constitution raffinée. Sa production fait appel à une technologie plus complexe et il sera plus onéreux.

L'histoire des matières isolantes est récente et remonte à la deuxième guerre mondiale. Les premiers isolants avaient été inventés pour des gilets de sauvetage en tant que corps flottants. Ils seront ensuite utilisés pour isoler thermiquement des chambres frigorifiques. A partir des années 50, ils seront appliqués dans l'industrie de la construction ainsi que dans la préfabrication en béton. On retient le système de préfabrication danois Larsen & Nielson<sup>2</sup>, qui avait développé une mise en œuvre particulièrement soignée de pose de l'isolant dans le panneau en béton. A partir du choc pétrolier, les isolants sont utilisés de manière systématique dans le bâtiment, souvent à l'état brut. Leur épaisseur dans les murs vont varier dans l'histoire selon le changement des exigences thermiques issu des normes de la période donnée. Aujourd'hui, la recherche de pointe crée des nouvelles matières à très faible conductivité thermique afin de proposer des solutions plus efficaces et moins volumineuses. Ce développement trouve un intérêt dans le domaine des transports, comme les convois frigorifiques. La question se pose quant à l'intégration des isolants à haute performance dans l'industrie du bâtiment.

L'isolant est indispensable, mais n'est pas visible. Il ne le sera vraisemblablement jamais. Son rôle est de paralyser l'air pour isoler et il n'a pas de caractéristiques mécaniques particulières. Il doit être recouvert par une couche de protection. Par le fait qu'il reste invisible, son développement ne nécessite pas une attention particulière en vue d'homogénéiser sa matière. Elle doit être conçue pour s'adapter aux situations diverses comme dans le détail d'une embrasure ou d'un caisson de

1 M. Pfundstein, R. Gellert, M. H. Spritzner, A. Rudolphi, *Insulating Materials*, Edition Detail, Munich 2007

2 Dalla rivista "Industria Italiana del Cemento", *Industrializzazione e prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, A.I.T.E.C., Rome 1966, pp. 210-214



- ① VIP
- ② AEROGEL
- ③ VIP DEFECTUEUX
- ④ MOUSSE PHENOLIQUE
- ⑤ POLYURETHANE IMPERMEABLE
- ⑥ POLYURETHANE PERMEABLE
- ⑦ EPS GRAPHITE (POLYSTYRENE EXPANSE)
- ⑧ LAINE DE VERRE
- ⑨ EPS (POLYSTYRENE EXPANSE)
- ⑩ XPS (POLYSTYRENE EXTRUDE)
- ⑪ LAINE MINERALE
- ⑫ CELLULOSE
- ⑬ LIEGE
- ⑭ CELLULOSE EN VRAC
- ⑮ VERRE CELLULAIRE EN PLAQUE
- ⑯ CREPI ISOLANT

#### Les isolants en fonction de leur conductivité thermique

LAURE EPFL d'après Association Suisse de l'Industrie La Terre Cuite,  
 Element 29, *Protection thermique dans le bâtiment*, Faktor Verlag,  
 Zürich 2011, p. 5



store. Par conséquent, certains endroits doivent être localement traités avec plus d'attention. Le même raisonnement se pose par rapport aux techniques de construction. L'isolation dans un mur en béton préfabriqué n'est pas soumise aux mêmes conditions qu'une isolation périphérique d'un mur traditionnel. Dans le premier cas, il fait partie de l'élément, dans le deuxième, il est rapporté sur le chantier. L'isolant doit être choisi en fonction des détails et des conditions particulières d'une technique dans l'optique de l'optimiser tant du point de vue thermique qu'écologique. Il existe donc un intérêt dans la construction de prendre en considération les nouvelles matières isolantes ①-③. Elles offrent, en combinaison avec les isolants traditionnels ⑦-⑩, une nouvelle approche. L'usage de ces matières mixtes permet d'optimiser certains détails et d'améliorer la qualité thermique de l'enveloppe en général. En combinant des matières plus performantes ① à des matières brutes ⑦, un éventail de nouvelles possibilités s'ouvre. La gestion de l'épaisseur et des détails devient à nouveau une préoccupation de l'architecte. L'épaisseur n'est plus aléatoire, elle correspond à une optimisation constructive. Les matières les plus isolantes sont souvent des matières de laboratoire qui ne sont pas encore appropriées pour être appliquées dans la construction. Trop fragiles et peu malléables, elles tranchent avec les produits plus grossiers utilisés sur les chantiers. Leur utilisation demande un soin et un environnement particulier.

Les isolants à grande résistance thermique, comme les isolants sous vide ①, sont d'un grand intérêt pour le développement des panneaux composites. Ils permettent d'accroître la résistance thermique sans pour autant augmenter le volume de matière. Les isolants sous vide actuels s'emploient rarement sur les chantiers. Leur fragilité rend leur mise en œuvre délicate et risquée, car une fois perforés, ils perdent une partie de leur résistance thermique ③. Cependant, une utilisation appliquée à des éléments préfabriqués avec un suivi et un contrôle de qualité est réaliste. Cette solution permet de réaliser des constructions à fort pouvoir isolant tout en garantissant une épaisseur constructive intéressante.

| MATERIAUX        | CONDUCTIVITE THERMIQUE | MASSE VOLUMIQUE | POINTS UCE/KG | POINTS UCE/M <sup>3</sup> | ENERGIE GRISE/KG | CO <sub>2</sub> /KG | CHF/M <sup>3</sup> * |
|------------------|------------------------|-----------------|---------------|---------------------------|------------------|---------------------|----------------------|
| VIP              | 0,008                  | 160             | 6897          | 1103520                   | 159              |                     | 4066                 |
| VIP AMELIORE **  | 0,008                  | 160             | 3862          | 617920                    | 87,45            |                     |                      |
| Ⓐ POLYURETHANE   | 0,024                  | 40              | 6100          | 244000                    | 101              | 6,79                | 250                  |
| LAMBDA ROOF      | 0,029                  | 25              | 5210          | 130250                    | 105              | 7,36                | 206                  |
| EPS              | 0,033                  | 15              | 5210          | 78150                     | 105              | 7,36                | 113                  |
| LAINE DE ROCHE   | 0,034                  | 60              | 2020          | 121200                    | 19,1             | 1,09                |                      |
| PAILLE           | 0,077                  | 250             | 590           | 147500                    | 7,56             | 0,54                |                      |
| BRIQUE MONOMUR   | 0,12                   | 500             | 230           | 115000                    | 2,82             | 0,246               |                      |
| Ⓑ BOIS           | 0,13                   | 650             | 1580          | 1027000                   | 13,8             | 0,639               |                      |
| BETON CELLULAIRE | 0,18                   | 600             | 303           | 181800                    | 3,6              | 0,418               |                      |
| BETON            | 1,8                    | 2500            | 116           | 290000                    | 0,761            | 0,12                |                      |

\* VALEURS EXTRAITES DE CATALOGUES DE VENTE

\*\* VALEURS RECUEILLIES AUPRES D'UN PRODUCTEUR

#### Données physiques émises par le KBOB

Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles de maîtres d'ouvrage publics, *Données des écobilans dans la construction 2009/1*, KBOB, Etat de janvier 2010

# REPERCUSSION SUR LA CONSTRUCTION \*

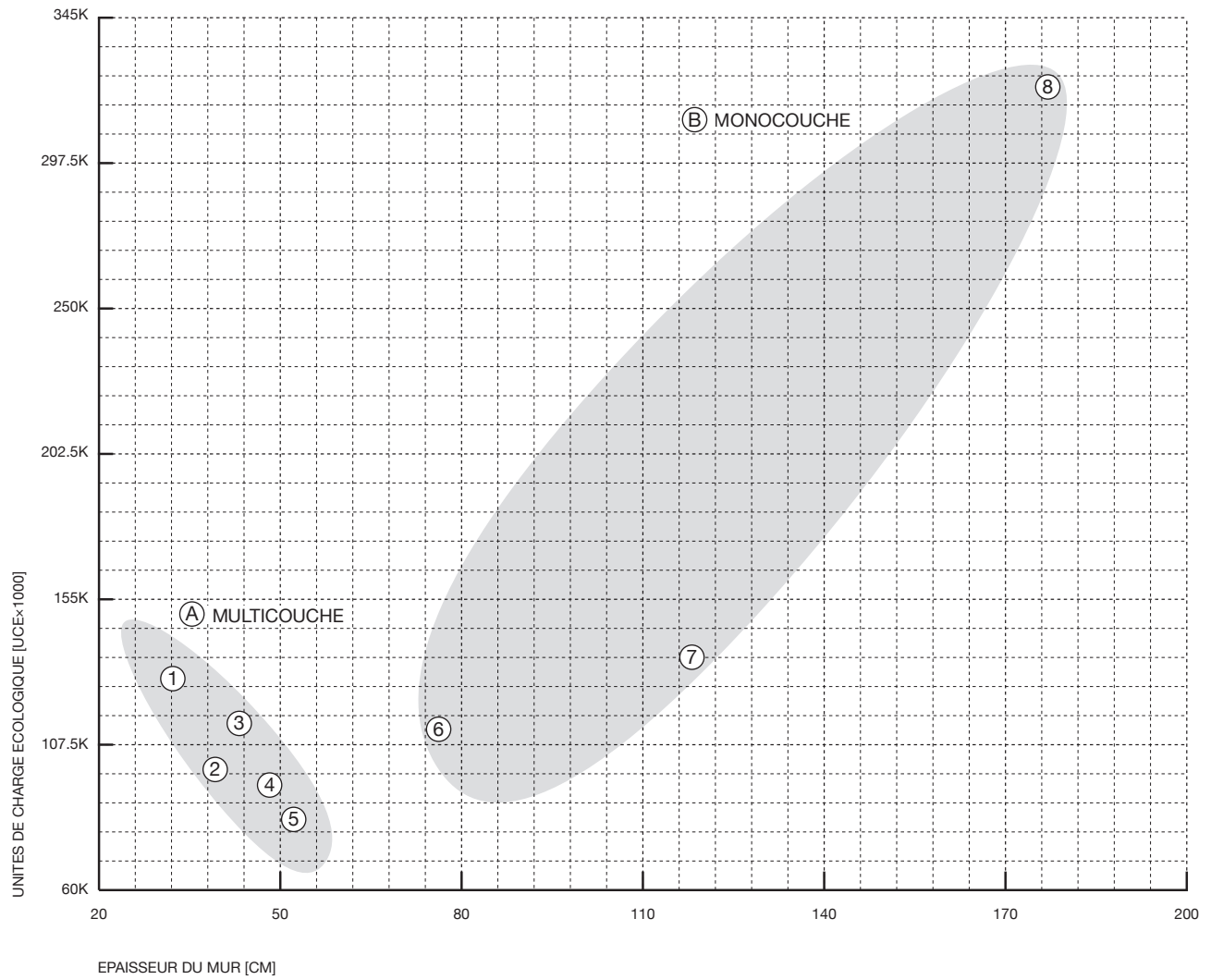
Jamais, dans toute l'histoire de l'architecture, la question de l'épaisseur d'un mur n'a été aussi controversée. Dans un climat donné et pour une performance thermique équivalente, la dimension d'un mur peut varier de 0.28 m à 1.77 m. Selon le choix d'une technique, cette épaisseur peut donc varier dans un rapport qui peut atteindre un contre six! En pleine crise des ressources fossiles, la question de la bonne mesure est pertinente et élémentaire (p. 88).

Il faut d'abord écarter les malentendus dans l'appréciation de l'isolant. Il existe une différence fondamentale entre un matériau ayant un rôle statique et un matériau ayant un rôle thermique. Une matière considérée comme isolante doit avoir une valeur de conductivité thermique inférieure à  $0,1\text{W/mK}$  (A). Cette valeur limite correspond à un mur de 1 m d'épaisseur pour une valeur U de  $0,1\text{W/m}^2\text{K}$ . Toutes sortes de béton, de briques et de bois massif (B) ne remplissent pas cette condition et ne sont par conséquent pas considérés comme des matières isolantes. Une matière comme de la paille peut être considérée comme matière isolante à conductivité relativement élevée. Elle n'a néanmoins pas les propriétés statiques intéressantes pour des constructions urbaines de haute densité. Il est possible d'en déduire une règle : sous nos latitudes, seul un mur composite peut répondre à nos exigences statiques et thermiques (p. 88 (1)-(5)). Il est composé d'une partie porteuse constituée d'une matière dense et résistante qui répond aux besoins statiques et d'une partie isolante, qui paralyse l'air. Par nature, il n'existe pas de matière monolithique qui satisfasse ces doubles caractéristiques. L'utilisation de murs monocouche dans la *Société à 2000 Watts* engendrerait des épaisseurs de murs plus importantes que les plus gros murs de l'architecture vernaculaire. Ils ne peuvent donc pas être considérés comme une alternative dans le futur pour des constructions urbaines à forte densité, tels que les logements et bureaux.

Le diagramme en p. 89 met en rapport l'épaisseur des murs avec leurs unités de charge écologique. Pour une même performance thermique, il existe deux tendances opposées entre les murs multicouches et les murs monocouches. Dans le cas de mur multicouche (A), plus il est fin, plus les unités de charge écologiques sont importantes. *A contrario*, plus le mur monocouche est fin, moins elles seront importantes (B). Les mêmes constatations peuvent être faites dans des tableaux comparatifs pour la production de  $\text{CO}_2$ , la consommation d'énergie grise et le prix du mur (v. données ci-contre). Ce changement de tendance est lié au fait qu'un mur composite fin demande une complexité technologique supérieure, et un mur monocouche épais réclame une augmentation du volume de la matière. Il existe donc un mur optimal théorique (p. 89 (5)), qui réunit parfaitement les questions écologiques, thermiques et la problématique du coût. Cette optimisation résulte des propriétés physiques de ses matériaux et ne prend pas en considération son volume. La pratique, en revanche, réclame un optimum plus complexe qui prend en considération son emprise au sol minimale.

\* Renvois graphiques de ce texte aux pp. 88-89

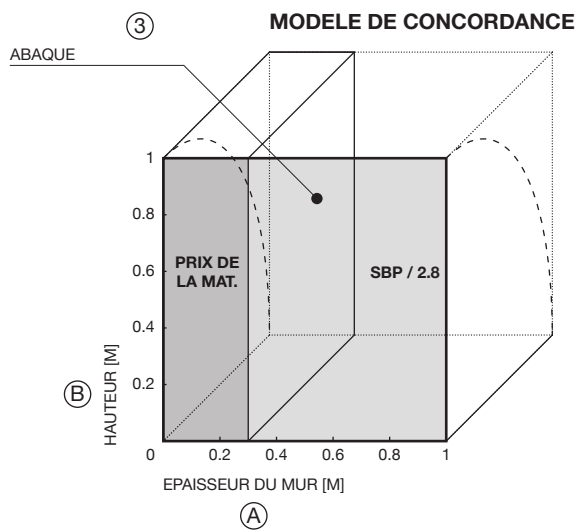
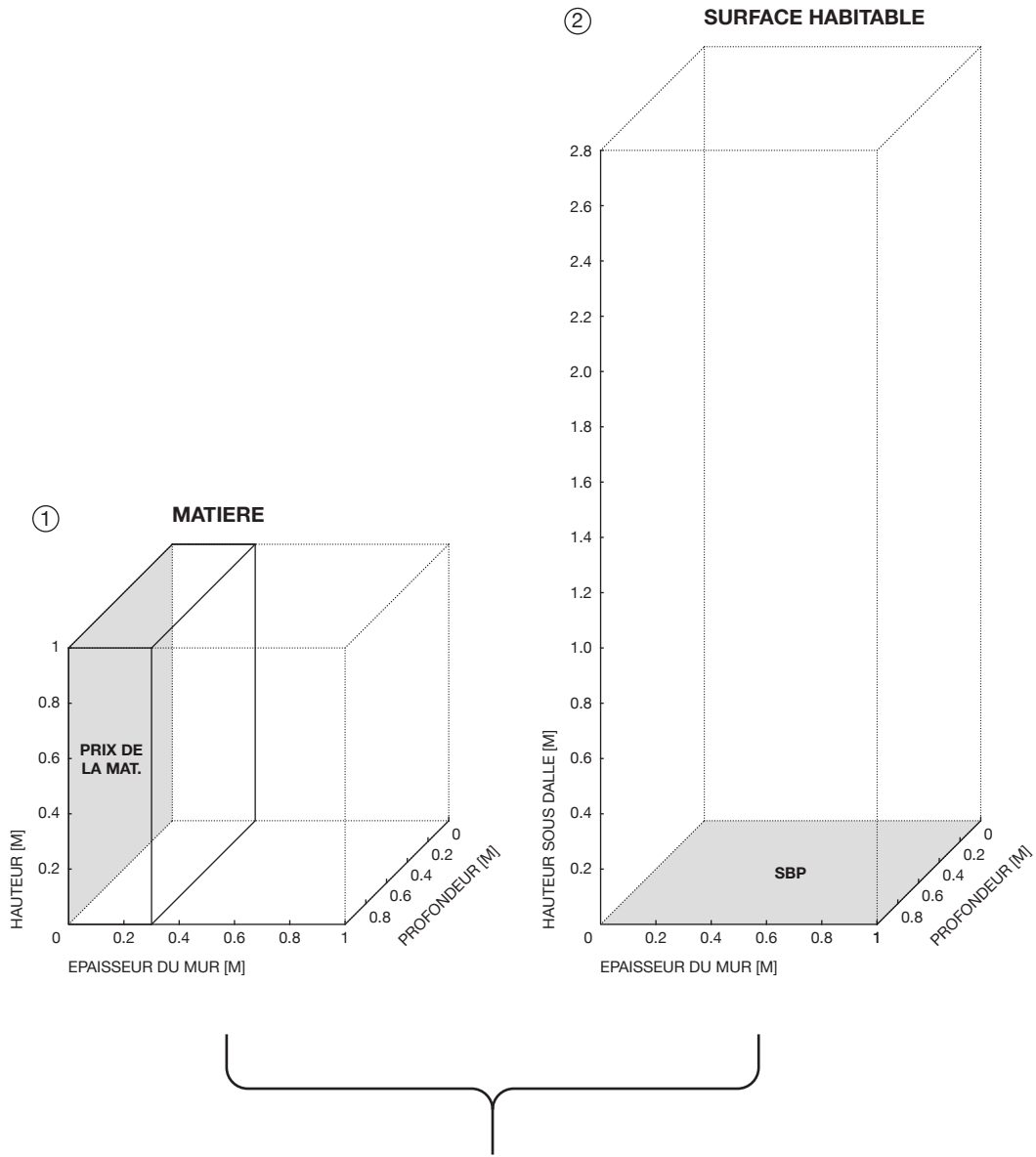


**EPAISSEURS ET COMPOSITIONS**

- (A) MULTICOUCHE:  
 ① BÉTON / VIP / BÉTON  
 ② BOIS / LAINE DE ROCHE / BOIS  
 ③ BÉTON / POLYURETHANE / BÉTON  
 ④ BÉTON / LAMBDA ROOF / BÉTON  
 ⑤ EPS / BÉTON

- (B) MONOCOUCHE:  
 ⑥ PAILLE  
 ⑦ BRIQUE MONOMUR  
 ⑧ BÉTON CELLULAIRE

**Points UCE et familles des murs**



Modèle de concordance entre données du mur et données de la surface brut de plancher  
LAURE EPFL

# PROCEDE D'ANALYSE \*

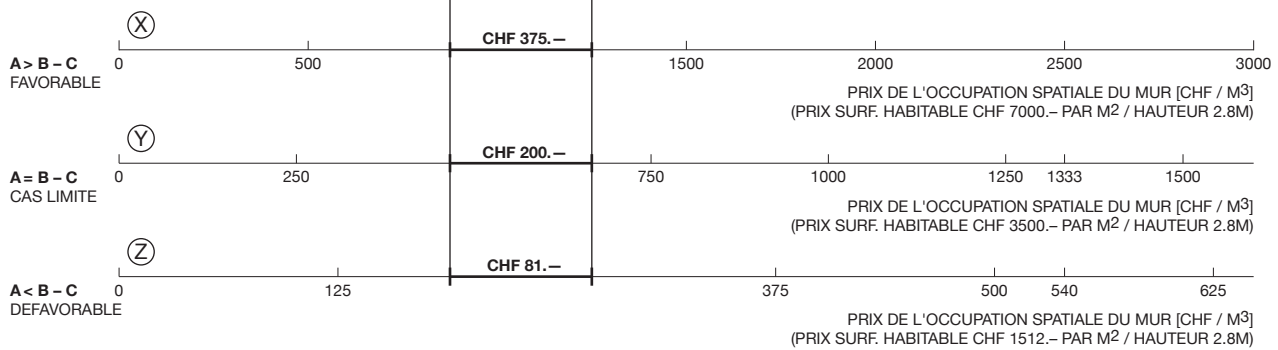
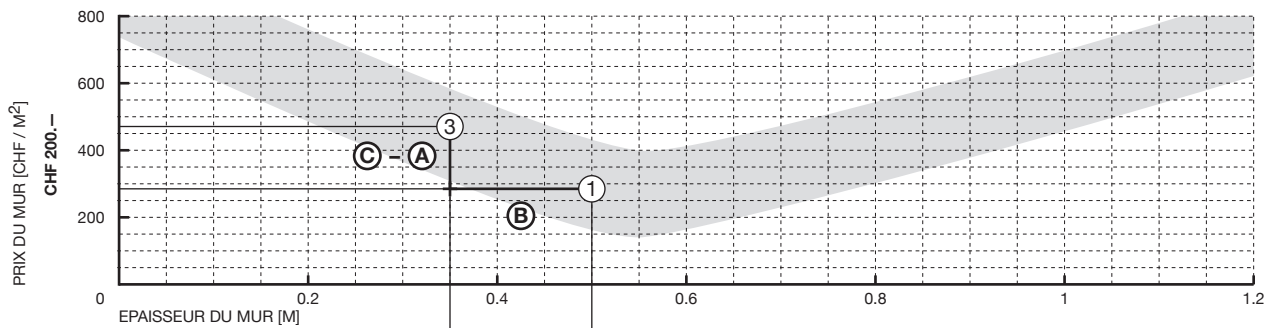
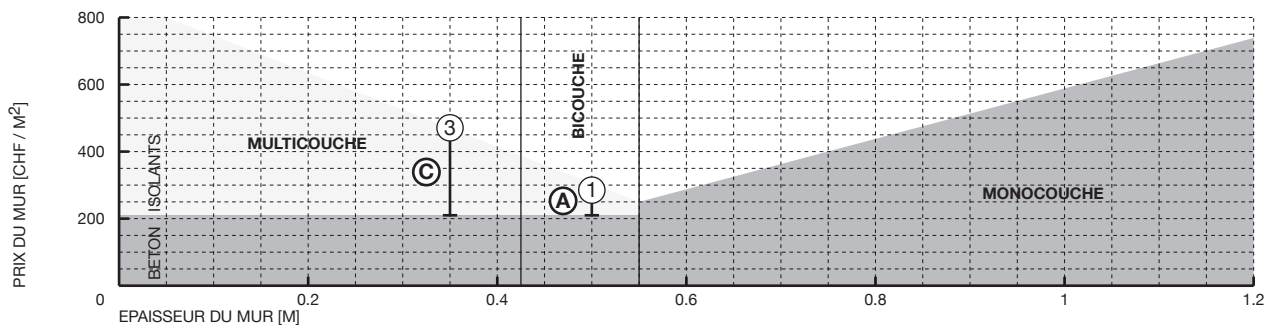
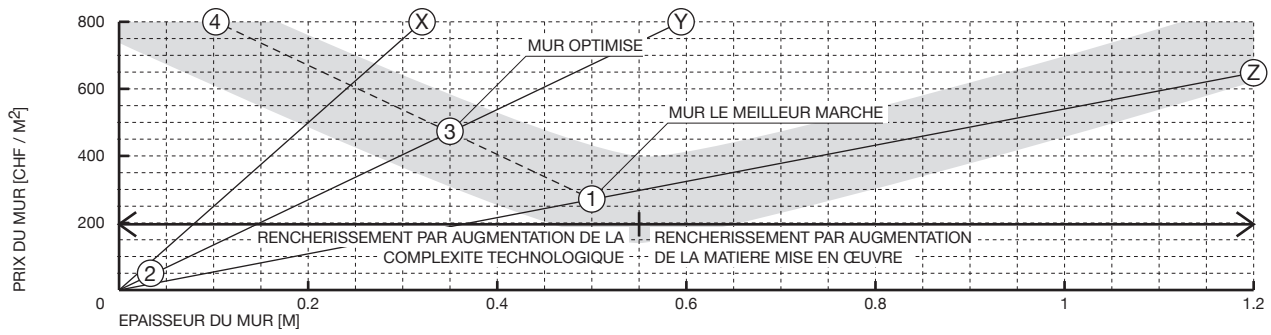
Pour mener la réflexion sur l'optimisation de mur à haute performance thermique selon une logique déductive, j'ai élaboré un dispositif basé sur la géométrie ③, inspiré des abaques d'autrefois, dans lequel il est possible de se représenter plusieurs cas de figure et de cerner visuellement des solutions optimales, offrant ainsi une vue d'ensemble de différents cas.

Ce système se distingue de l'usage dans la pratique, où, pour déterminer la composition d'un mur, on simule un cas en définissant des paramètres de départ. Ensuite, selon le résultat, certains paramètres sont corrigés afin d'améliorer et d'ajuster le résultat. Cette opinion se fait par rapport à un recoupement de plusieurs cas. On passe donc d'un cas à l'autre pour trouver une solution.

Le principe de mon modèle est la mise en relation des données propres au mur ① et des valeurs propres aux surfaces de sol ② (surface brute de plancher). Afin de pouvoir les mettre en relation, je rapporte ces valeurs à  $1 \text{ m}^3$ , afin d'obtenir un dénominateur commun. Les tableaux du procédé d'analyse mettent toujours en rapport sur l'abscisse ④ l'épaisseur du mur sur une profondeur de 1 m. Sur l'ordonnée ⑤, figurent les différents paramètres. Ceux-ci varient pour chaque tableau. Cette disposition me permet d'imaginer en permanence une surface de  $1 \text{ m}^2$  en fonction de son épaisseur. Dans ces graphiques, il est possible de lire des valeurs physiques en rapport avec la géométrie d'un mur. Les paramètres importants que j'ai représentés sont des valeurs liées à la thermique, à l'économie et aux qualités des produits. Les points dans un tableau peuvent être rapportés à un autre tableau car les unités de l'abscisse sont les mêmes. Je peux donc graphiquement déterminer des solutions idéales, qui sont issues de la géométrie pure.

Aujourd'hui, l'isolant le plus performant au niveau qualité-prix est le polyuréthane. Il s'agit cependant d'un matériau qui ne peut pas être recyclé. Dans une perspective où les matières doivent remplir aussi des exigences écologiques, ce type de produit ne sera plus utilisable dans des grandes surfaces et devra être remplacé par des isolants respectueux de l'environnement et pouvant être recyclés. Dans le cadre des tableaux du procédé d'analyse (p. 96 et 97), le polyuréthane est considéré comme produit de référence comparative.

\* Représentation des abaques du procédé en pp. 96 et 97



Diagrammes du rapport entre surface brut de plancher et prix du mur  
LAURE EPFL

v. paramètres A, B et C en pp. 94, 96 et 97



# RECHERCHE DE L'OPTIMUM

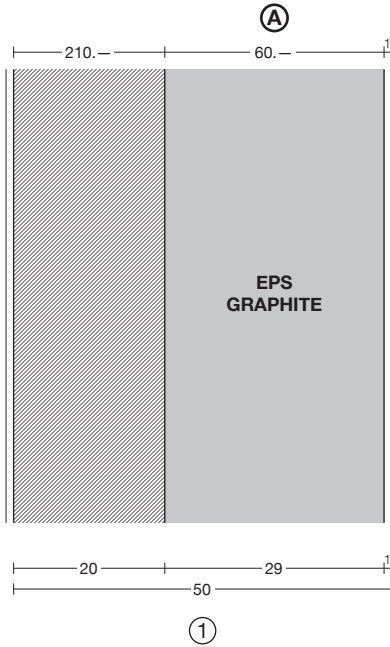
Pour déterminer l'épaisseur optimale d'un mur de manière thermique, économique et constructive, il faut prendre en considération les trois optima. Le premier ①, le mur le meilleur marché, est l'optimum thermique et écologique qui correspond à une épaisseur issue des valeurs physiques. Le deuxième ② est l'optimum économique qui dépend du rapport entre le coût du mur et sa surface d'emprise au sol. Le troisième ③, le mur optimisé, est l'optimum constructif, qui dépend d'une technique de façade et de la gestion des ponts thermiques.

Du point de vue économique ②, dans les milieux urbains à forte densité, le mur occupe une surface qui peut être considérée comme de la surface habitable non-exploitable. Dans le cas idéal, le mur ne devrait pas exister afin d'avoir le maximum de surface disponible. Economiquement, on tend donc vers la construction d'un mur le plus fin possible. Si l'on applique la règle qui émane du diagramme ci-contre ④, alors plus le mur multicouche devient fin, plus son coût augmente. Au contraire, plus il est épais, plus son coût est diminué. Par contre, un mur fin occupe une petite surface, et le coût de son emprise au sol est donc moins onéreuse que si sa surface était plus grande ②. Par recoupement ④ ∩ ②, le prix juste est la concordance du prix du mur et du prix de la surface au sol qu'il occupe. Ce rapport est l'optimum du point de vue économique ⑤. L'optimisation économique réelle présuppose une réduction de l'épaisseur avec un renchérissement de la construction ④. Ainsi, pour encourager l'investissement, elle doit présenter un gain économique aux niveaux des surfaces habitables.

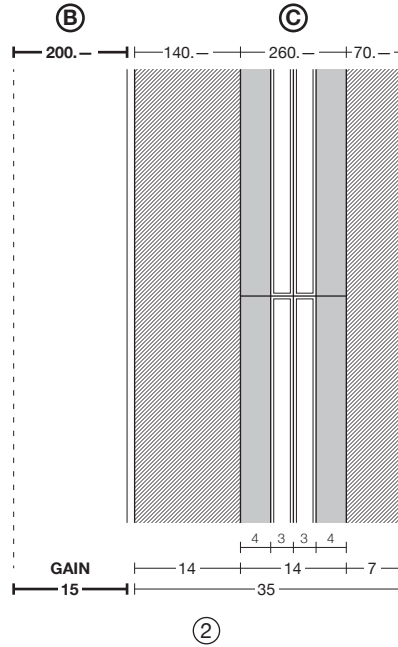
Du point de vue constructif ③, plus un mur est fin, moins il représente de matière utilisée et déplacée. La réduction de l'épaisseur modifie le rapport entre pertes et résistances thermiques assurées par l'isolant. Il n'existe donc pas un besoin de réduction maximale qui correspondrait à l'épaisseur de l'isolant le plus performant. Au niveau constructif, on cherchera une solution aux risques minimaux soit la garantie d'être performant à long terme.

La procédure d'optimisation du mur en suivant ces trois contraintes consiste à partir du mur le meilleur marché ① et de réduire son épaisseur afin de gagner des surfaces habitables ⑥. Cette réduction engendre une plus-value ⑦ - ⑧ qui ne doit pas être supérieure aux prix des surfaces brutes de plancher que l'on gagne ②, sinon la réduction n'aurait aucun sens économique. On s'oriente vers l'affinage du mur et, par conséquent, vers une augmentation de son prix. L'optimisation doit s'arrêter au point où la faisabilité constructive et thermique est encore possible. La plus-value doit être dans ce cas inférieure au prix de la surface gagnée ⑨. Dans notre conjoncture, la tendance est à la réduction de l'épaisseur. Mais cette situation peut être différente dans les pays où les surfaces brutes de plancher ne sont pas élevées et une réduction du mur amènerait à une plus-value qui ne serait pas compensée par le gain de surface ②. On constate que l'optimisation de l'épaisseur est liée au contexte dans lequel les bâtiments sont construits.

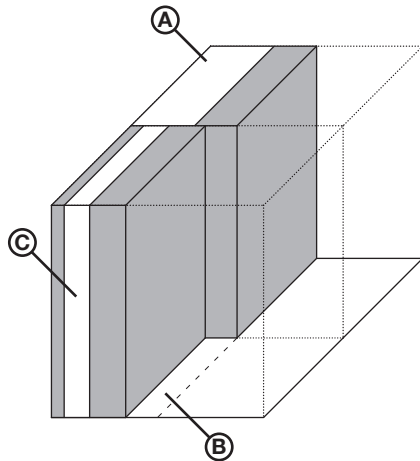
**MUR LE MEILLEUR MARCHÉ**



**MUR OPTIMISÉ**



- BETON
- EPS GRAPHITE
- VIP (VACUUM INSULATED PANEL)
- PLATRE / CREPI



**A + B < C**

- MATIERE NON-ISOLANTE
- MATIERE ISOLANTE

**MUR LE MEILLEUR MARCHÉ**

**MUR OPTIMISÉ**

|   |             | GAIN DE SURFACE | TOTAL ISOLANT | ISOLANT TRADITIONNEL | ISOLANT A HAUTE PERFORMANCE |
|---|-------------|-----------------|---------------|----------------------|-----------------------------|
| EPAISSEUR [CM]                                | 29          | 15              | 14            | 8                    | 6                           |
| SBP [CHF/M <sup>2</sup> ]                     |             | <b>3760</b>     |               |                      |                             |
| SBP/2,8 [CHF/M <sup>3</sup> ]                 |             | 1342            |               |                      |                             |
| GAIN FINANCIER [CHF/M <sup>2</sup> DE FAÇADE] |             | ~200 <b>B</b>   |               |                      |                             |
| COUT ISOLANT [CHF/M <sup>2</sup> EPAISSEUR]   | 60 <b>A</b> |                 | <260 <b>C</b> | 16                   | 244                         |
| COUT ISOLANT [CHF/M <sup>3</sup> ]            | 206         |                 | 1867          | 206                  | <b>4066</b>                 |

Ⓐ COUT DE L'ISOLANT LE MEILLEUR MARCHÉ  
 Ⓑ GAIN DE SURFACE / FINANCIER  
 Ⓒ COUT DE L'ISOLANT OPTIMISÉ

**Démonstration économique d'une réduction d'épaisseur**  
 LAURE EPFL

v. paramètres Ⓐ Ⓑ et Ⓒ en pp. 92, 96 et 97

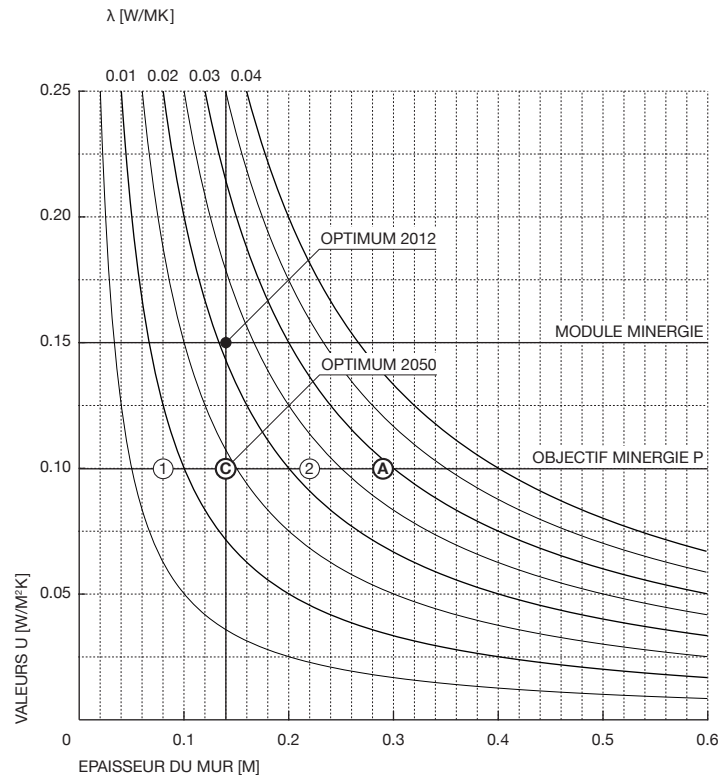
# UN CAS EN PREFABRICATION

Dans l'optimisation de l'épaisseur d'un mur en béton préfabriqué porteur, le point de départ est le mur le meilleur marché. Il est composé d'une strate portante de 20 cm et d'une isolation de 29 cm (EPS graphité). Son épaisseur est de 50 cm ① et il correspond aux qualités thermiques d'un objectif Minergie-P. Les parois opaques homogènes présentent une valeur U de 0,1 W/m<sup>2</sup> K. En préfabrication, le mur optimisé est d'une épaisseur de 35 cm ②, soit 15 cm de moins que la solution du mur le meilleur marché.

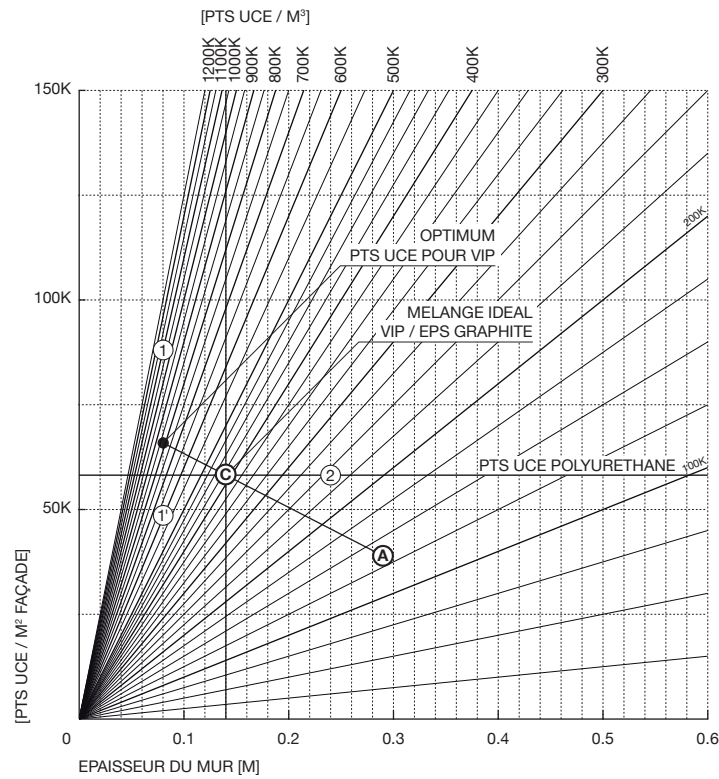
Deux strates doivent être considérées, la partie porteuse et l'isolation. Dans la partie porteuse, celle-ci peut être réduite à 14 cm. Le mur est coulé à l'horizontale ce qui permet un accès aisé pour le coulage de la matière. En préfabrication, les 7 cm de béton ainsi gagnés par rapport à un mur coulé *in situ* sont reportés sur l'extérieur et servent de parement. Cette couche contribue à la protection de l'isolant et à la durabilité de l'élément composite exposé aux intempéries. Dans la partie d'isolation, on maintient une épaisseur de 14 cm ③ par le choix d'un mélange entre différents types d'isolants. Il s'agit de l'isolant traditionnel, posé en deux couches de 4 cm et d'un isolant à grand coefficient d'absorption thermique posé en deux couches de 3 cm. Un mélange nous libère d'une épaisseur fixe par rapport à une performance et un matériau. Le coût du mur est maintenant dépendant du prix de la surface gagnée sur les surfaces brutes de plancher.

Une démonstration économique prouve la faisabilité de ce cas. Dans le tableau ci-contre, le prix du mur et le prix de la surface brute de plancher sont mis en relation. Pour une surface brute de plancher de 3'760 CHF/m<sup>2</sup>, la surface gagnée, sur cette différence d'épaisseur de 15 cm, correspond à 200 CHF/m<sup>2</sup> de façade ④. Pour déterminer le prix de l'isolant hybride, le prix de l'isolant du mur le meilleur marché est ajouté au gain de surface ④ + ⑤ < ③. La somme maximale à disposition pour établir un mélange d'isolants répondant aux exigences thermiques définies peut être déterminée. Dans ce cas, le prix de l'isolant à haute performance thermique monte à 4'066 CHF/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à la valeur du marché actuel. Ceci est un cas limite car il n'y a pas de marges bénéfiques pour un investisseur, qui n'y voit dans ce cas pas d'intérêt. Si le prix des surfaces brutes de plancher est plus élevé ou le prix de l'isolant à haute performance diminue, alors il peut y avoir un véritable intérêt économique. Aujourd'hui, l'usage d'isolant à haute performance dans le bâtiment est réaliste. Néanmoins le surcoût engendré par ce type d'isolant n'est pas encore accepté d'emblée dans les plans financiers des investisseurs. L'usage d'isolants performants mais non-recyclables est encore autorisé et fait que ces raisonnements ne sont pas encore prioritaires. Le jour où la haute performance thermique et le respect de l'écologie seront de vigueur, alors ces démarches seront inévitables.

VALEURS U



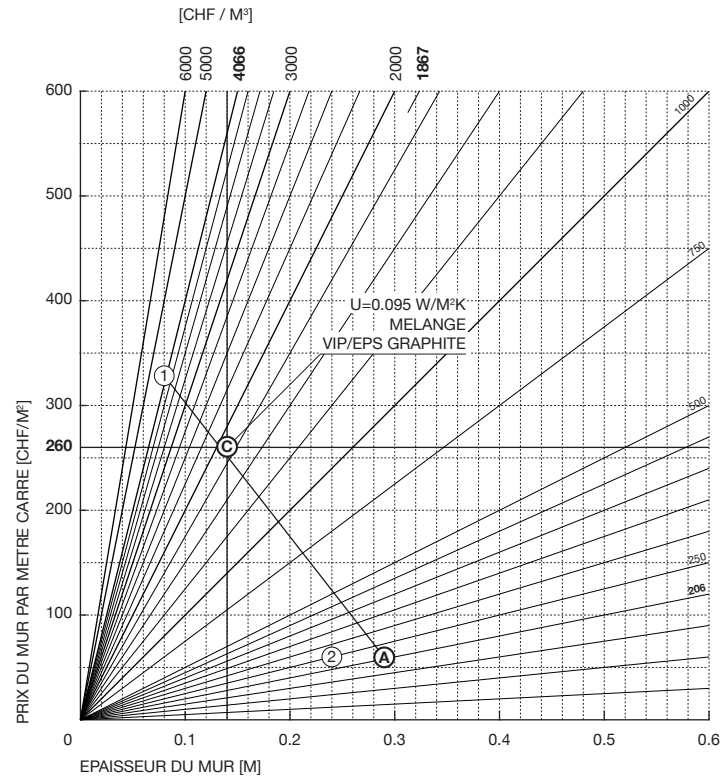
POINTS UCE



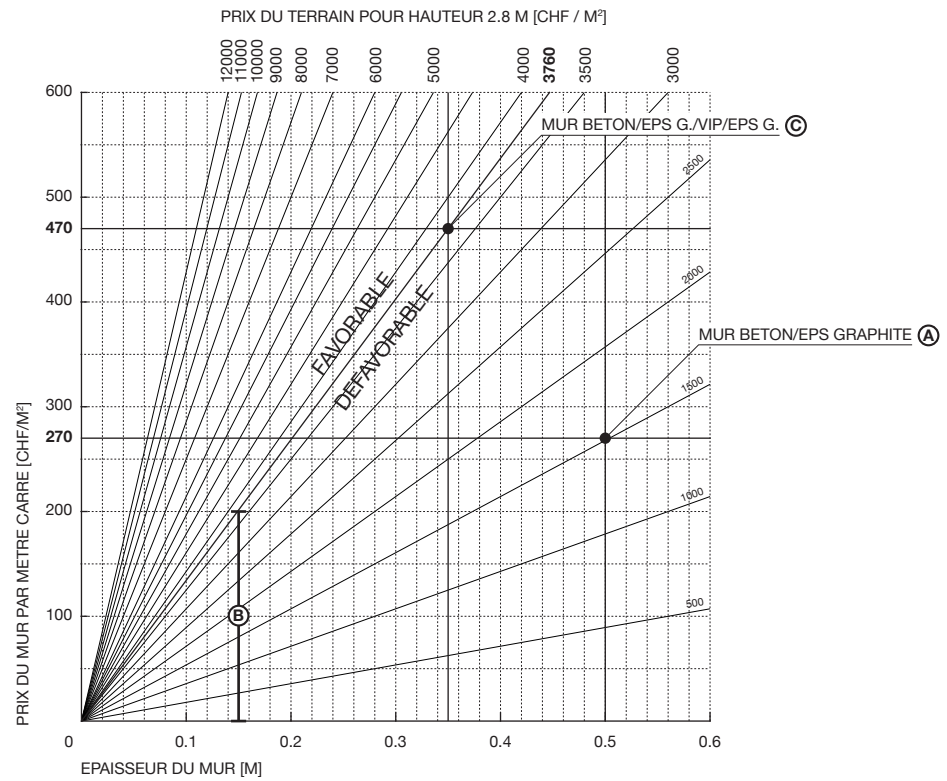
- ① VIP
- ② VIP AMELIORE
- ③ POLYURETHANE
- ④ EPS G. / VIP / EPS G.
- ⑤ EPS GRAPHITE (POLYSTYRENE EXPANSE)

Procédé d'analyse, première partie  
 LAURE EPFL  
 données extraites du tableau p. 86

PRIX ISOLANTS



PRIX TERRAIN



- ① VIP
- ① VIP AMELIORE
- ② POLYURETHANE
- Ⓐ SURFACE GAGNEE OU DIFFERENCE ENTRE MURS Ⓑ ET Ⓒ
- Ⓑ EPS G. / VIP / EPS G.
- Ⓒ EPS GRAPHITE (POLYSTYRENE EXPANSE)

Procédé d'analyse, deuxième partie  
LAURE EPFL  
v. données p. 94



© LEO FABRIZIO

Décoffrage d'un élément d'essai, février 2010  
LAURE EPFL



# DETERMINATION DES ESSAIS\*

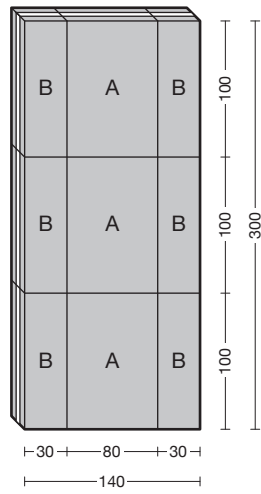
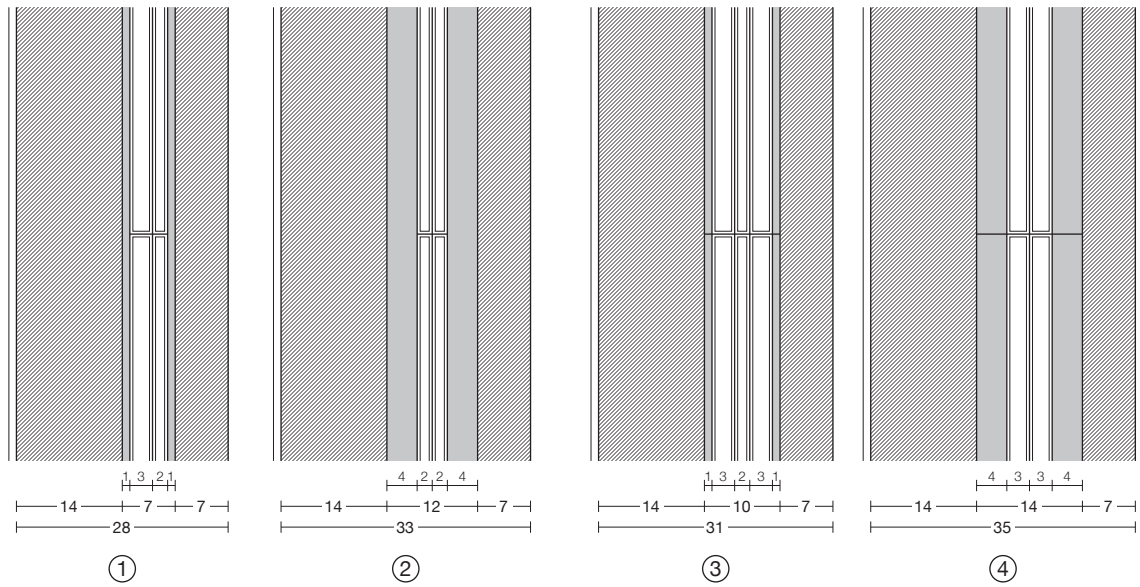
La conviction de devoir optimiser le mur préfabriqué en béton dans l'avenir a poussé la recherche à effectuer des essais grandeur nature. Ils ont été réalisés d'abord sous forme de prototypes, ensuite sous forme d'un projet pilote (v. pp. 100 et 101). Les choix issus du procédé d'optimisation devaient être vérifiés en prenant en considération la complexité et la faisabilité de la mise en œuvre de l'élément ainsi que son montage sur le chantier. Cette démarche devait permettre d'affiner les choix par rapport à un savoir-faire local.

Le procédé d'analyse d'optimisation a permis de déterminer quatre types de murs différents. Les exigences des deux premiers sont de répondre au module Minergie ① ②, avec une valeur U de 0.15 W/m<sup>2</sup>K et les deux autres ③ ④ ont l'objectif plus optimiste de répondre à des valeurs U de 0.1 W/m<sup>2</sup>K. La sélection des isolants pour un même panneau s'est faite avec une couche d'isolation à haute performance thermique (VIP) et une autre, en matière courante (EPS graphité). Une nouvelle forme de connecteur en matière synthétique a été appliqué entre le voile de parement et la strate porteuse. L'intérêt de l'usage de ces connecteurs a été avant tout de réduire les ponts thermiques sur les surfaces murales et de réduire leur temps de pose. Leurs dispositions se marient avec le complexe de l'isolant. L'espacement maximal entre porteur et parement avec ce type de connecteur est limité à 14 cm.

Pour chacun des deux cas de figure choisis, il a été réalisé un prototype de mur à l'épaisseur la plus mince possible ① ③ et un prototype de mur plus épais ② ④. Ces panneaux ont une dimension de 1.4 m sur 3 m. Dans les variantes de mur ② ④, le but est d'assurer la fiabilité de l'isolant sous vide, le VIP. Il faut comprendre si la façade a toujours une valeur thermique intéressante même si 50% de l'isolant est défectueux. Afin de limiter les risques de perforation sur toute la profondeur, l'épaisseur de la matière à haute performance est divisée en deux panneaux assemblés. La pratique montre que cette matière isolante peut être manipulée en préfabrication aisément et représente un risque moins important dans le cas de murs ② ④. Lors de la manutention des prototypes aucune défaillance de l'isolation n'a été perceptible. L'expérience démontre que la gestion de ces risques peut tout à fait être cernée et gérée.

Les essais de fabrication des premiers panneaux à faible épaisseur ① ③ se sont avérés très délicats. La juxtaposition des panneaux d'isolant composites entraînait des dégâts sur la tranche de la matière isolante traditionnelle (EPS graphité). Cette solution ne s'annonçait pas adaptée aux manutentions et à la pose d'armature qui se succèdent dans la procédure de mise en œuvre du panneau sandwich préfabriqué. La solution retenue est celle du mur épais ④ à la performance thermique maximale, correspondant à une épaisseur d'isolant de 14 cm.

\* Représentation des abaques du procédé en pp. 100 et 101



- BETON
- EPS GRAPHITE
- VIP (VACUUM INSULATED PANEL)
- PLATRE / CREPI

MODULE MINERGIE (U=0.15)

OBJECTIF MINERGIE P (U=0.10)

|                            | ESSAI ① | ESSAI ② | ESSAI ③ | ESSAI ④ |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| U<br>[W/M <sup>2</sup> K]  | 0.14    | 0.125   | 0.09    | 0.095   |
| λ<br>[W/MK]                | 0.009   | 0.015   | 0.009   | 0.013   |
| U*<br>[W/M <sup>2</sup> K] | 0.19    | 0.16    | 0.13    | 0.125   |
| λ*<br>[W/MK]               | 0.013   | 0.019   | 0.013   | 0.0175  |

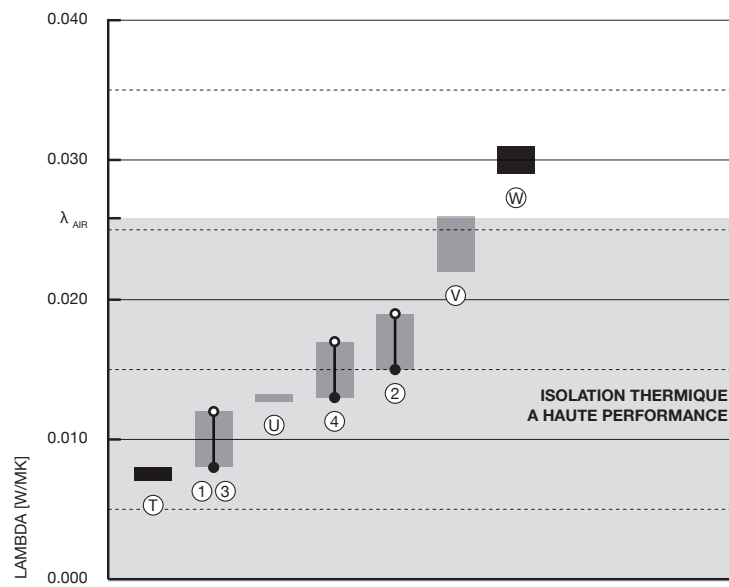
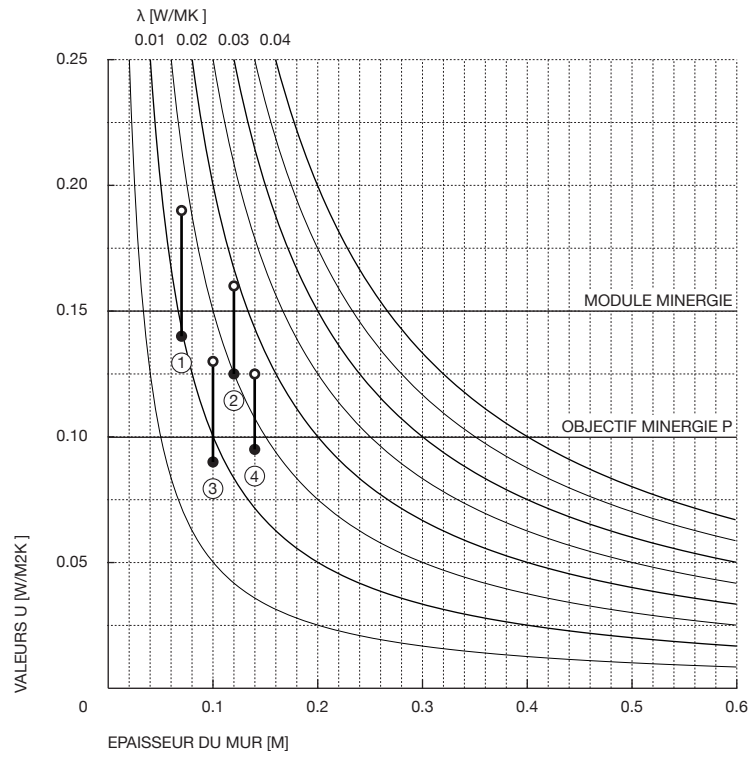
\* VALEURS U AVEC 50% D'ELEMENTS DEFECTUEUX

**LAMBDA DE REFERENCE [W/M<sup>2</sup>K]**  
 0.008 VIP  
 0.023 VIP DEFECTUEUX  
 0.029 EPS GRAPHITE

① ESSAI 1  
 ② ESSAI 2  
 ③ ESSAI 3  
 ④ ESSAI 4

**Détermination des essais : coupes-types, calepinage VIP, valeurs U et lambda**  
 LAURE EPFL





- ◆  $\lambda$
- ⊕  $\lambda'$  (VALEURS U AVEC 50% D'ELEMENTS DEFECTUEUX)
- ① ESSAI 1
- ② ESSAI 2
- ③ ESSAI 3
- ④ ESSAI 4

- Ⓧ VIP
- Ⓧ AEROGEL
- Ⓧ POLYURETHANE IMPERMEABLE
- Ⓧ EPS GRAPHITE (POLYSTYRENE EXPANSE)

Haut : évaluation des risques avec VIP défectueux  
LAURE EPFL

Bas : comparatif des lambda moyens des essais



© YVES-ANDRÉ CH

Projet pilote réalisé, décembre 2011

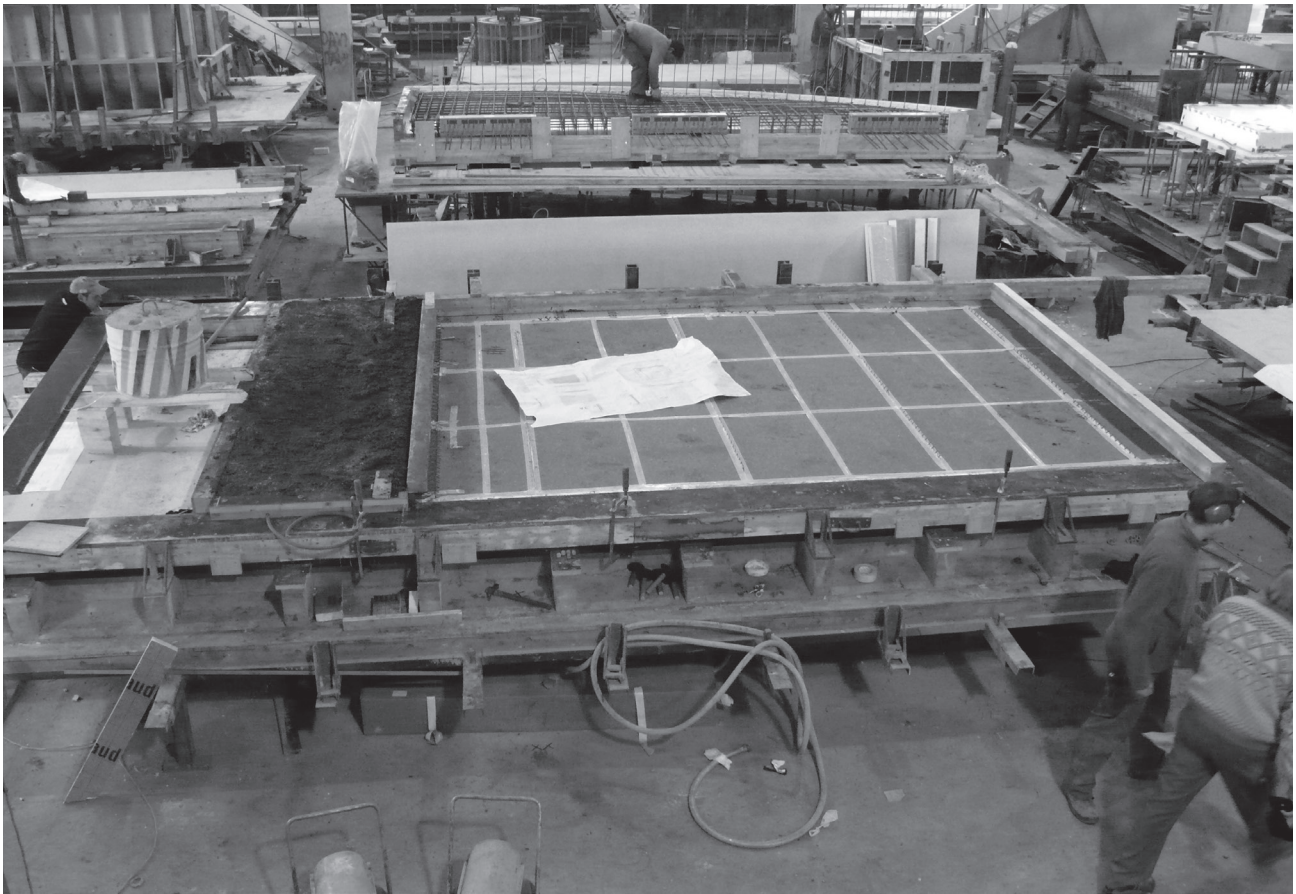
# PROJET PILOTE<sup>1</sup>

Dans un deuxième temps, un projet pilote de villa individuelle a été réalisé par le bureau d'architectes Bassi-Carella. Il a permis de vérifier concrètement l'ensemble du processus de fabrication. Les panneaux sandwich préfabriqués développés pour la villa sont constitués d'une couche structurale, d'un isolant et d'un revêtement en béton coloré. Cette expérience a mis en pratique et en examen nos recherches développées jusqu'ici, soit la composition multicouche de l'isolation, une nouvelle technique d'assemblage des voiles de béton et la réduction d'épaisseur du voile de parement grâce à des armatures en matière synthétique.

Ce projet, dont le gros de la matière consiste en des panneaux porteurs, se prête bien à leur expérimentation. Bien que principalement préfabriquée, cette construction hybride contient des parties coulées sur place, comme les dalles et les nez de dalle. Dans le cadre du processus du projet, une première réflexion décompose les façades de la villa en éléments de grandes dimensions approchant les 8 m. Cette mesure correspond à une dimension maximale pour des éléments d'immeubles de logement. La fabrication d'un panneau de grande taille permet de réduire le temps de production, de diminuer la quantité de détails nécessaires à sa mise en œuvre, de réduire la manutention ainsi que le transport. La villa comporte alors onze panneaux pleins, dont le poids varie entre 6 et 12 t chacun. La géométrie de ces murs est volontairement simplifiée et réduite à l'essentiel. Ceci permet d'appliquer la couche de l'isolant sur une grande surface de manière continue. Les murs sont calepinés sur la base de deux formats de plaques d'isolation préfabriquées, un petit format de 28 × 90 cm et un grand format de 60 × 90 cm (p. 109). La fabrication des panneaux d'isolation demande un soin particulier. La couche de l'isolant ultra performant est de quelques millimètres en retrait afin que les parties en EPS graphité assurent un jointoiment étanche en légère compression et empêchent ainsi l'infiltration du béton coulé sur la couche de l'isolant. Une fois le panneau terminé, seules les tranches des isolants sur le pourtour restent visibles (p. 110). Ces parties sont, en quelque sorte, protégées par l'avancée de la couche de parement. Cette expérience démontre que la mise en œuvre sur le chantier de ces murs ne représente pas de danger d'endommagement potentiel des isolants.

De manière générale, dans un panneau en béton préfabriqué on retrouve, entre le mur, l'allège et la réservation du caisson de store, trois épaisseurs d'isolations distinctes. Au niveau de la coupe dans le mur plein, elle correspond, dans notre cas, à 14 cm. Dans la coupe sur le caisson de store et la fenêtre en retrait, l'épaisseur est de 4 cm. La troisième se trouve sur la partie de l'allège qui ne réclame pas impérativement de strate structurale et a une épaisseur d'isolant de 28 cm. En fonction de ces détails, le choix de l'isolant peut être adapté et optimisé thermiquement et économiquement. Dans le cas de la villa, seul celui du mur avec l'épaisseur de 14 cm a été mis en œuvre.

<sup>1</sup> T. Voellinger, *Schlank und effizient*, Werk, bauen+wohnen, Zürich 2011, vol. 1/2, p. 34-41



© LEO FABRIZIO

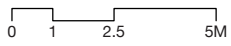
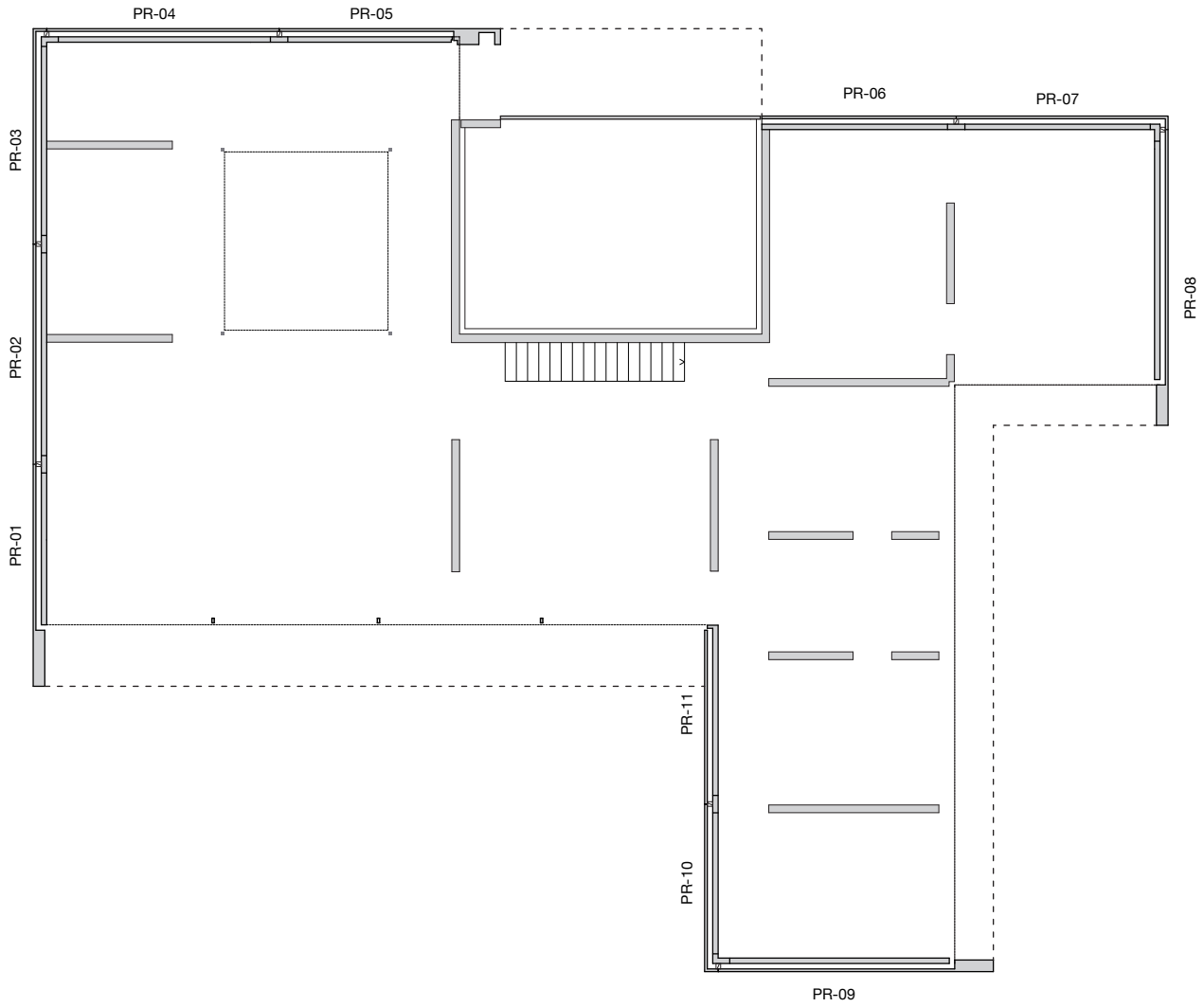
Element de façade en préfabrication, novembre 2010  
LAURE EPFL









© LEO FABRIZIO

Pose des éléments préfabriqués sur le chantier du projet pilote, décembre 2010  
LAURE EPFL



-  MUR PORTEUR A HAUTE PERFORMANCE THERMIQUE
-  MUR PORTEUR
-  AVANT-TOIT
-  OUVERTURE

**Plan de pose des éléments du projet pilote**  
Bassi-Carella, Genève, 2011

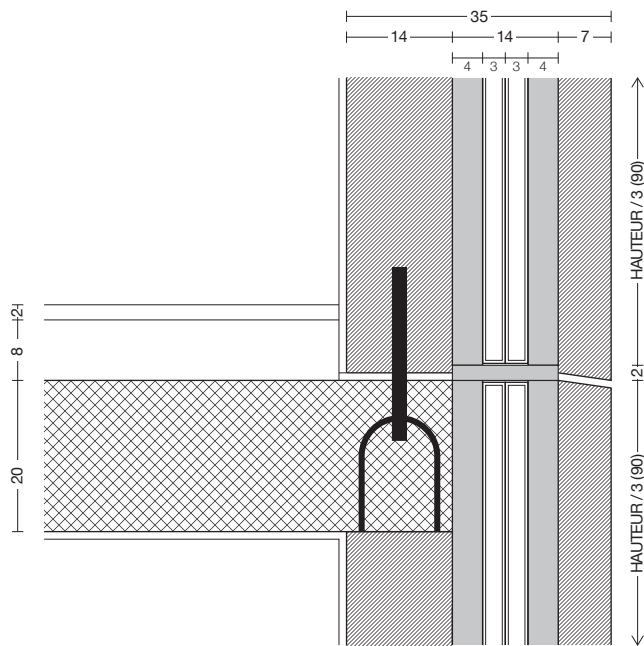
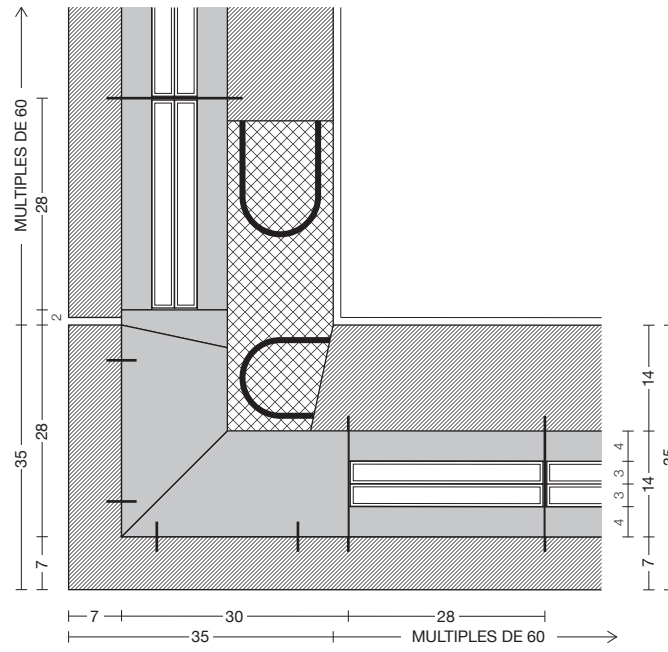
# LES DETAILS\*

Dans le cadre de notre recherche, il était important de respecter les principes de savoir-faire de l'entreprise, tant au niveau de la préfabrication qu'au niveau de sa mise en place sur le chantier (pp. 104 et 105). Dans le processus de la préfabrication, nous avons optimisé et simplifié la pose des nouveaux isolants en réduisant le temps de travail. Celui-ci est avancé en amont dans la préparation qui est réalisée à l'entreprise productrice des isolants. Les différentes couches sont assemblées, numérotées et emballées, prêtes à être installées dans les panneaux sandwich. La pose de l'isolant est une action qui demande aujourd'hui un travail contrôlé et systématique. Le calepinage des éléments d'isolation préfabriqués à haute performance doit être précis car il n'est plus possible de découper et mettre en forme la matière comme on le faisait traditionnellement. Des détails types de raccords et des dimensions standards doivent dès lors être pris en considération et respectés au fur et à mesure du développement du projet. Deux formats de panneaux d'isolant sont théoriquement suffisants (p. 109). Pour des raisons propres à la fabrication des isolants sous vide, les panneaux ne peuvent pas excéder 1.2 m. Il n'est donc pas possible de poser uniquement deux éléments d'isolation pour une hauteur d'étage. De plus, un élément de cette taille aurait un poids considérable qui ne pourrait que difficilement être manipulé. Pour définir les standards des panneaux VIP, nous avons opté pour une hauteur qui correspond au tiers de la hauteur minimale d'un logement standard, soit 90 cm. En largeur, nous proposons un multiple qui s'intercale dans une travée structurelle, soit d'une dimension de 60 cm. Les petits formats d'isolation doivent être posés sur les extrémités du panneau préfabriqué afin de rapprocher les fixations du bord et d'éviter un voilement du parement.

L'assemblage vertical des panneaux préfabriqués sur le chantier se fait par un clavage (p. 109). Le complément d'isolation se fait traditionnellement avec une mousse en polyuréthane. Ce complément d'isolation n'est souvent pas garanti car son exécution finale ne peut pas être contrôlée visuellement. Pour optimiser ce complément d'isolation, un joint mécanique est proposé. Avec l'introduction de deux cales en EPS graphité agencées en quinconce, ce détail est garanti. En chassant les cales dans un espacement plus généreux, elles se mettent en compression et assurent ainsi la continuité de la couche d'isolation. Ces cales peuvent être préparées et coupées avec un fil chaud. Cette technique a été vérifiée en simulation numérique ainsi qu'en thermographie et s'avère très efficace.

En ce qui concerne le joint vertical, le complément d'isolation peut se faire avec un isolant compressible soit de la laine de verre ou de pierre (p. 109). En effet, le panneau préfabriqué, une fois posé, empêche l'accessibilité du complément d'isolation. Ces bandes de laine de verre doivent être posées sur l'isolant du panneau inférieur avant la pose du panneau supérieur. La composition des pièces d'angles et d'acrotère ne nécessite pas un isolant ultra-performant, car le transfert de chaleur dans l'angle est moins important que dans le détail du mur.

\* Représentation des détails aux pp. suivantes 108 et 109

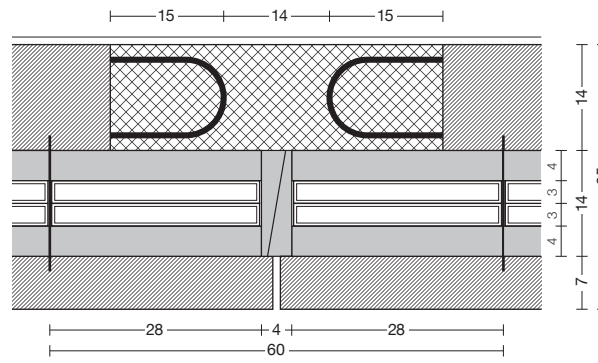









- BETON
- EPS GRAPHITE
- VIP (VACUUM INSULATED PANEL)
- PLATRE / CREPI
- BETON COULE *IN SITU*
- FERRAILLE
- CONNECTEUR

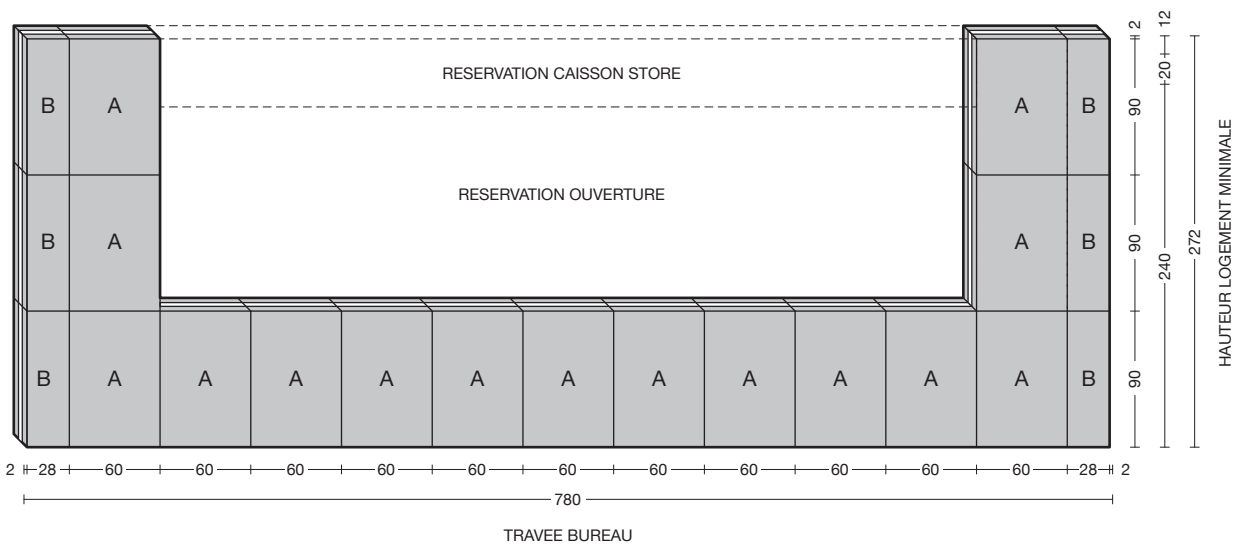
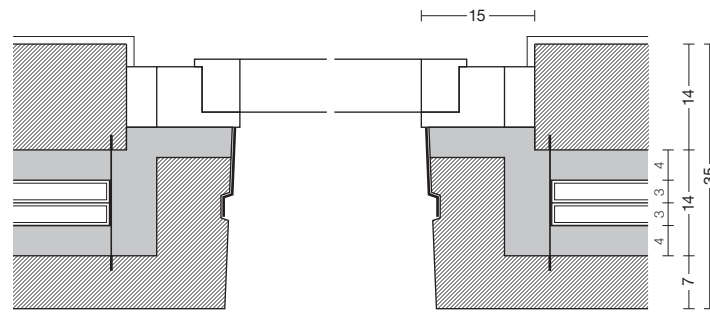
**Haut : clavage d'angle entre deux panneaux porteur en béton préfabriqué**  
LAURE EPFL

**Bas : raccord horizontal**





-  BETON
-  EPS GRAPHITE
-  VIP (VACUUM INSULATED PANEL)
-  PLATRE / CREPI
-  BETON COULE *IN SITU*
-  FERRAILLE ET PIECE METALLIQUE
-  CONNECTEUR



**FORMATS DES ELEMENTS D'ISOLATION**

- A 90 x 60 CM
- B 90 x 28 CM

Haut : clavage entre deux panneaux et détail de la fenêtre  
LAURE EPFL

Bas : principe de disposition des panneaux VIP dans un élément-type



© LEO FABRIZIO

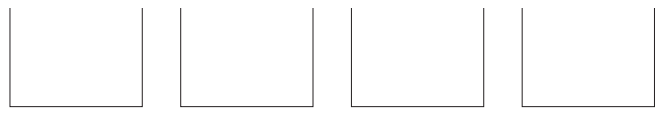
Tranche d'un panneau porteur en béton préfabriqué et à haute performances thermiques (projet pilote)

## Conclusion

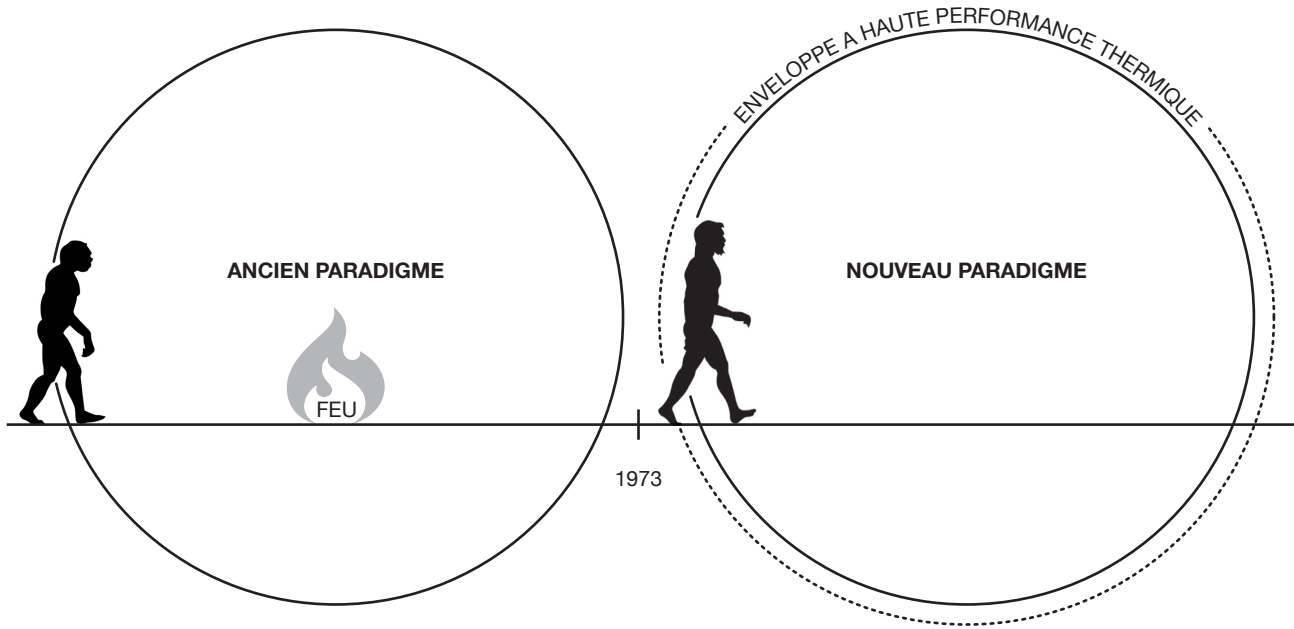
L'expérience du projet pilote confirme qu'il est possible aujourd'hui de construire des murs en béton préfabriqué minces tout en assurant des exigences thermiques importantes et sans devoir modifier le processus de préfabrication en place. Le changement principal constaté consiste en un nouveau rapport à la matière de l'isolant dans le déroulement de la préfabrication. L'isolant n'est plus appliqué sous une forme brute mais de manière précise et systématique. Le but de la recherche est la maîtrise et un contrôle de l'épaisseur de l'isolation. Ce dimensionnement devra respecter les géométries liées aux détails de construction. Dans le cas du détail du caisson de store standardisé et intégré au mur, l'espacement entre les deux voiles en béton est de 14 cm. Cette mesure coïncide avec un optimum atteint dans le domaine des connecteurs qui relient les deux voiles de béton. Cette indication donne la règle de l'épaisseur minimale, dont découle l'ensemble des détails constructifs du panneau sandwich. Le but est de conserver ce minimum. Cette contrainte nous a poussé à trouver des solutions pour déterminer une combinaison d'isolants à même de garantir la performance thermique exigée.

La proposition est de mélanger plusieurs types d'isolants ; des isolants classiques avec un isolant ultra-performant de type *Vacuum Insulated Panel* (VIP). Des proportions de mélange particulier sont définies et choisis en fonction de leur performance thermique, de leur impact sur l'environnement et de leur prix. Le but est de conserver une épaisseur constante à partir de la conception du projet jusqu'à sa réalisation. Le travail de recherche s'est inscrit dans une réflexion de continuité et d'affinage de techniques de préfabrication existantes. L'objectif est de pouvoir appliquer ces principes à des bâtiments de plus grande échelle, tels que des immeubles de logements et de bureaux. Aujourd'hui, la technique de préfabrication vise la culture de l'architecture urbaine et celle-ci ne cherche pas le spectaculaire, mais une certaine normalité et la continuité du développement de nos villes.





# CONCLUSION





# CONCLUSION

Cette étude a permis d'élaborer et de réaliser des murs à haute performance thermique dans le domaine de la préfabrication en béton à Genève. Les résultats de cette recherche prouvent que les exigences fixées par les objectifs de la *Société à 2000 Watts* peuvent être atteints. En d'autres termes, nous avons rendu possible la construction de murs statiquement et thermiquement performants, tout en conservant une technique de mise en œuvre existante.

Il est maintenant clair que dans l'architecture, l'utilisation d'une couche d'isolation dans l'enveloppe du bâtiment est incontournable. Nous avons noté que l'importance de cette donnée a longtemps été ignorée, car l'usage des énergies fossiles était bon marché et accessible. Dans les années à venir, suite à l'épuisement de la moitié de ces ressources, cette situation va changer. Les directives prédictives de la *Société à 2000 Watts* nous engagent à viser la haute performance thermique et l'application de matières isolantes pour l'enveloppe du bâtiment. Il s'agira donc de trouver des solutions adéquates pour toutes les techniques de construction existantes. Dans le cadre de cette recherche, la strate de l'isolant a été étudiée dans le but d'optimiser son épaisseur et de répondre au problème actuel lié à ses proportions toujours croissantes. Nous avons démontré, par l'analyse, que des isolants mixtes pour des exigences thermiques importantes ont des valeurs économiques et écologiques plus intéressantes qu'un isolant seul. Par les gains qu'elle génère (temps, matières, surfaces brut de plancher), cette proposition apporte autant d'avantages dans la préfabrication que dans l'exploitation du bâtiment construit.

Reste à l'encontre de notre proposition la critique du coût qui est plus important que les solutions actuelles de construction. Ce renchérissement est inévitable si nous voulons conserver une qualité de vie élevée, c'est-à-dire un confort thermique approprié, en respectant l'environnement. L'homéostasie de l'espace intérieur peut être maintenue grâce à des murs à haute performance thermique en réduisant l'apport de chaleur issu d'énergies fossiles. En effet, habiter sans consommer de ressources fossiles dans des bâtiments en béton préfabriqué est enfin possible. Ces cinquante dernières années, cette culture du béton s'est avérée très efficace et durable pour le logement à haute densité dans des milieux urbains. Le développement de murs à haute performance thermique vise avant tout des bâtiments économiques dans l'ensemble du projet (espace, temps, matière) et devient ainsi accessible à des programmes sociaux.

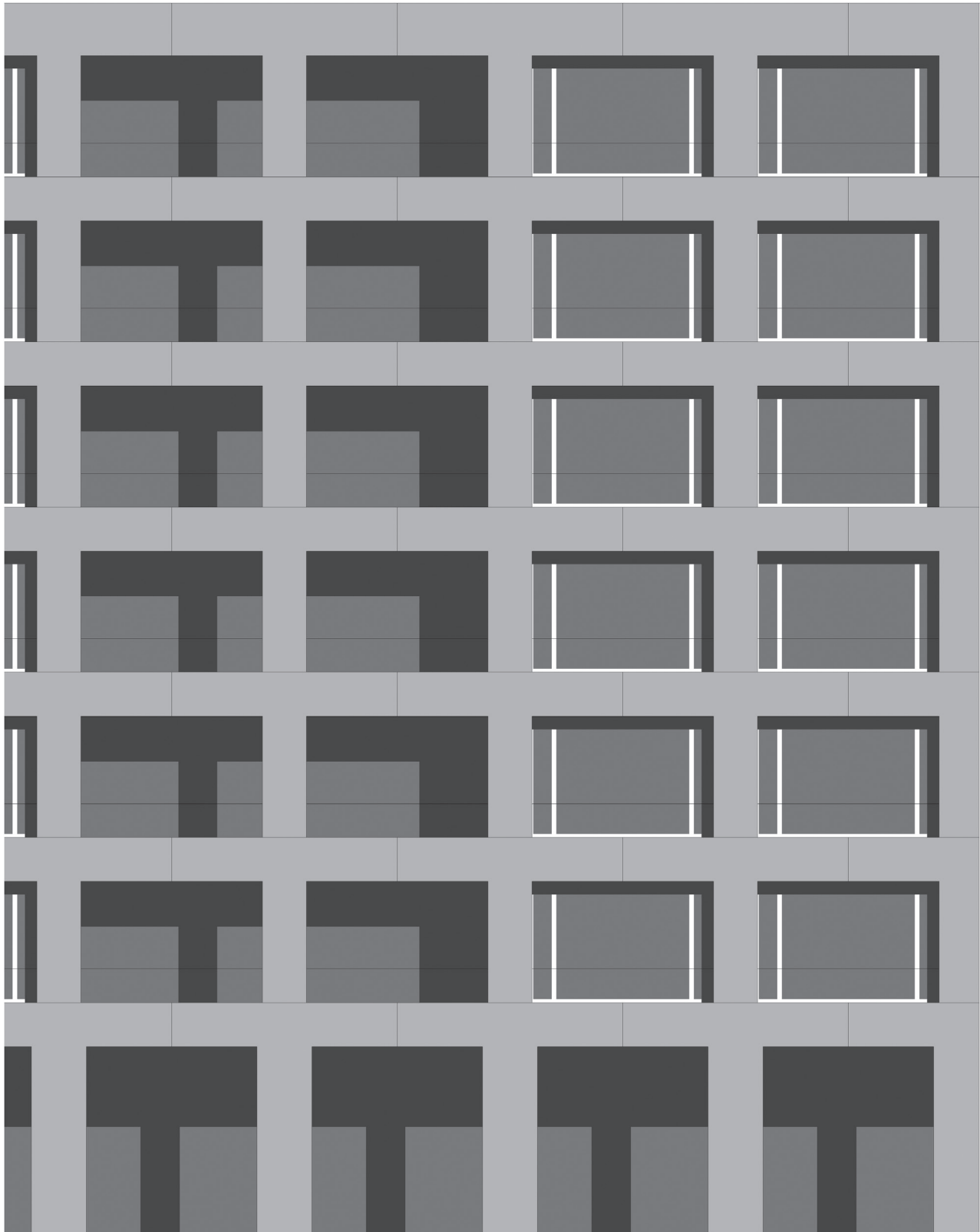
Bientôt, les exigences thermiques réclameront de la haute performance dans l'enveloppe du bâtiment. Le mur ne représente qu'une partie de celle-ci. Reste à développer et faire concorder l'interaction entre les ouvertures et les cadres, les systèmes de protection contre la surchauffe, ainsi que la maîtrise et la gestion homéostatique du climat intérieur.



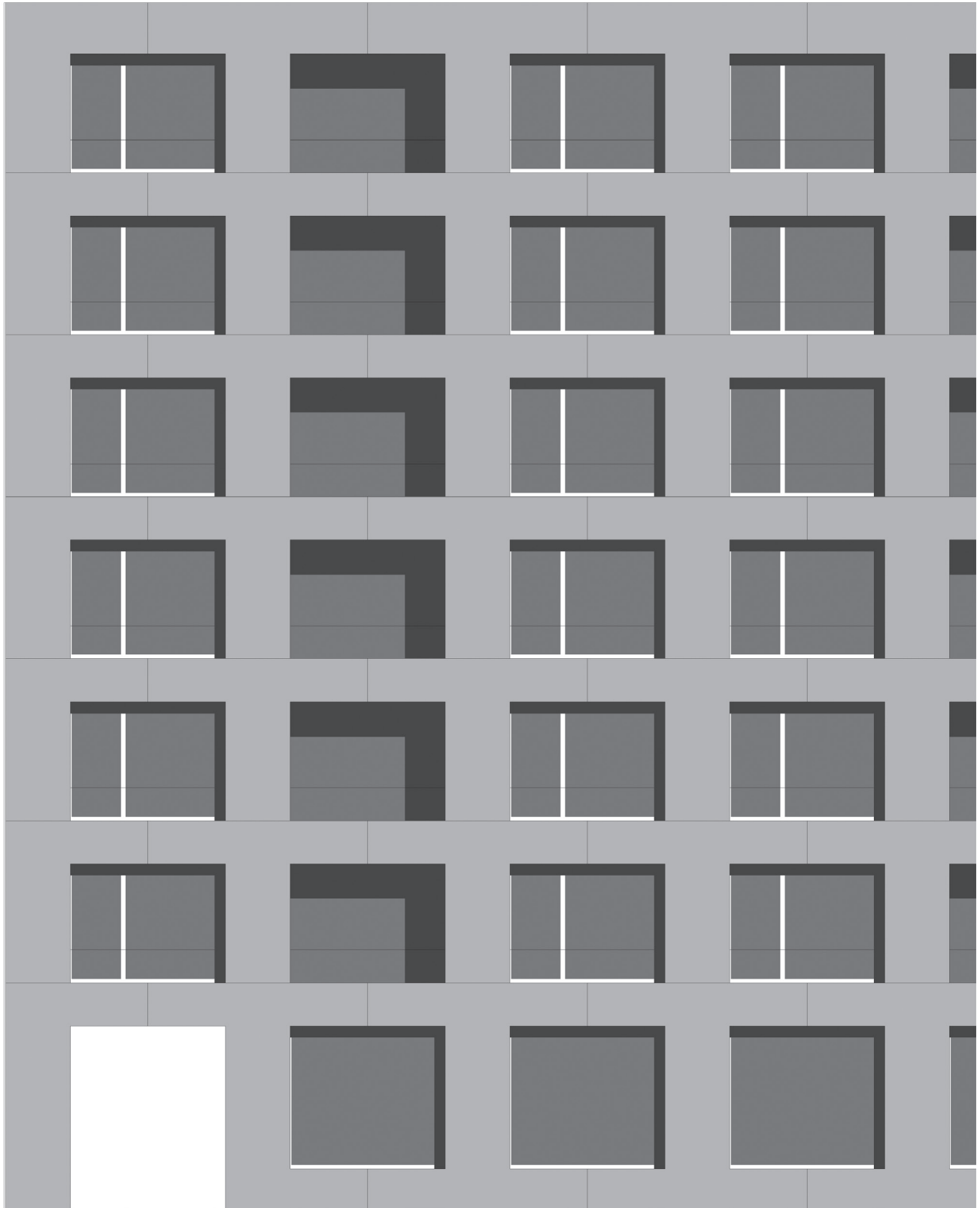




# ANNEXES



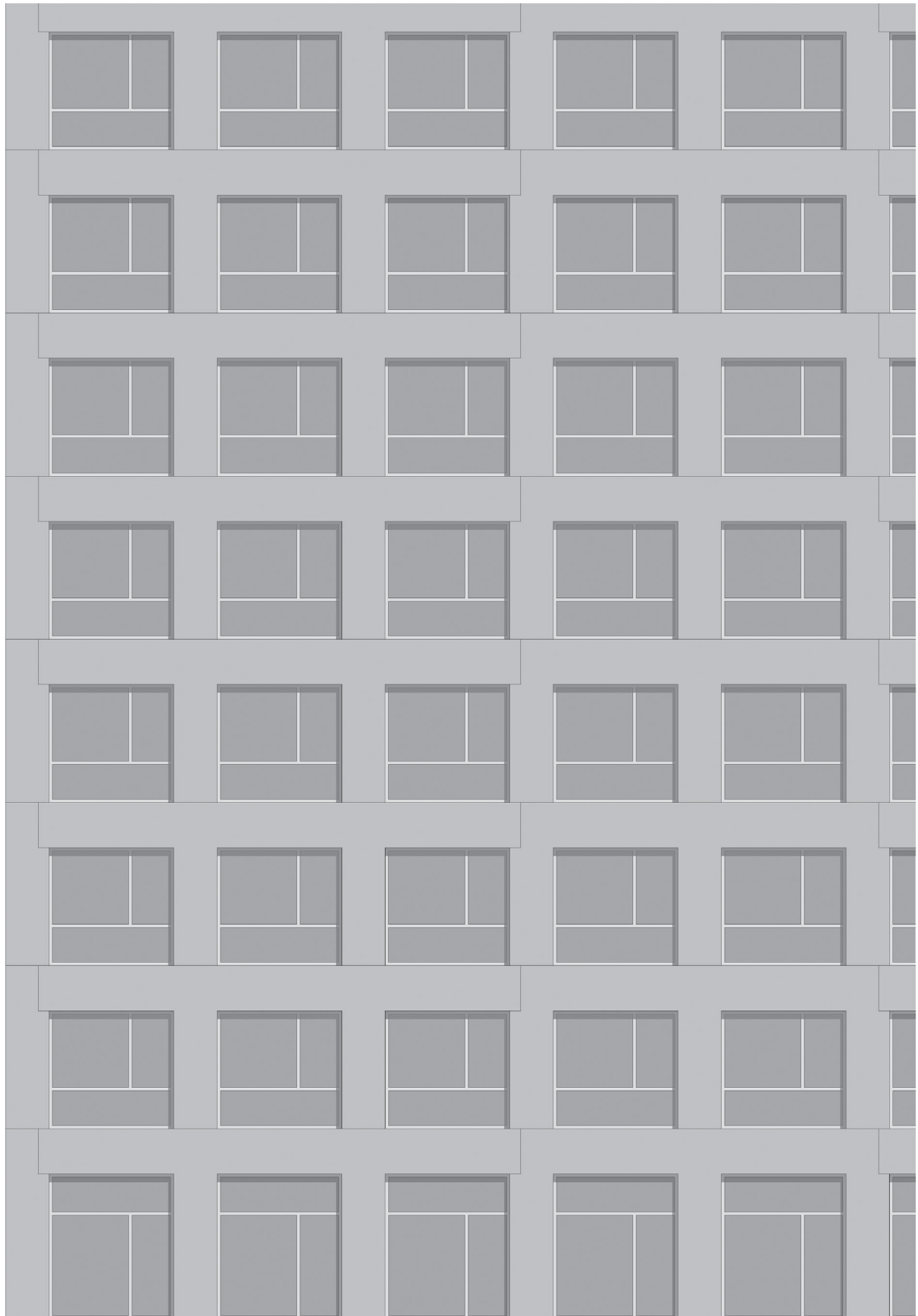
Antoine Costa, automne 2008  
bureaux, 40% obstruction



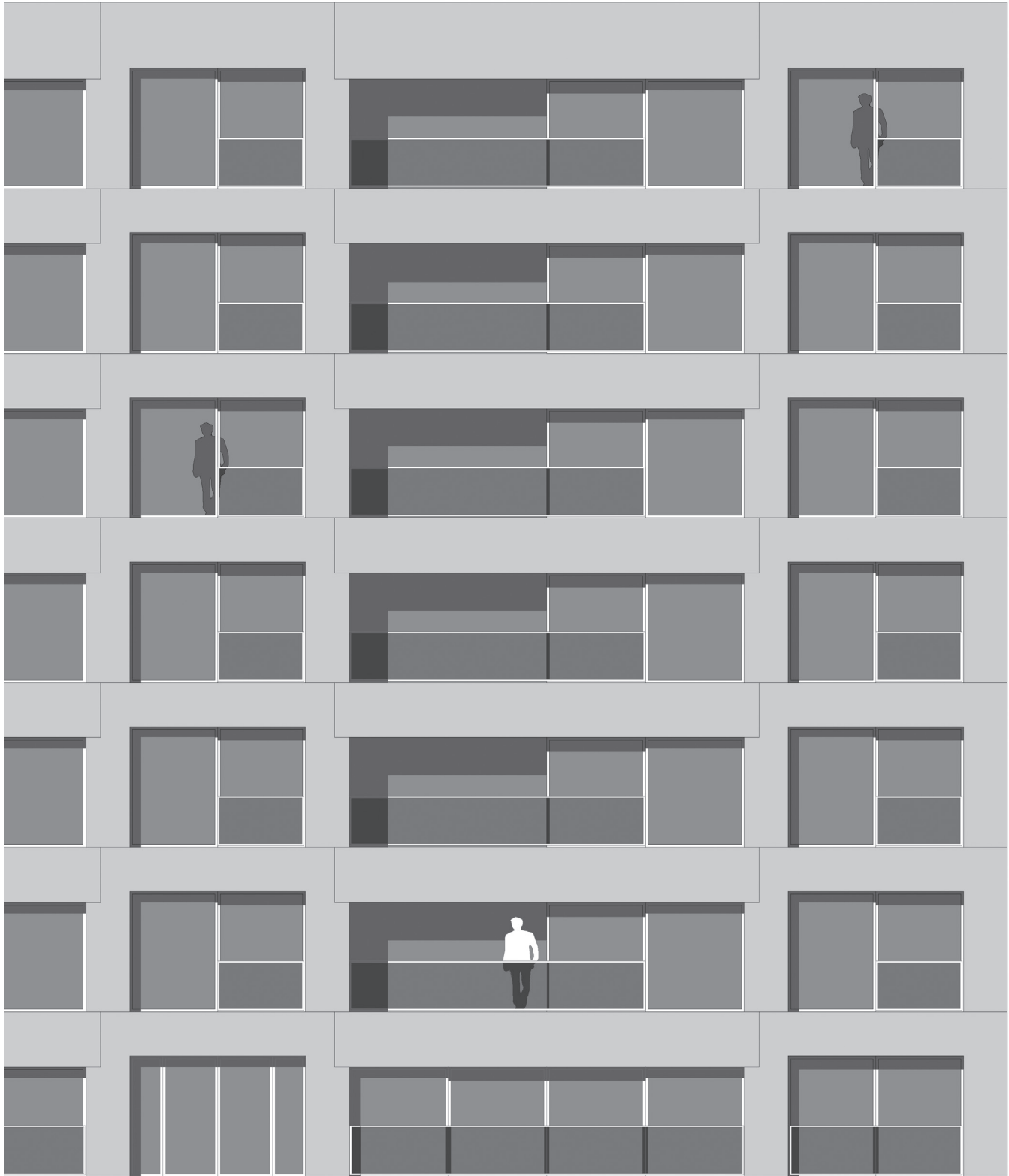
logement, 50% obstruction



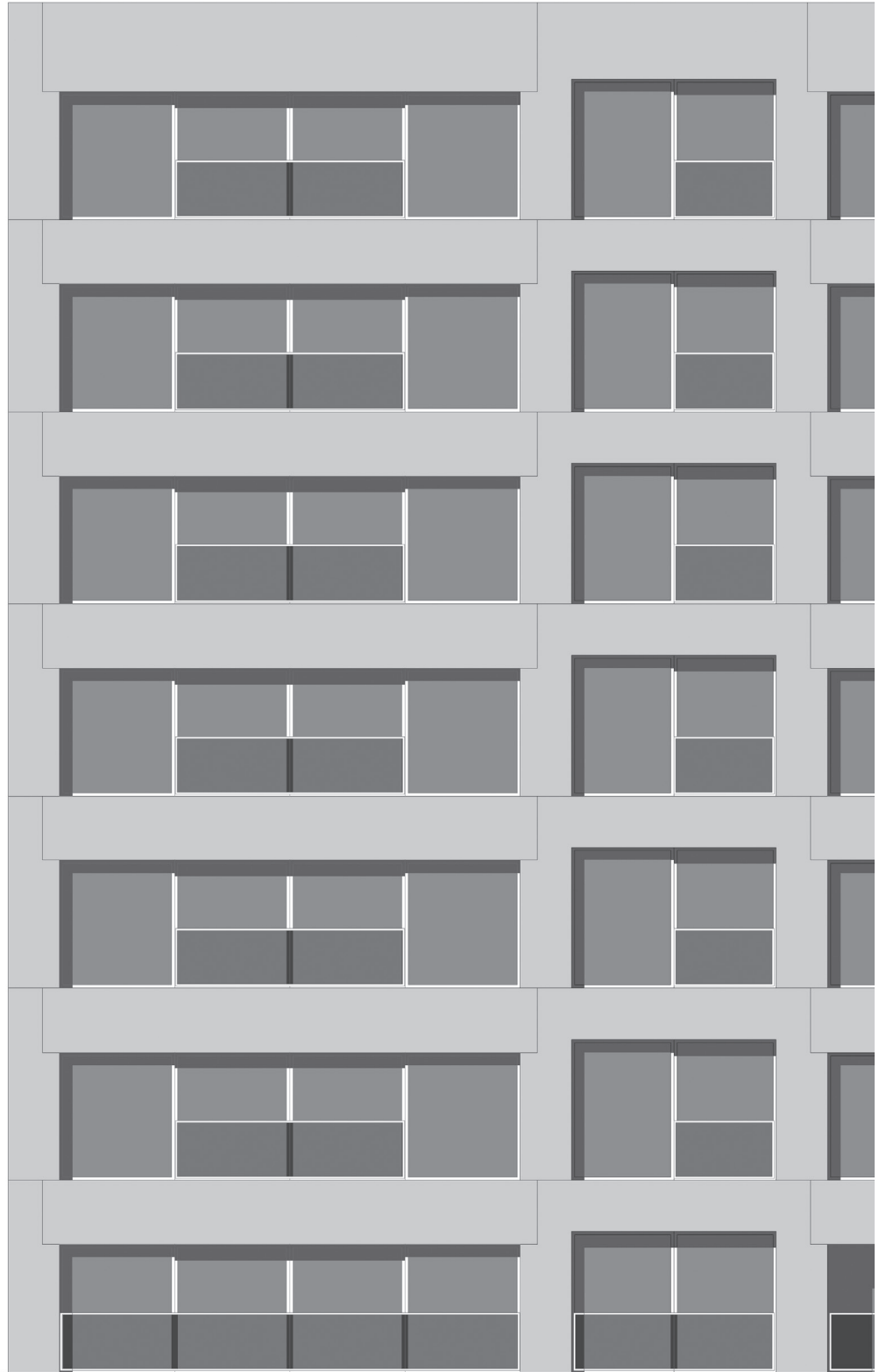
Vincent Zollinger, printemps 2008  
logement, 50% obstruction



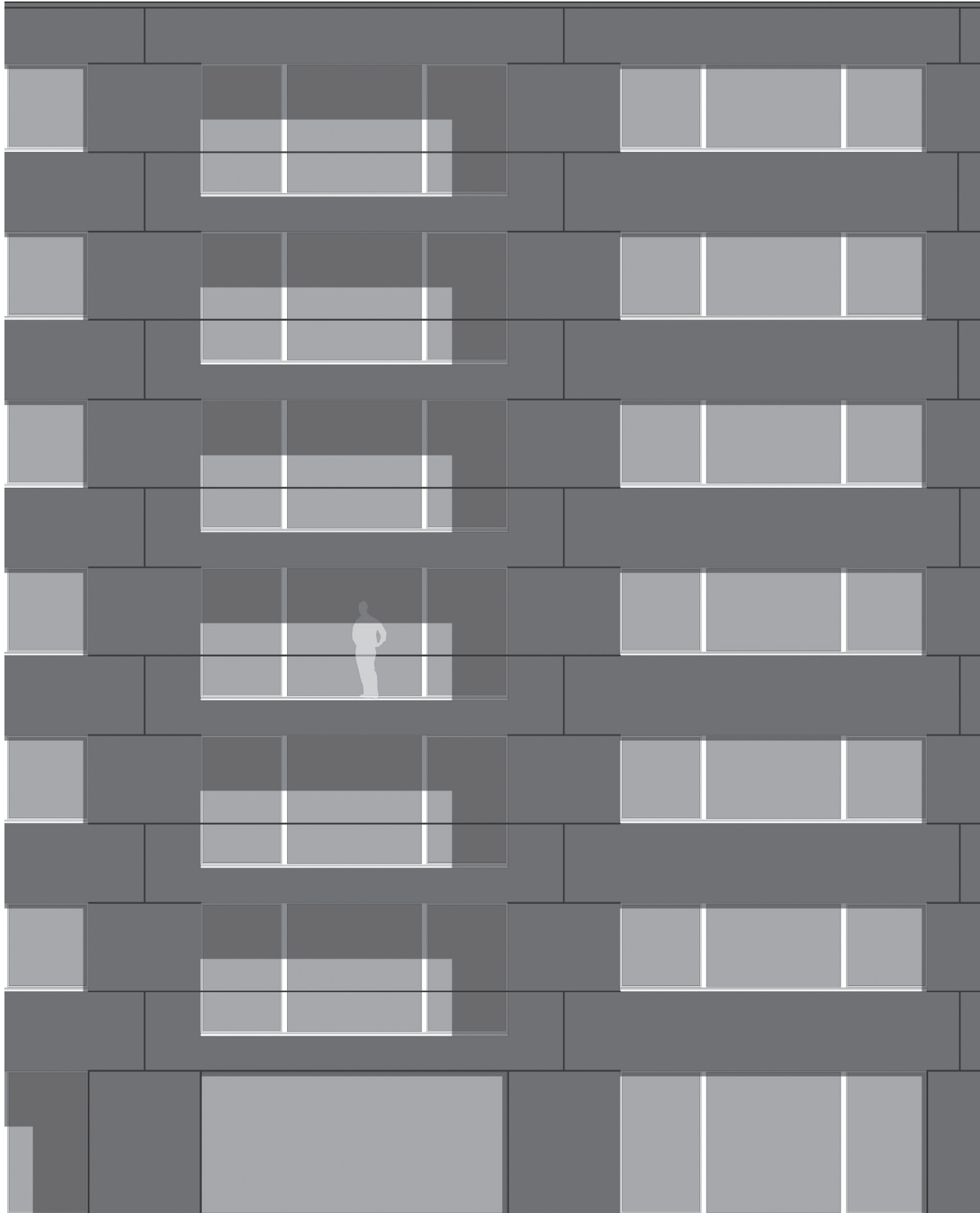
logement, 40% obstruction



Michèle Jemini, printemps 2009  
logement, 50% obstruction

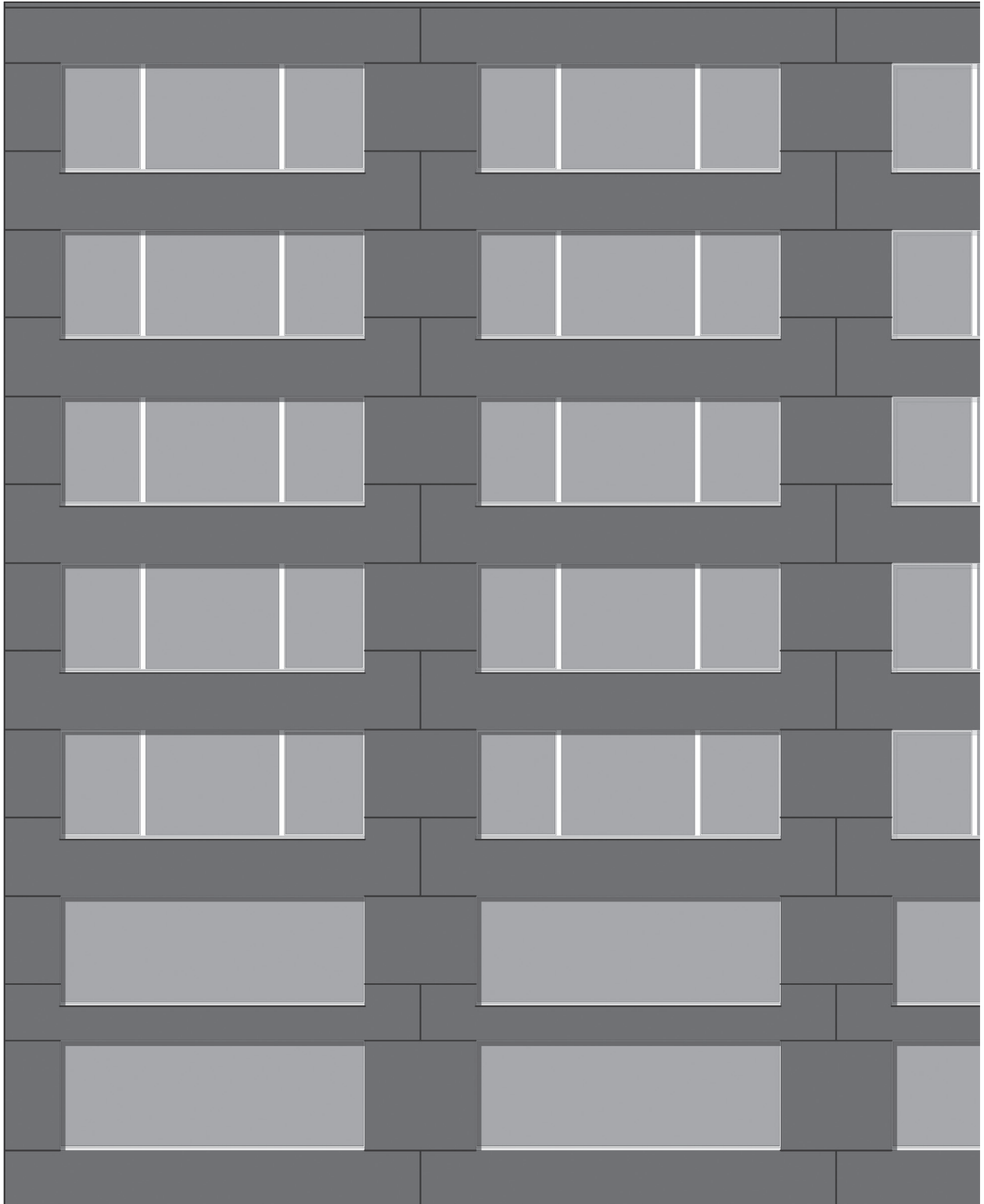


logement, 50% obstruction

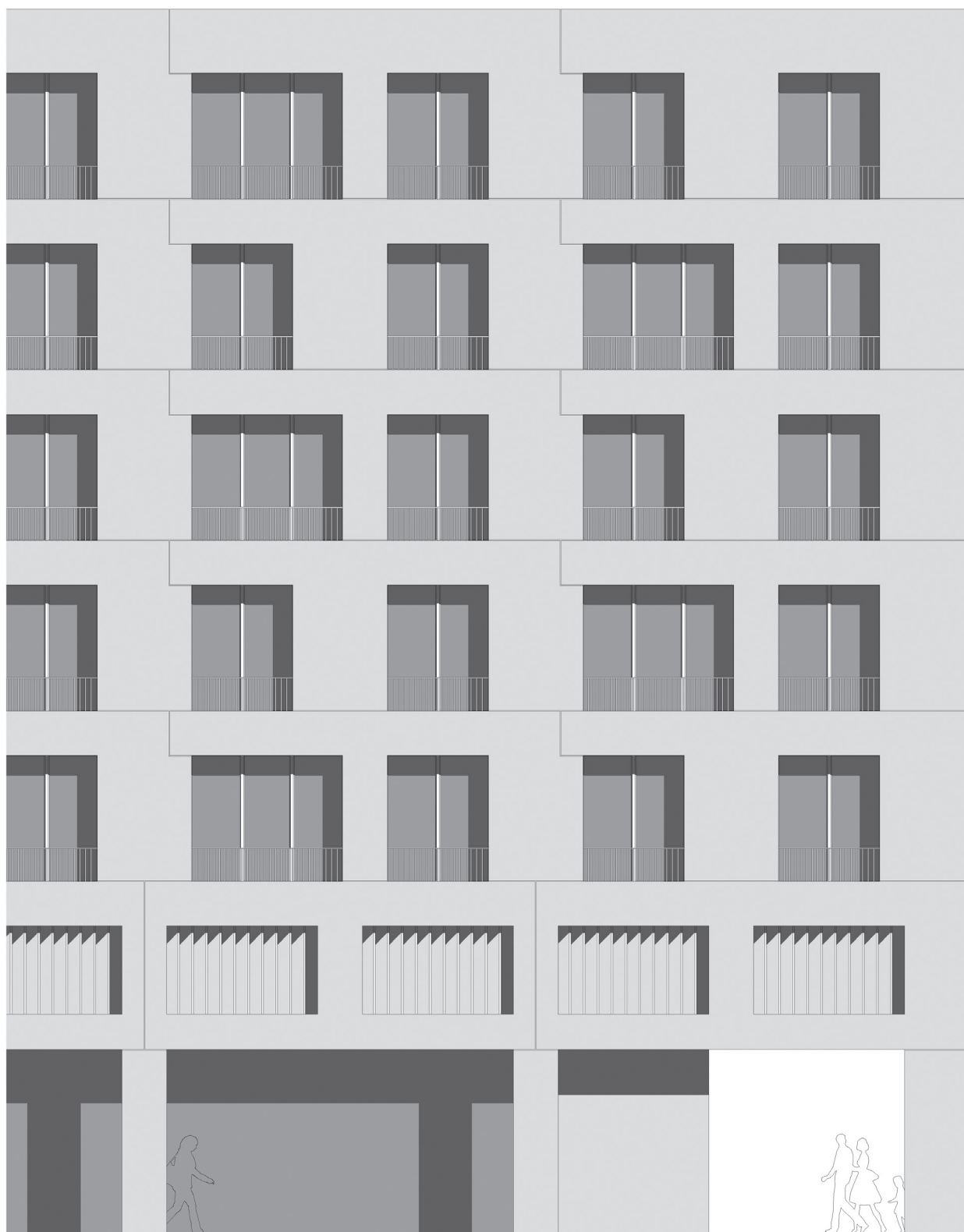


**Jade Rudler, automne 2008**  
logement, 60% obstruction

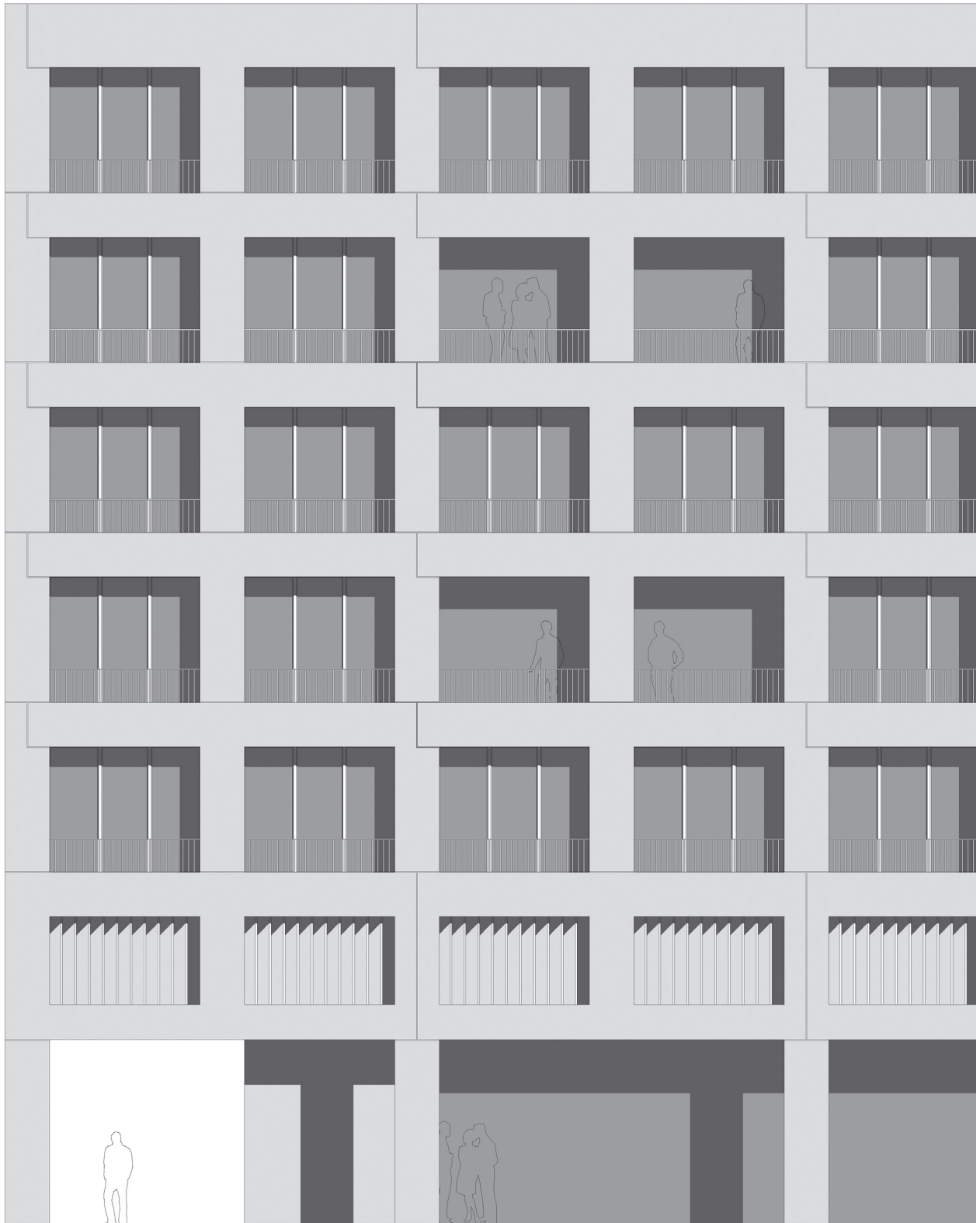




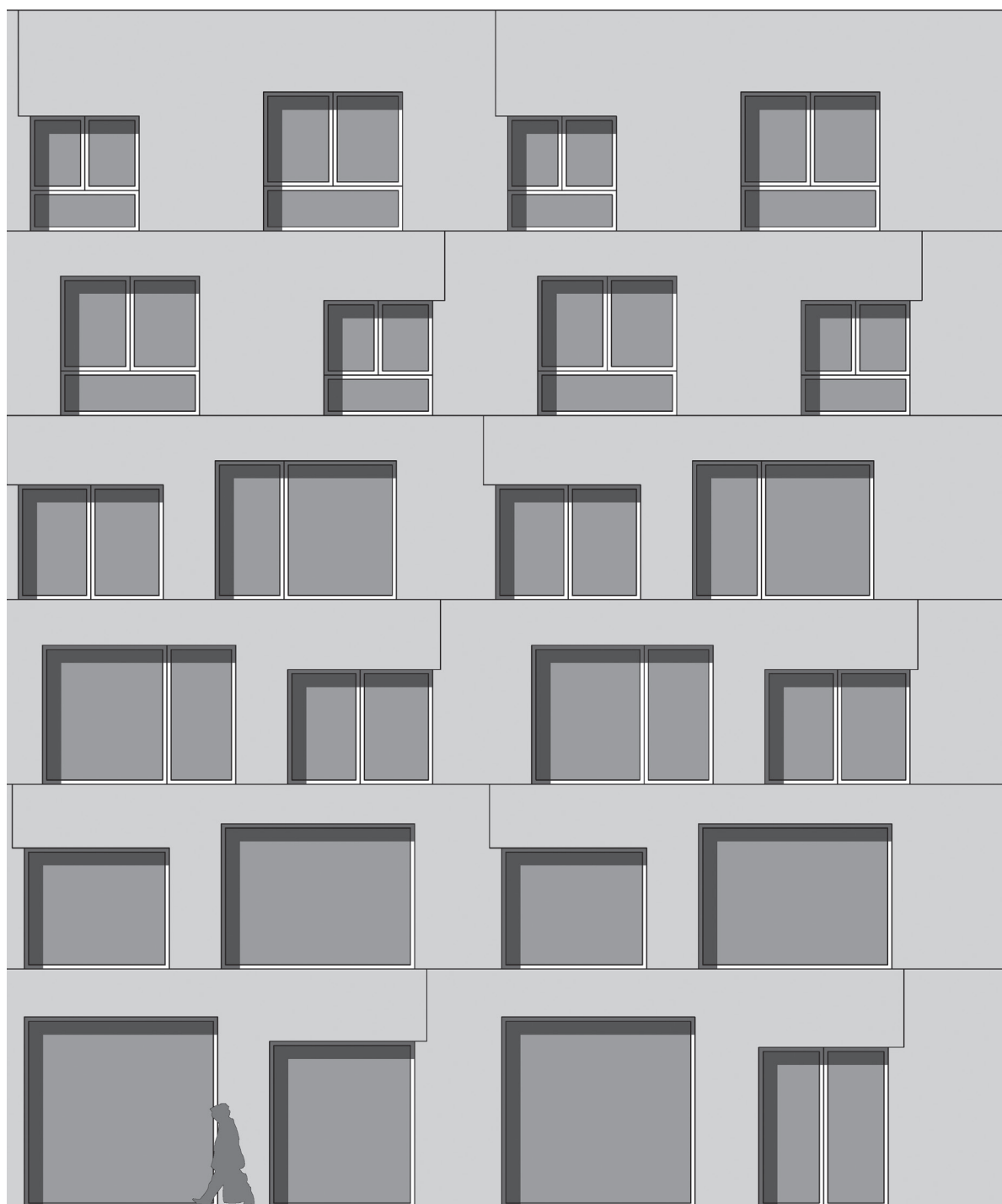
logement, 50% obstruction



**Konstantinos Dell'Olivo, automne 2008**  
logement, 60% obstruction



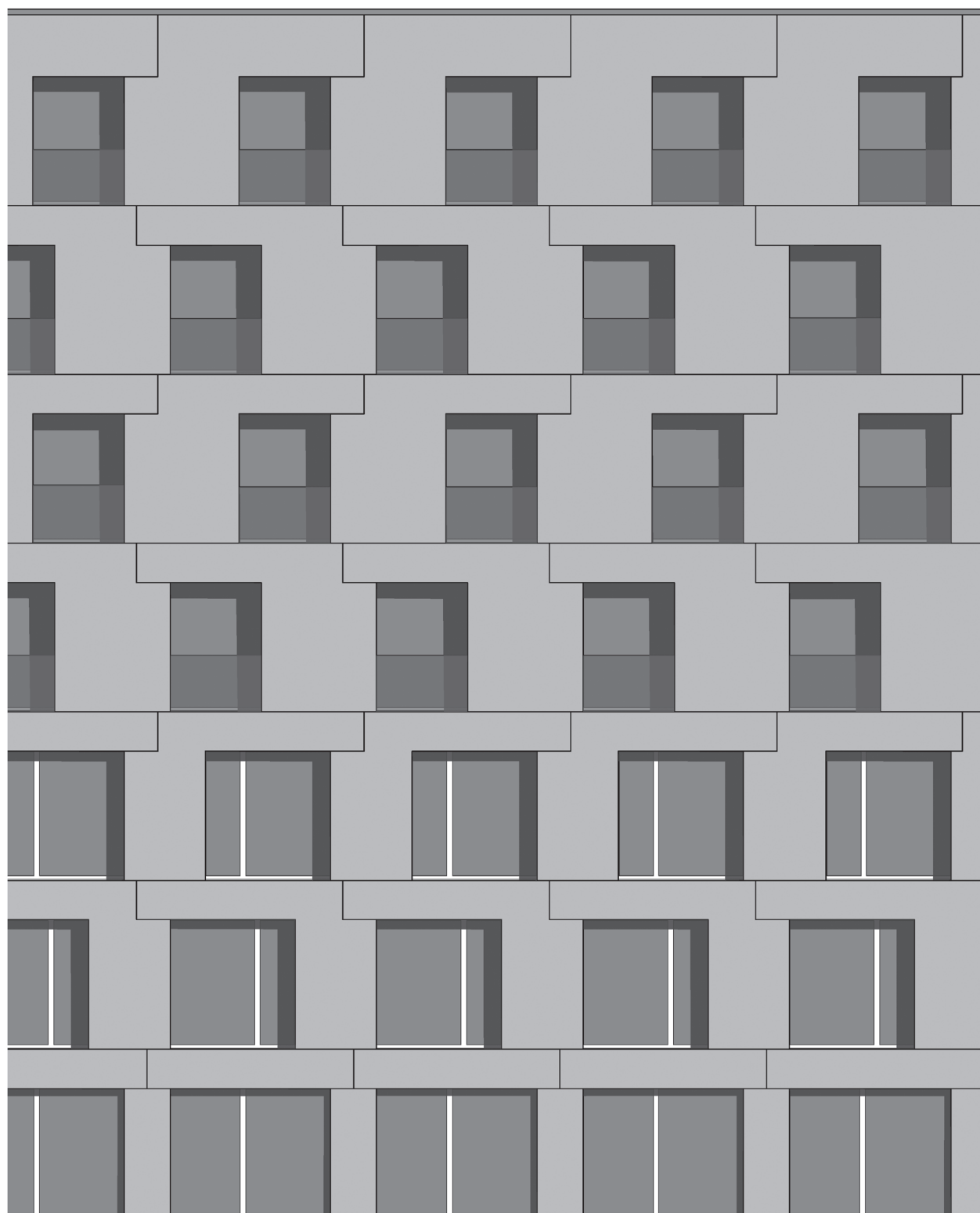
logement, 40% obstruction



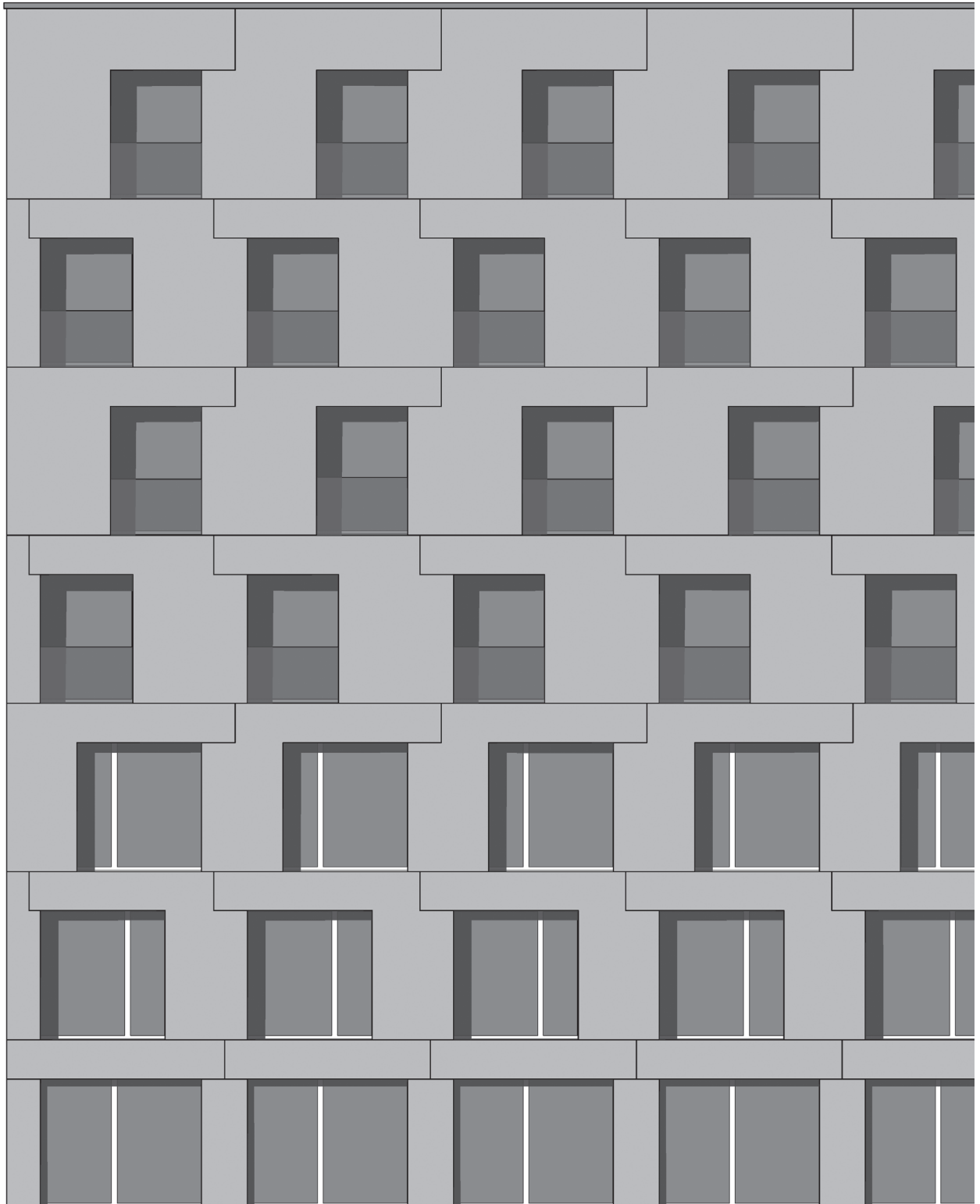
**Antony Estevez, printemps 2010**  
logement, 50/60% obstruction  
bureaux 50% obstruction



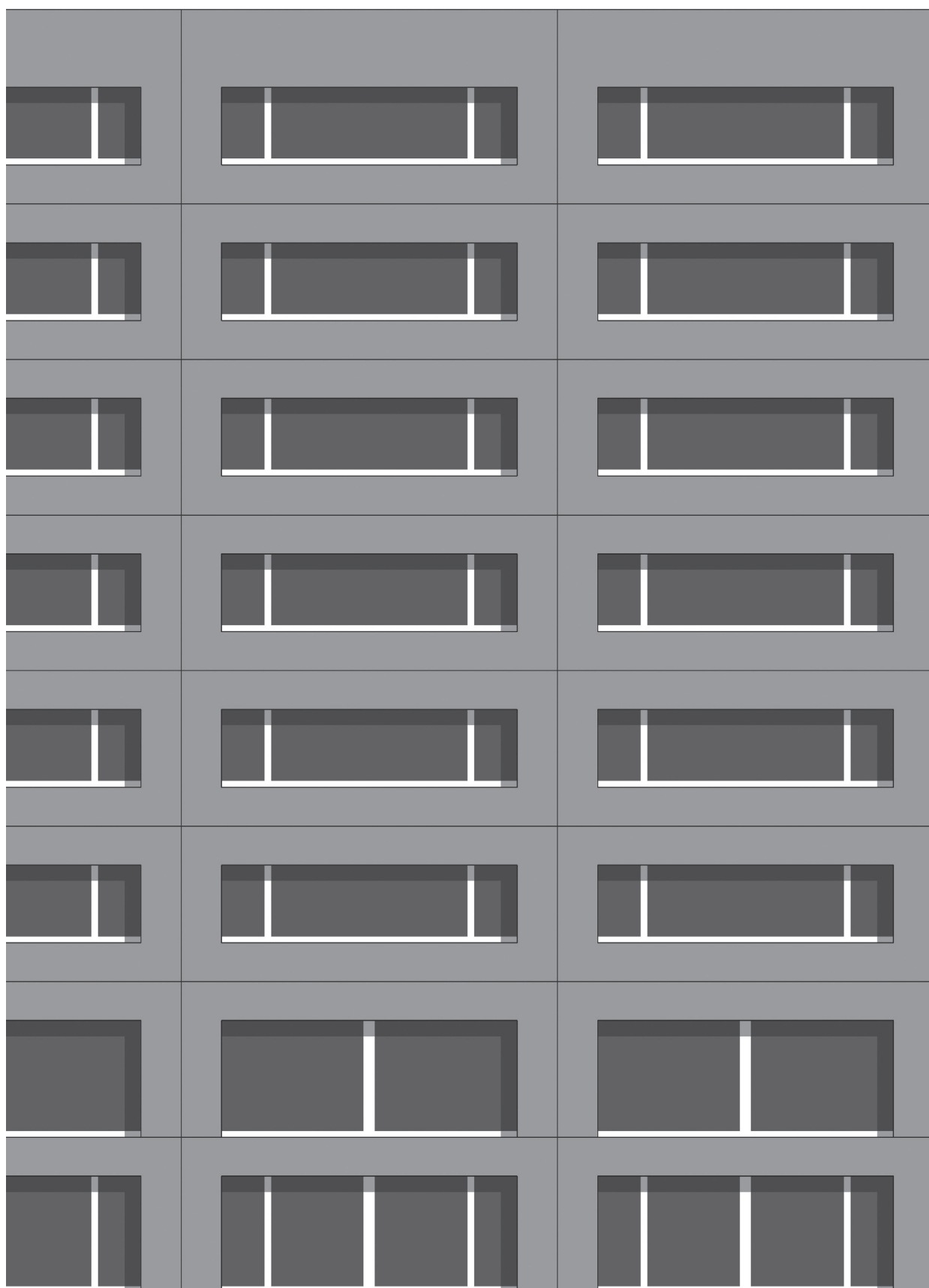
logement, 50/60% obstruction  
bureaux 50% obstruction



**Claire Hyvernaud, automne 2008**  
logement, 60% obstruction  
bureaux 50% obstruction

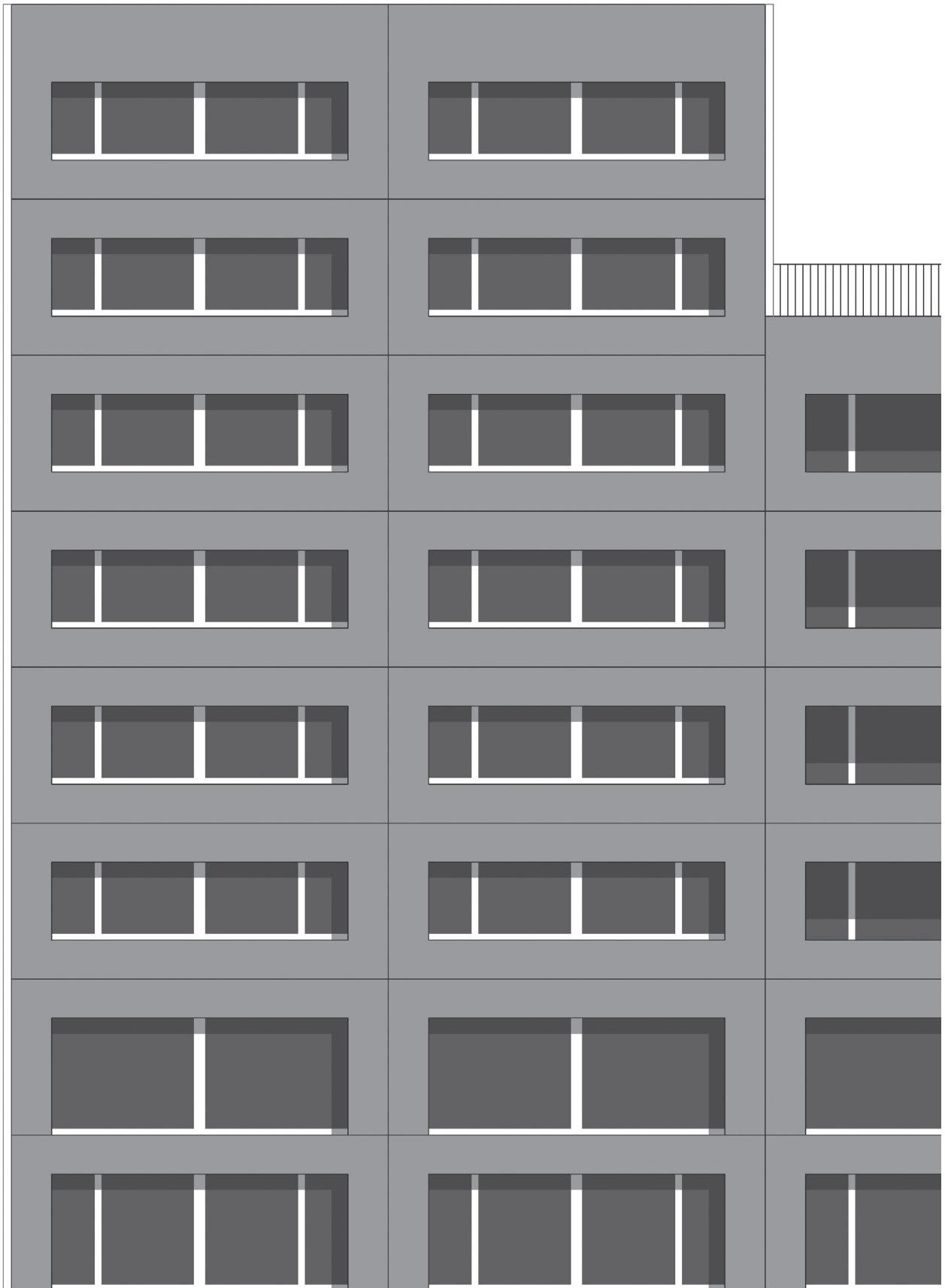


logement, 60% obstruction  
bureaux 50% obstruction



Cyril Flury, automne 2008  
bureaux 60% obstruction





logement, 60% obstruction



# BIBLIOGRAPHIE

### Philosophie des sciences

1. T.S.Kuhn, *The structure of scientific revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago 1962
2. C.Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, 1865, rééd Garnier-Flammarion, Paris 1966
3. A. Reichenbach, *Anleitung für das Schreiben der Dissertation*, Paul-Flehsig-Institut, Universität Leipzig 2007

### Histoire de l'architecture

4. G. Fanelli et R. Gargiani, *Histoire de l'architecture moderne Structure et revêtement*, PPUR, Lausanne 2008
5. R. F. Gatje, *Marcel Breuer, A memoir*, The Monacelli Press, New York 2000
6. P. Jodidio, *J. M. Pei Architecte*, Edition du chêne, Paris 2008
7. C. W. Condit, *The Chicago School of Architecture*, The University of Chicago Press, Chicago 1964
8. R. Bruegmann, *The Architects and the City*, The University of Chicago Press, Chicago 1997
9. P. Carter, *Mies van der Rohe at work*, Phaidon Press Limited, London 1974
10. C. Willis, *Form Follows Finance*, Princeton Architectural Press, New York 1995

### Préfabrication en béton

11. P. L'Hôte, E. Boget, *Guide pratique des façades préfabriquées en béton*, Association Suisse des professionnels du Béton Préfabriqué, Genève 1985
12. F. Graf, C. Bischoff, Y. Delemontey, P. Grandvoinnet, *Honegger Frères, de la production au patrimoine*, Infolio, Genève 2010
13. P. Abraham, *Architecture préfabriquée*, Dunod, Paris 1946
14. T. Koncz, *Handbuch der Fertigteilbauweise*, Bauverlag GMBH Wiesbaden-Berlin, Berlin 1962
15. S. Pereswiet-Soltan, *Edilizia residenziale prefabbricata*, itec - la prefabbricazione, Milano 1980

16. Dalla rivista "Industria Italiana del Cemento", *Industrializzazione e prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, A.I.T.E.C., Rome 1966
17. J. Bovet, *La préfabrication lourde à Genève*, Bulletin technique de la Suisse romande, vol. 89, 1963
18. J. Baretts, *Les procédés et l'organisation Baretts*, Journal de la construction Suisse Romande, vol. 36, N° 9, 1962
19. D. Zanghi, *Espoir et aléas de la préfabrication en Suisse romande, Le cas de l'usine Igeco à Etoy*, Matières, vol. 3, Lausanne 1999
20. T. Voellinger, *Schlank und effizient*, Werk, bauen+wohnen, Zürich 2011, vol. 1/2

### Béton

21. G. Delhumeau, J. Gubler, R. Legault, C. Simonnet, *Le béton en représentation*, Editions Hazan, Paris 1993
22. C. Hoffmann, F. Jacobs, *Recyclingbeton aus Beton und Mischabbruchgranulat, Sachstandbericht*, EMPA, Dübendorf 2007
23. Office fédéral de l'environnement, *Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux*, OFEV, Bern 2006

### Isolation et physique du bâtiment

24. M. Pfundstein, R. Gellert, M. H. Spritzner, A. Rudolphi, *Insulating Materials*, Edition Detail, Munich 2007
25. J.-P. Gay, *Énergétique du Bâtiment 1*, Architecture 2<sup>e</sup>, Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, Lausanne 1991
26. Association Suisse de l'Industrie La Terre Cuite, Element 29, *Protection thermique dans le bâtiment*, Faktor Verlag, Zürich 2011
27. Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie, diagramme *Chaleur nécessaire des nouveaux bâtiments*, EnDK, Coire 2009

28. The Association for the Study of Peak Oil & Gas, diagramme *Oil & Gas Production profiles*, ASPO, Uppsala 2005
29. Société suisse des ingénieurs et des architectes, diagramme *Effizienzpfad Energie*, SIA, Zürich 2010
30. Société suisse des ingénieurs et architectes, *Bâtiments vitrés – Confort et efficacité énergétique*, cahier technique 2021 SIA, Zurich 2002
31. H. J. Leibundgut, *Low Ex Building Design*, vdf Hochschulverlag ETHZ, Zürich 2011

### Ecologie

32. S. Erkman, *Vers une écologie industrielle*, Editions-Diffusion Charles Léopold Mayer, Paris 1998
33. J. R. Petit, *Climate and atmospheric history of the past 420'000 years from the Vostok ice core, Antarctica*, Nature, vol. 399, 1999
34. Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics, *Données des écobilans dans la construction 2009/1*, KBOB, Etat de janvier 2010
35. D. Meadows, J. Randers, D. Meadows, *The limits to growth*, Universe Books, New York 1972

### Manuel d'architecture

36. A. Deplazes, *Architektur konstruieren*, Birkhäuser, Basel 2004
37. Musso, Petzinka, Roudolphi, *Refurbishment Manual*, Edition Detail, Munich 2009
38. H. Kuch, J.-H. Schwabe, U. Palzer, *Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen*, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2009

### Physiologie animale

39. R. Eckert, D. Randall, *Physiologie animale : mécanismes et adaptations*, De Boeck Université, Paris 1999

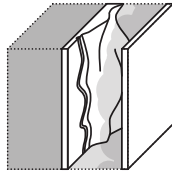


# GLOSSAIRE

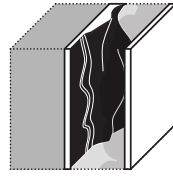
-600'000

-10'000

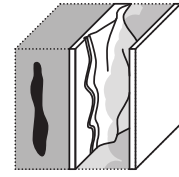
RESSOURCE



VIERGE



DE LA BIOMASSE

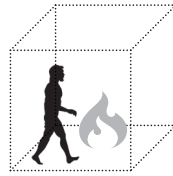


CACHEE

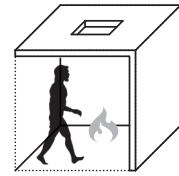
HABITAT



NATUREL

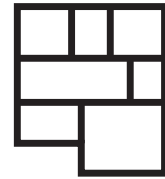


NOMADE



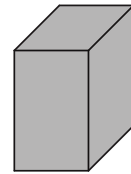
VERNACULAIRE

PLAN DE L'HABITAT



COMPARTIMENTS

MUR



MONOLITHIQUE

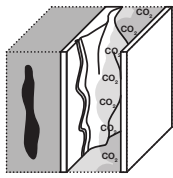
ISOLATION



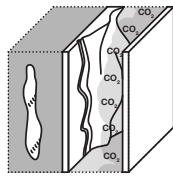
XX<sup>e</sup> SIECLE

1973

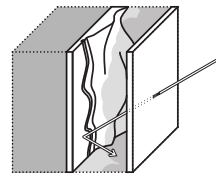
2050



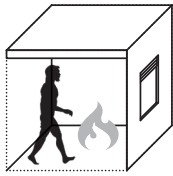
FOSSILE



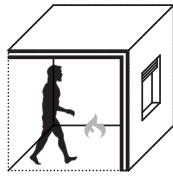
FOSSILE EPUISEE



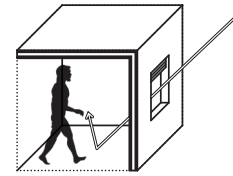
DE FLUX



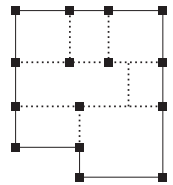
MODERNE



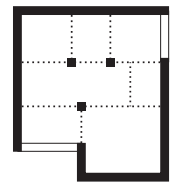
POSTMODERNE



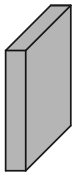
OPTIMISE



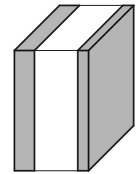
OSSATURE



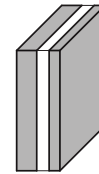
ENVELOPPE



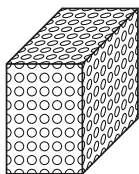
PORTEUR OPTIMISE



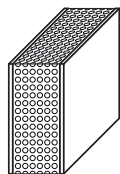
PORTEUR THERMIQUE



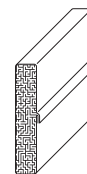
PORTEUR THERMIQUE OPTIMISE



BRUTE



SEMI-FINIE



FINIE





## CV

Né en 1969, il diplômé en architecture à l'EPFL en 1998.

Il travaille trois ans en tant qu'illustrateur d'architecture dans les bureaux de Kraaijvanger-Urbis et Claus en Kaan Architecten à Rotterdam et professe ensuite en tant qu'architecte indépendant.

En 2003, il s'établit à Genève et il rejoint en 2004 l'enseignement de première année d'architecture à l'EPFL du professeur Vincent Mangeat. Dans ce laboratoire, il enseigne l'usage de la maquette dans le projet d'architecture. Parallèlement, il développe et approfondit ce thème dans le cadre de son cours à la Haute école d'art et de design de Genève (HEAD).

A partir de 2006, il élabore le projet d'enseignement *Critique et Théorie du Projet* en 3<sup>e</sup> année du Professeur Andrea Bassi pour le Laboratoire d'Architecture Urbaine, LAURE. Il y enseigne la structure, la conception de la façade préfabriquée et la matérialité du béton.