



APPROCHE GLOBALE POUR L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

**RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE**

## **IMPRESSUM**

### ÉDITEUR

Institut d'architecture TRANSFORM  
Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg  
Halle Bleue  
Passage du Cardinal 13B – CH-1700 Fribourg  
Stefanie Schwab, stefanie.schwab@hefr.ch

Institut du Paysage, d'Architecture, de la Construction et du Territoire, inPACT  
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève  
Rue de la Prairie 4 – CH-1202 Genève  
Lionel Riquet, lionel.riquet@hesge.ch

en collaboration avec

Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment, IGT-LesBAT  
Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud  
Avenue des Sports 20 – CH-1401 Yverdon-les-Bains  
igt@heig-vd.ch

Institut Systèmes industriels – Efficience énergétique  
Haute école d'ingénierie – HES-SO Valais-Wallis  
Route du Rawyl 47 – CH-1950 Sion  
info.isi@hevs.ch

### ÉQUIPE DE PROJET

Stefanie Schwab, responsable de projet (institut TRANSFORM)  
Jean-Luc Rime, Grégory Jaquerod (institut TRANSFORM)  
Lionel Riquet, Guillaume Rey, Reto Camponovo, Peter Gallinelli, institut (inPACT)  
Stéphane Citherlet, Didier Favre, Blaise Périsset (institut IGT-LesBAT)  
Gilbert-André Morand, Sébastien Dervey (institut Systèmes industriels – Efficience énergétique)

### IMPRESSION

Imprimerie St-Paul à Fribourg  
80 exemplaires imprimés en juin 2016, 1'000 exemplaires réimprimés en février 2017.  
Cette publication est composée d'une brochure et 10 fiches d'études de cas.

# TABLE DES MATIÈRES

Impressum	02
Table des matières	03
Abstract	05
01 Une approche globale	07
02 Le bâti existant	09
03 Les modèles de bâtiments	15
04 Les caractéristiques architecturales	23
05 Les bilans thermiques	25
06 La physique et les ponts thermiques	31
07 Économie	35
08 Les co-bénéfices et co-pertes	41
09 Une alternative à «l’emballage»	43
10 Check-list	45
Lexique	47
Bibliographie	49
Abstract allemand – anglais	51
Les 10 études de cas – fiches synthétiques	
étude de cas 01 – 1901	57
étude de cas 02 – 1911	61
étude de cas 03 – 1939	65
étude de cas 04 – 1960	69
étude de cas 05 – 1970	73
étude de cas 06 – 1972	77
étude de cas 07 – 1975	81
étude de cas 08 – 1971	85
étude de cas 09 – 1980	89
étude de cas 10 – 1988	93



# ABSTRACT

## MÉTHODES ET OUTILS POUR LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DE L'ENVELOPPE DES IMMEUBLES D'HABITATION.

L'assainissement énergétique des immeubles d'habitation est un enjeu majeur de la stratégie énergétique 2050 de la Confédération suisse. Malgré la volonté politique, le taux de rénovation énergétique reste relativement limité et le rythme ne semble pas s'accélérer. Parmi les obstacles le coût des travaux, le faible prix de l'énergie, les difficultés techniques, les questions patrimoniales, la disponibilité de spécialistes qualifiés, ou la pénurie de logements.

Les interventions ponctuelles sans vision d'ensemble sont la norme. Lorsqu'un projet complet est mené à bien, il se résume souvent à une mise à jour des installations techniques, un remplacement des fenêtres et une isolation périphérique. Ces solutions peut-être valables sur le plan énergétique posent souvent des questions constructives, patrimoniales, de physique du bâtiment ou encore de durabilité.

eREN a mené un travail sur l'enveloppe des bâtiments basé sur une approche globale et interdisciplinaire cherchant le meilleur équilibre entre efficacité énergétique, aspects constructifs et de physique du bâtiment, économie, co-bénéfices et co-pertes et valeur patrimoniale.

Les typologies constructives des bâtiments d'habitation collective en Suisse romande entre 1900 à 1990 ont été recensées. Cinq époques caractéristiques ont été retenues: avant-guerre (1900 – 1920), entre-deux-guerres (1921 – 1945), après-guerre (1946 – 1960), haute conjoncture (1961 – 1975) et après crise pétrolière (1975 – 1990), époque à partir de laquelle une prise de conscience au sujet de la consommation d'énergie a vu le jour, débouchant sur les premières normes en matière d'énergie du bâtiment.

Chacune de ces époques présente des caractéristiques architecturales et constructives propres. Quinze typologies (modèles) ont été identifiées, représentatives de la production de logements collectifs du 20<sup>e</sup> siècle en Suisse romande. Chacune est différente et mérite d'être considérée avec respect. Intervenir sur un bâtiment existant (même banal) présente des enjeux patrimoniaux: le bâti ordinaire a toute son importance dans la définition de l'identité de la ville. Et l'application de solutions insuffisamment réfléchies peut être à l'origine de nombreux problèmes.

Dix bâtiments représentatifs des typologies les plus courantes ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une étude de cas. L'état existant a été analysé, puis une stratégie générale d'intervention a été choisie pour chaque cas:

- préserver les caractéristiques
- reconstruire les caractéristiques
- ajouter de nouveaux éléments ou modifier l'image

Plusieurs scénarios ont été développés pour chaque cas visant à répondre à la stratégie adoptée tout en satisfaisant aux exigences énergétiques fixées par la norme SIA 380/1 éd. 2009.

Chaque scénario a été testé en matière thermique dans une série d'allers et retours entre architectes et ingénieurs qui ont débouché pour chacun des dix bâtiments sur une solution satisfaisant les cinq critères définis. Les scénarios ont été chiffrés afin de compléter l'étude sur le plan économique. Tous atteignent les exigences normatives en préservant le caractère architectural quand cela s'imposait pour un coût comparable aux solutions plus communément mises en œuvre, telles un crépi sur une isolation périphérique. Rénovation énergétique respectueuse de la substance architecturale du bâtiment à un coût abordable ne rime donc pas avec mission impossible. Ce résultat a pu être atteint grâce à une collaboration intense entre les différents spécialistes qui implique un investissement que souvent les propriétaires hésitent à consentir, bien qu'il ne représente qu'une fraction relativement faible du coût total.

L'étude montre aussi que les coûts d'une rénovation énergétique demeurent très élevés en regard des gains que l'on peut espérer réaliser sur l'économie d'énergie, au tarif actuel de cette dernière.

Il est vrai que le volet énergétique de la rénovation est souvent inclus dans un projet visant à revaloriser un immeuble qui nécessite de toute façon des travaux pour des questions de salubrité, de vétusté ou pour la mise en valeur d'un potentiel inexploité. Il n'en demeure pas moins que dans de nombreux cas où le bâtiment a été entretenu et où les

perspectives d'augmentation des loyers sont faibles, une rénovation énergétique a peu de chances d'être entreprise, faute d'incitation économique suffisante.

L'obligation d'atteindre les valeurs sévères prescrites par la norme SIA 380/1 éd. 2009 dans le cadre de la rénovation peut même avoir l'effet pervers de décourager le propriétaire d'entreprendre certains travaux qui amélioreraient notablement la situation à moindre coût sans pour autant atteindre les limites légales. Le durcissement des valeurs cibles pour la rénovation qui a commencé avec la révision de 2009 de la norme et qui va selon toute vraisemblance se poursuivre pourrait encore amplifier le décalage entre des intentions en soi louables et le taux de rénovation.

Finalement, inscrire dans la loi l'obligation d'assainir l'enveloppe des bâtiments à court ou moyen terme pourrait impliquer des coûts très élevés que de très nombreux propriétaires ne seraient pas à même d'assumer, faute de fonds de rénovation suffisant. Les collectivités publiques sont d'ailleurs confrontées au même défi. Force est aussi de constater que tant les mandataires que les entreprises spécialisées de qualité feraient défaut devant l'immensité de la tâche.

Ces conclusions peuvent sembler négatives. Elles ne le sont que si l'on s'arrête à ce constat en baissant les bras. Nous pensons que les pistes existent pour infléchir le cours des choses :

- la réglementation et également les labels qui ont été jusque-là axés principalement sur les constructions neuves doivent beaucoup mieux prendre en compte les spécificités de la rénovation du bâti existant et de ses limites.
- l'information, l'incitation et l'obligation doivent être menées de front intelligemment et avec une vision à long terme, à l'échelle de la durée de vie des bâtiments. L'implication des spécialistes des différents domaines et la prise en compte des particularités du système politique suisse sont de mise afin d'éviter les écueils.
- l'effort de formation dans le domaine auprès des professionnels, des entreprises, des apprentis et étudiants doit être renforcé pour que la rénovation énergétique bénéficie de professionnels qualifiés.

Le jeu en vaut la chandelle. Et quoi qu'il en soit, avons-nous le choix ?

## **METHODEN UND WERKZEUGE FÜR DIE ENERGETISCHE SANIERUNG DER GEBÄUDEHÜLLE**

Die energetische Sanierung des Gebäudebestands ist ein wesentliches Ziel der Energiestrategie 2050 des Bundes. Aufgrund der Komplexität der Aufgabe, wirtschaftlichen Hemmnissen, dem Mangel an gut ausgebildeten Fachleuten und den häufig nicht kommunizierenden Teildisziplinen sind kohärente Sanierungen selten. Um schlüssige Sanierungskonzepte zu entwickeln, benötigt es historische, architektonische, energetische, technische und ökonomische Kompetenzen. Die typologische Vielfalt im Gebäudebestand verlangt Lösungen, die die architektonischen und konstruktiven Eigenarten des Gebäudes berücksichtigen.

Mit Fallstudien typischer Mehrfamilienhäuser der Westschweiz werden die Möglichkeiten und Grenzen einer energetischen Sanierung der Gebäudehülle aufgezeigt und ein Hilfsmittel für zukünftige Gebäudesanierungen zur Verfügung gestellt. Eine vollständige Übersetzung der Zusammenfassung befindet sich am Ende der Publikation.

## **METHODS AND TOOLS FOR ENERGY-EFFICIENT RETROFITTING OF BUILDING ENVELOPE**

The energy refurbishment of housing is a key issue of the Swiss government's « 2050 Energetic strategy ». eREN is focusing on the envelope of existing housing in Western Switzerland and is based on a global approach aiming at achieving well-balanced solutions between energy efficiency, constructive feasibility, building physics, cost and preservation of the architectural heritage. Ten multi-dwelling buildings characteristic of the most common constructive typologies have been selected and used as case studies. Their current state has been analysed and refurbishment scenarios have been developed for each of them. In every case a scenario could be elaborated that complies with the legal requirements of SIA 380/1 (2009) at a cost comparable to more standard solutions, like rendered perimeter insulation. This result was obtained thanks to an intense collaboration between the various specialists working on the project. A complete translation of the abstract is available at the end of the brochure.

## UNE APPROCHE GLOBALE

Le chauffage de 1,64 millions d'immeubles d'habitation représente une part importante de la consommation d'énergie en Suisse. La rénovation énergétique du parc immobilier national existant est l'un des enjeux principaux de la stratégie énergétique 2050 qui prévoit un renforcement du programme d'incitation à l'assainissement des bâtiments. Pourtant, malgré la volonté politique, le taux de rénovation énergétique reste relativement limité. Parmi les obstacles, on relèvera le coût important des travaux, le prix peu élevé de l'énergie, les difficultés techniques et administratives, les questions patrimoniales, la disponibilité des mandataires et entreprises qualifiés, ou encore la pénurie de logements qui rendent difficiles des interventions lourdes exigeant de reloger les locataires.

L'assainissement énergétique à l'échelle d'un bâtiment concerne principalement les techniques du bâtiment (production et distribution de chaleur, ventilation, électricité) et l'enveloppe thermique (façades et toitures). Le périmètre de l'étude eREN est concentré sur les questions d'enveloppe.

La rénovation énergétique des enveloppes des bâtiments exige des connaissances dans les domaines historique, architectural, énergétique, technique et économique. Connaissances qui ne se retrouvent que rarement réunies chez une seule personne. Dans le cas de bâtiments d'habitation remarquables (taille, protection patrimoniale acquise, représentativité), l'implication de spécialistes maîtrisant ces connaissances est souvent acquise, ce qui contribue en général à la formulation de solutions de rénovation énergétique et architecturale adaptées et équilibrées. Mais, dans le cas de bâtiments plus ordinaires, ces travaux sont souvent entrepris sans recourir à des mandataires ou des entreprises spécialisés. La plupart des propriétaires ou des gestionnaires, confrontés à l'obsolescence ou à la vétusté des immeubles, engagent une réflexion au sujet de leur rénovation dont le volet énergétique fait forcément partie. Par méconnaissance de la complexité de la tâche, des options disponibles et par volonté de minimiser l'investissement, ils font l'économie d'une étude globale et sérieuse (qui pourtant ne représente qu'une fraction très raisonnable du coût total) et réalisent des rénovations se limitant à des interventions ponctuelles (changement de fenêtres ou isolation de la toiture par exemple) ou mettant en œuvre des solutions convenues (en particulier l'isolation périphérique des façades).

**Des interventions ponctuelles, non réfléchies au niveau du détail constructif, risquent d'affecter l'image architecturale et de diminuer la valeur culturelle et la qualité urbanistique du parc immobilier.**

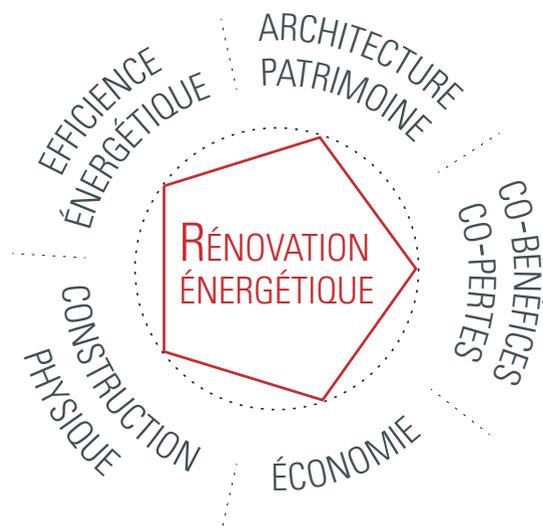


Fig. 01 Objectifs à considérer lors de la rénovation énergétique de l'enveloppe des bâtiments.

Les risques d'une telle démarche sont doubles, architecturaux et techniques. D'un côté, chaque bâtiment, témoin de son époque de construction, participe à l'image de la ville et à son identité forgée par des développements successifs. Des interventions ponctuelles non réfléchies au niveau du détail constructif ou l'emballage systématique en isolation périphérique modifient l'image du bâtiment au risque d'en diminuer la valeur culturelle et de provoquer une perte des repères et de qualité du tissu urbain. Ce tissu résulte non seulement des caractéristiques morphologiques de la ville ou du quartier, mais aussi de l'image que renvoient les bâtiments et de l'histoire qu'ils racontent.

**Le projet eREN propose une approche globale et interdisciplinaire pour les projets de rénovation d'enveloppes de bâtiment. Il cherche un équilibre entre l'efficacité énergétique, la protection des valeurs architecturales, le confort des usagers, la physique du bâtiment et les coûts.**

De l'autre côté, les différents outils de rénovation énergétique existants négligent les spécificités des bâtiments et leurs détails architecturaux. En ignorant les problèmes liés à la physique du bâtiment (ponts thermiques, détails des raccords, ventilation insuffisante, condensation), l'assainissement ponctuel provoque des dégâts et met en péril la substance du bâtiment sans forcément garantir l'atteinte de l'objectif principal : l'amélioration de l'efficacité énergétique. Par ailleurs, certaines solutions, mises en relation aux éléments qu'elles remplacent ou recouvrent posent de véritables questions de durabilité.

Ce type d'intervention a été d'abord encouragé et ensuite abandonné par les administrations publiques qui ont constaté ses conséquences négatives sur le parc immobilier courant.

La diversité des typologies urbaines, architecturales et constructives demande des solutions intégrées, prenant en compte l'ensemble des paramètres, quitte à ce que des arbitrages soient faits, mais en connaissance de cause.

Le projet eREN propose une approche globale et interdisciplinaire pour les projets de rénovation d'enveloppes de bâtiments, cherchant un équilibre entre l'efficacité énergétique, la protection des valeurs urbaines, architecturales et patrimoniales, le confort des usagers et les coûts, tout en évitant de graves erreurs techniques provoquées par une méconnaissance de la physique du bâtiment. Le projet, mené par une équipe d'architectes et d'ingénieurs incluant des compétences dans le domaine économique, a pour objectif principal de confronter sans à priori les solutions actuellement retenues par beaucoup comme étant les seules à être performantes sur les plans techniques et économiques à d'autres alternatives, moins convenues, mais parfois mieux adaptées aux enjeux et aux caractéristiques de l'ouvrage.

En d'autres termes : existe-t-il des alternatives plus respectueuses de la substance architecturale que l'emballage systématique en isolation périphérique pour atteindre les niveaux de consommation d'énergie prescrits par les normes ? Ces alternatives sont-elles économiquement réalistes ? Quelle approche méthodologique permet d'y parvenir ?

Le projet eREN a pour but d'identifier les caractéristiques et les problématiques des principales typologies constructives des immeubles d'habitation en Suisse romande, construits entre 1900 et 1990 qui représentent la majorité du parc bâti, et de proposer des scénarios de rénovation énergétique adaptés, basés sur des cas d'étude réels. Ces scénarios ont été développés de manière itérative dans un va-et-vient permanent entre les différents spécialistes participant à l'étude. Cette méthode s'est avérée la seule à même de dégager des solutions répondant aux exigences énergétiques, de la physique du bâtiment, constructives, architecturales, d'économie de moyens et de rentabilité. Les cas réels étudiés montrent les contraintes et les limites d'un exercice d'assainissement énergétique global ainsi que les co-bénéfices et co-pertes que l'on peut en retirer.

En développant des outils d'aide et de réflexion pour la rénovation énergétique des principaux types d'immeubles d'habitation en Suisse romande, le projet constitue un cadre de référence accessible aux principaux acteurs pour leur permettre d'agir ensemble avec efficacité dans le cadre d'une rénovation énergétique tout en tenant compte des valeurs d'usage et culturelles du bâtiment à rénover.

Public cible : propriétaires et gestionnaires de parc immobiliers, professionnels, services cantonaux et communaux des travaux publics et de l'énergie, étudiants.

# LE BÂTI EXISTANT

## LES BÂTIMENTS D'HABITATION

L'étude prend en compte les bâtiments d'habitation situés en Suisse romande dans les cantons de Vaud, Fribourg, Genève et du Valais. Pour les cantons concernés, les bâtiments de plus de trois logements avec ou sans usage annexe<sup>1</sup> ont été considérés. Selon les cantons, ils représentent 17 à 35 % des bâtiments mis en comparaison avec les maisons individuelles. Cependant, ils regroupent entre 72% et 89% du nombre des logements [voir figure 02].

Dans les quatre cantons considérés, les immeubles d'habitation avec plus de trois logements et plus de trois étages sont environ 47'000<sup>2</sup>. Leur répartition par périodes de construction montre que, dans les cantons de Vaud, Fribourg et Genève, une part importante (24 à 34% selon les cantons) de ces bâtiments sont construits avant 1919. Puis suit le nombre de bâtiments construits entre 1961 à 1970. En ce qui concerne le canton du Valais, la part des bâtiments construits depuis 1960 est la plus importante [voir figure 03].

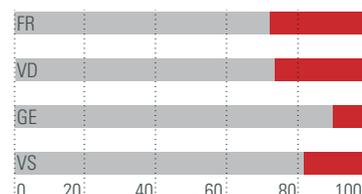
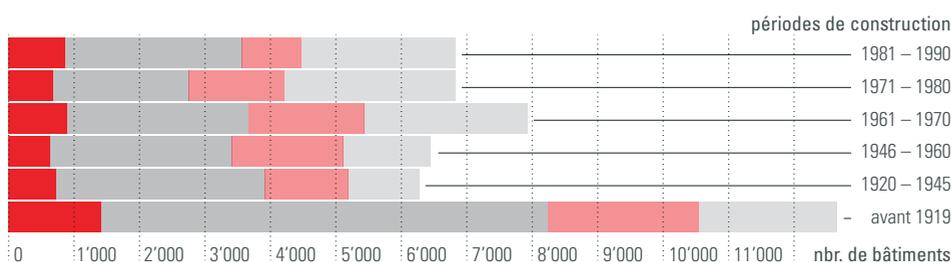


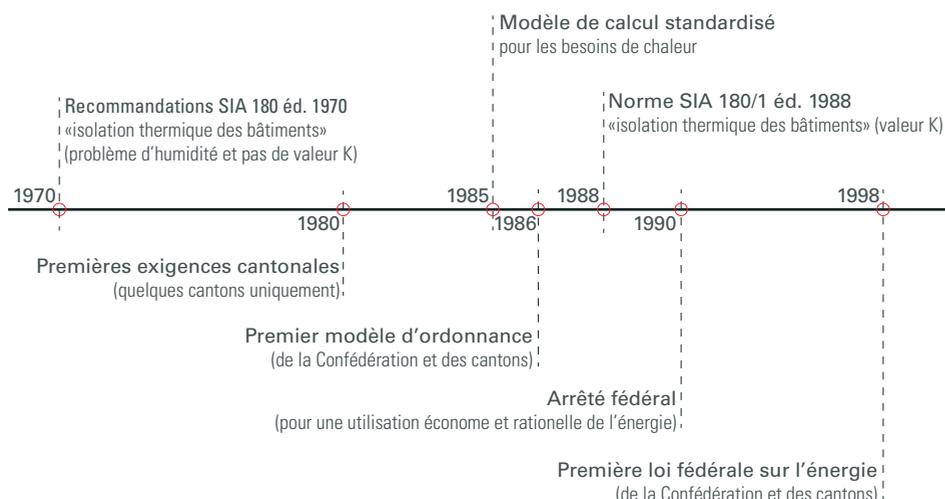
Fig. 02 Part des logements dans les maisons individuelles (rouge) et des logements dans les bâtiments à plus de trois logements (gris) selon les cantons.

Fig. 03 Bâtiments de plus de trois logements et plus de trois étages selon les périodes de construction dans les cantons de:

● FR ● VD ● GE ● VS

## LES PÉRIODES DE CONSTRUCTION

Cinq périodes marquantes pour la construction de logements en Suisse romande ont été identifiées. Les trois premières périodes se basent sur la classification de la statistique des bâtiments et des logements (StatBL) de l'OFS, soit une première période « avant-guerre » pour les constructions avant 1920, une seconde considérant l'« entre-deux-guerres » de 1921 à 1945 et une troisième « après-guerre » de 1946 à 1960. Le choc pétrolier (1971-1973) et l'apparition des premières réglementations énergétiques ont défini la fin d'une quatrième période de « haute conjoncture » de 1961 à 1975 et la cinquième période « après crise pétrolière » de 1976 à 1990. En effet, avant 1980 et les premières lois cantonales sur l'énergie, il n'y avait que des recommandations, celles de la norme SIA 180 éditée en 1970 [voir figure 04].



- 1 Statistique des bâtiments et des logements (StatBL) de 2013 de l'OFS [voir lexique].
- 2 StatBL, OFS [voir note 1].
- 3 SIGRIST, Donald, KESSLER, Stefan, Effets des lois cantonales sur l'énergie: analyse de l'efficacité conformément à l'art. 20 LEn, actualisation pour l'année 2012, Office fédéral de l'énergie, Ittigen, 2013.

Fig. 04 Graphique de l'apparition des premières réglementations énergétiques en Suisse<sup>3</sup>.

- 4 SCHWEHR Peter, FISCHER Robert, *Building Typology and Morphology of Swiss Multi-Family Homes*, Hochschule Luzern, 2010.
- 5 BUSSET Thomas, GARNIER Alain, JOYE Dominique, SCHULER Martin, *Une typologie exploratoire des bâtiments*, école polytechnique de Lausanne, 1994.
- 6 Source des bâtiments : revue « Habitation », « Bulletin technique de la construction », recensement des logements économiques du canton de Genève, accès aux données du parc immobilier de divers propriétaires.

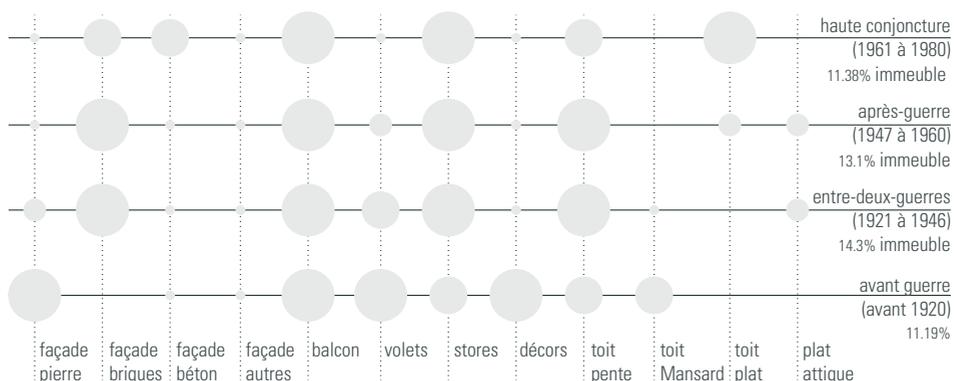
Fig. 05 Synthèse des résultats pour les immeubles de la ville de Lausanne basé sur l'étude<sup>5</sup> « Une typologie exploratoire des bâtiments ».



## LES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES

Peu d'études traitent les caractéristiques constructives des bâtiments d'habitation collectifs en Suisse romande. Une étude de la Haute École de Lucerne, « Building Typology and Morphology of Swiss Multi-Family Homes, 1919-1990 »<sup>4</sup>, a recensé ces bâtiments selon leur situation dans l'environnement bâti en Suisse alémanique. Elle nous apporte peu de renseignements sur les caractéristiques constructives et architecturales des bâtiments. Elle traite principalement l'implantation et la volumétrie des édifices.

Une étude de l'Institut de recherche sur l'environnement construit du département de l'architecture de EPFL<sup>5</sup> a analysé la constitution du parc immobilier suisse selon une approche typologique de l'habitat. Les villes de Lausanne [voir figure 05], Berne et Genève ont été considérées. Les résultats pour la ville de Lausanne, bien qu'ils soient moins détaillés, confirment les résultats issus de notre recensement.



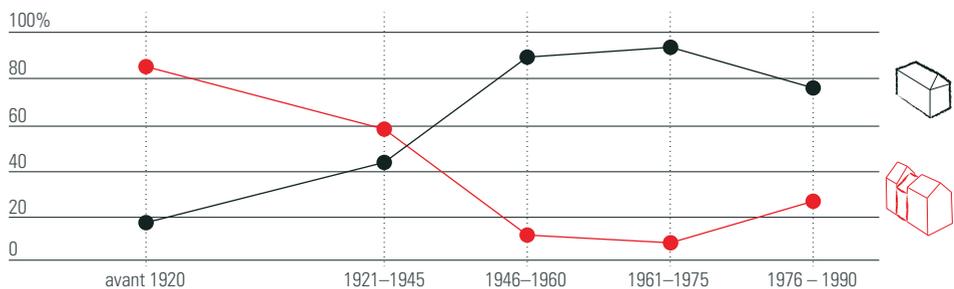
### L'analyse des caractéristiques se base sur l'étude de 193 bâtiments.

Afin de définir des modèles de bâtiments et de sélectionner des études de cas pertinentes et représentatives, 193 bâtiments d'habitation collectifs (Fribourg 54, Vaud 90 et Genève 49), issus de diverses sources<sup>6</sup>, ont été classés selon des critères permettant de mettre en évidence les caractéristiques architecturales et constructives des bâtiments.

Les caractéristiques morphologiques telles que la situation dans le bâti, le nombre d'étages et le nombre de logements ont été considérées. Elles ont servi à sélectionner des bâtiments pertinents par leur implantation et leur volumétrie selon les périodes.

Fig. 06 Part des bâtiments contigus (rouge) et non-contigus (noir) selon les périodes de construction.

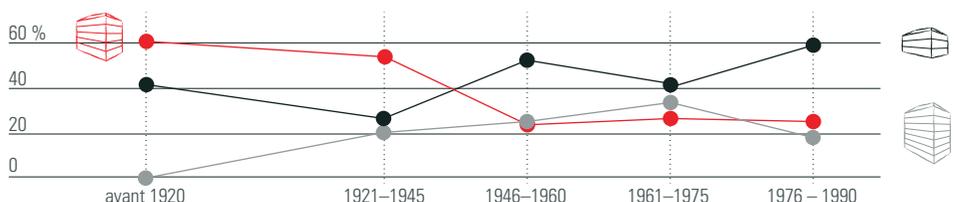
- bât. contigus
- bât. non-contigus



Ainsi la classification a permis de mettre en évidence que les bâtiments contigus ou en fin d'îlots bâtis sont fortement représentés avant 1920 et majoritaires jusqu'en 1945. Ils disparaissent presque totalement entre 1946 et 1975. Dès 1975, les grandes barres de logements sont composées d'une addition de parties de bâtiment que l'on peut assimiler à des immeubles mitoyens [voir figure 06]. Les bâtiments de 7 étages et plus ne se rencontrent que rarement avant les années 1920, alors que les bâtiments entre 5 et 6 étages sont nombreux (60%) dans cette période [voir figure 07].

Fig. 07 Part des bâtiments selon le nombre d'étages et les périodes de construction.

- bât. 3-4 étages
- bât. 5-6 étages
- bât. 7 et + étages

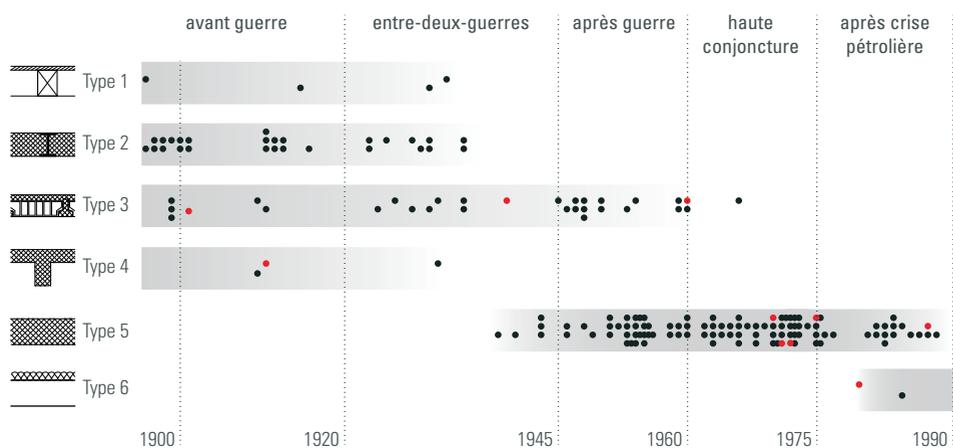


## LES CARACTÉRISTIQUES ARCHITECTURALES ET CONSTRUCTIVES

Dans le cadre du projet de recherche, les caractéristiques architecturales considérées ont été la forme de la toiture, les particularités des raccords entre la toiture et les façades (attique, avant-toit, etc.), la matérialité des embrasures, le type de protection solaire, la position des espaces extérieurs, les éléments de décor architectural (bandeaux, moulures, etc.)

La composition des façades, la composition des planchers sur sous-sol, des étages et des combles, les fenêtres et leur vitrage, la construction des dalles des espaces extérieurs, la position de la protection solaire sont les caractéristiques constructives analysées. La mise en œuvre de ces éléments répond à des méthodes largement répandues en Suisse romande et les rendant souvent interdépendants.

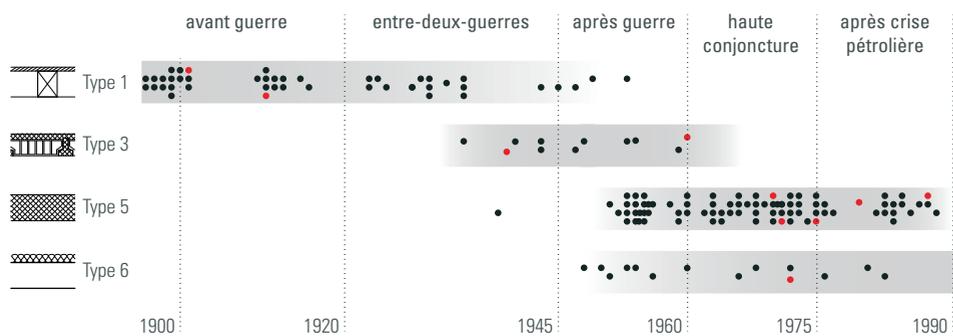
**Les planchers sur les espaces non chauffés** sont des dalles en ciment avec des poutrelles métalliques jusque dans les années 30. Les dalles nervurées en ciment ou les planchers en bois se rencontrent parfois avant la Première Guerre. Les dalles en corps creux (hourdis) de ciment ou de terre cuite sont utilisées jusqu'à la fin des années 60. Les dalles en béton sont utilisées fréquemment sur les sous-sols dès les années 50. Jusqu'aux années 90, l'isolation des dalles sur sous-sol est rare.



- T01 : plancher en bois
  - T02 : dalle en ciment avec poutrelles métalliques
  - T03 : corps creux en terre cuite ou ciment avec poutrelles
  - T04 : dalle en ciment avec nervures
  - T05 : dalle en béton
  - T06 : dalle/plancher avec isolation
- bâtiments des études de cas  
● 193 bâtiments recensés

Fig. 08 Répartition des bâtiments dans le temps et selon la composition de leurs planchers sur les espaces non chauffés.

**Les planchers des étages** sont majoritairement en bois jusqu'aux années 40. Ils sont utilisés pour le plancher des combles jusqu'aux années 50. La dalle en corps-creux, utilisée depuis les années 30, disparaît dans les années 60. Elle laisse la place à la dalle en béton, majoritairement utilisée depuis les années 50. Les premières faibles isolations de la dalle des combles apparaissent vers le milieu des années 40. Mais elles ne seront réalisées que rarement jusqu'à la fin des années 80.



- T01 : plancher en bois
  - T03 : corps creux en terre cuite ou ciment avec poutrelles
  - T05 : dalle en béton
  - T06 : dalle/plancher avec isolation
- bâtiments des études de cas  
● 193 bâtiments recensés

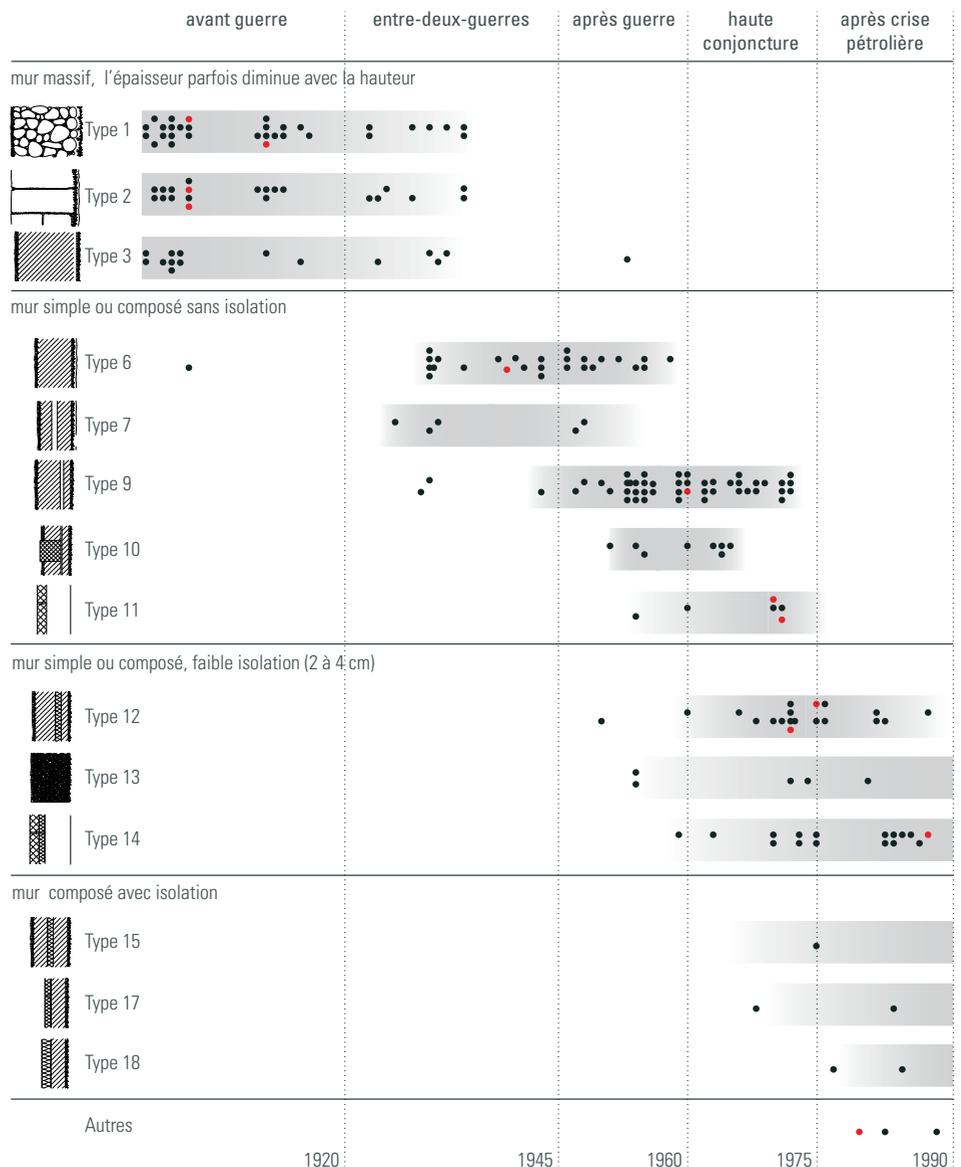
Fig. 09 Répartition des bâtiments dans le temps et selon la composition de leurs planchers des combles.

**La composition des façades** a évolué avec le temps. Les épais murs massifs de pierre, de moellons ou de briques mesuraient de 45 à 70 cm selon les étages jusque dans les années 30. « L'introduction des dalles massives changea l'aspect statique de la construction. Les parois de séparation, non chargées dans le cas des plafonds à poutres de bois ou de fer,

- 7 ASSOCIATION SUISSE DES FABRICANTS DE BRIQUES ET TUILES, « La maçonnerie », *Element*, Association suisse des fabricants de briques et de tuiles, Faktor Verlag, Zürich, 3 (1960).
- 8 « En 1947, la coopérative de St-Gall construit 28 appartements avec ce système, mais il ne sera que rarement utilisé dans les immeubles de Suisse romande. L'épaisseur d'isolation est mise en œuvre selon un calcul prioritairement économique. Une épaisseur de 8 cm d'isolation paraît alors exagérée. »<sup>6</sup>
- 9 L'HÔTE Paul, BOGET Emile, *La façade en béton préfabriqué*, Association Suisse des Professionnels du Béton Préfabriqué, Zürich, 1985.
- 10 Une partie des types de façades se basent sur le catalogue des éléments de construction avec calcul de la valeur U – Assainissement, MARTI Kurt, Office fédéral de l'énergie (OFEN), Bern, 2002.
- 11 [voir définition dans le lexique]
- 12 [voir définition dans le lexique]
- 13 [voir définition dans le lexique]
- 14 [voir définition dans le lexique]
- 15 [voir définition dans le lexique]

n'étaient plus un poids mort. Elles devinrent des éléments porteurs en déchargeant les murs de façade, on pouvait en réduire l'épaisseur.»<sup>7</sup> Les murs se sont progressivement affinés, « d'abord on descendit prudemment à 25 cm<sup>7</sup> ». « Comme l'isolation devint insuffisante, on y para en ajoutant une maçonnerie à l'intérieur (planches de plâtre, plaques de ponces, de scories, etc.) en prenant soin de créer un espace d'air entre les deux parois.»<sup>7</sup> Depuis la fin des années 40, les murs porteurs extérieurs avec un vide d'air et un doublage intérieur sont très répandus dans les cantons étudiés. « Pour des hauteurs importantes, on faisait des séparations horizontales dans l'espace vide à l'aide de rouleaux de vieux papier pour atténuer les mouvements de convection. Il y avait peu d'avantage par rapport à l'ancien mur massif (poids identique, épaisseur identique, isolation thermique à peine améliorée et prix plus élevé). »<sup>7</sup> La fibre minérale remplace progressivement sur le marché le liège coûteux utilisé jusqu'alors. « Elle permet le remplacement du vide par de la fibre. La fixation de l'épaisseur se fit de manière empirique (1 à 3 cm). »<sup>7</sup> Vers la fin des années 50, une faible isolation fait son apparition à l'intérieur des murs en Suisse romande. Alors que dans la partie alémanique, « vers 1945, on se pose la question du double murs<sup>8</sup> (porteur intérieur) pour ne plus interrompre l'isolation avec les dalles de balcons, les appuis de fenêtres, etc.) »<sup>7</sup>. Les années 60 voient apparaître les façades construites en éléments de béton préfabriqués<sup>9</sup>. Alors que les façades porteuses en béton coulé se répandent au début des années 70. Utilisées dans des bâtiments hauts, elles sont souvent combinées avec un doublage intérieur.

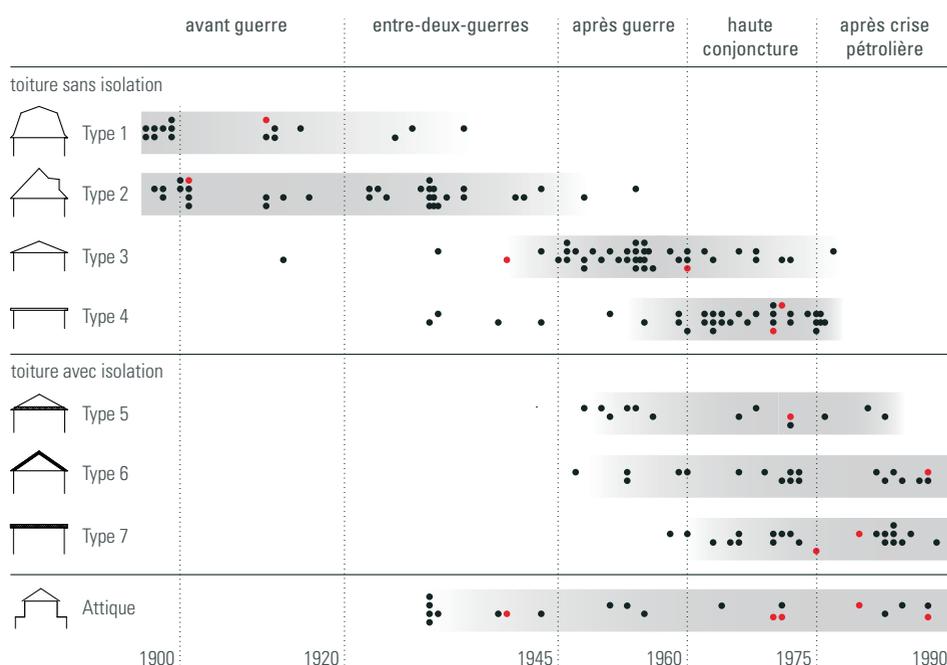
Dès les années 70, l'isolation des murs se généralise. Elle s'épaissit progressivement pour voir apparaître les premières isolations extérieures vers la fin des années 70.



- T01 : mur massif en moellons crépi
- T02 : mur pierres naturelles apparentes
- T03 : mur massif en briques
- T06 : mur en briques creuses
- T07 : double murs en briques avec vide d'air
- T09 : mur avec vide d'air et doublage intérieur
- T10 : ossature et remplissage
- T11 : élément de façade non-porteur
- T12 : mur avec isolation et doublage intérieur
- T13 : briques ou plots isolants crépis
- T14 : éléments préfabriqués isolés non-porteurs
- T15 : double murs avec isolation
- T17 : élément isolé de façade légère
- T18 : porteur avec isolation extérieure
- bâtiments des études de cas
- 193 bâtiments recensés

Fig. 10 Répartition des bâtiments selon la composition de leurs façades.

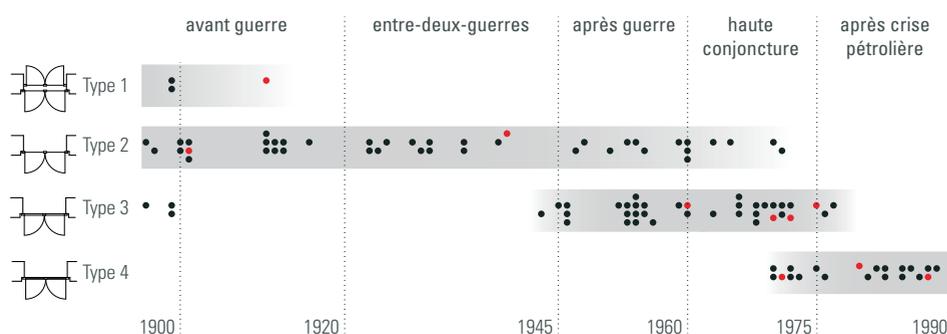
**La toiture** à la Mansart est répandue jusque dans les années 20. La toiture avec une pente importante et généralement habitée s'étend jusque vers le milieu des années 40. Puis, la pente s'affaiblit et les combles ne sont plus habités. La généralisation de l'isolation de ces toitures est difficile à déterminer avec précision car elles ont souvent été rénovées ou transformées. Déjà dans les années 50 quelques toitures sont faiblement isolées. Vers le milieu des années 60, une part importante est isolée soit sur le plancher des combles soit entre les chevrons de la charpente. Les toitures plates apparaissent dès les années 30. Leur isolation commencera dans les années 60 pour se généraliser après la crise pétrolière. On distingue deux types d'attiques. Avant 1920, les attiques sont des espaces dans des toitures en pente éclairées par de grandes lucarnes en longueur. Dès les années 30, ils se développent en retrait de la façade, avec des terrasses.



- T01 : charpente complexe (à la Mansart)
- T02 : en pente sans isolation avec des combles habités
- T03 : faible pente sans isolation et combles pas habités
- T04 : plate sans isolation
- T05 : en pente, isolation du plancher des combles
- T06 : en pente avec isolation de la toiture
- T07 : plate avec isolation
- T08 : plate ou en pente avec un attique
- bâtiments des études de cas
- 193 bâtiments recensés

Fig. 11 Répartition des bâtiments dans le temps et selon la composition et la forme de leur toiture.

**Les fenêtres** à caisson<sup>11</sup> et les fenêtres avec contre-fenêtres<sup>12</sup>, atteignant une valeur  $U_w$  d'environ  $2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , se retrouvent jusqu'à la fin des années 20. Les fenêtres avec un verre simple<sup>13</sup>, d'une valeur  $U_w$  d'environ  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  seront utilisées jusque vers le milieu des années 60. Pour pallier les inconforts du simple verre (condensation, courants d'air froids descendants dans les pièces d'habitation), des fenêtres composées de deux couches de verre<sup>14</sup> et les fenêtres couplées<sup>15</sup> vont se développer au milieu des années 40. Ils ne résoudront pas totalement les phénomènes cités précédemment. Elles laisseront progressivement leur place aux fenêtres avec verre isolant double dès les années 70. La valeur  $U_w$  reste toutefois autour de  $2.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Les verres avec des couches sélectives et l'utilisation de gaz nobles permettant d'atteindre une valeur  $U_g$  inférieure à  $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour un verre isolant double n'apparaîtront que dans les années 90. Ils permettront aux fenêtres d'atteindre des valeurs  $U_w$  d'environ  $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



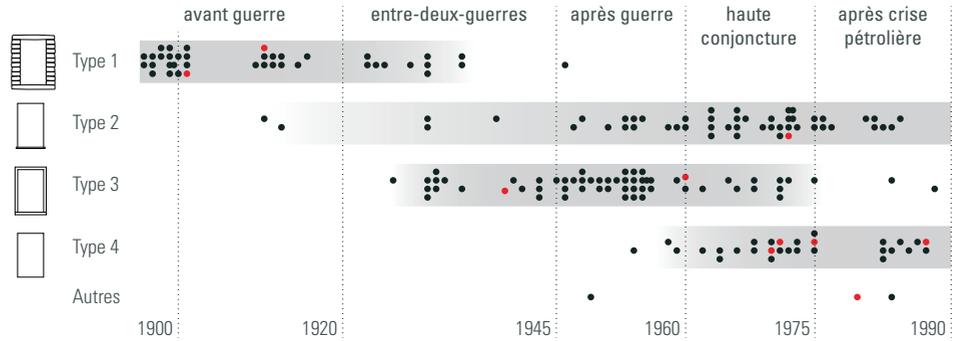
- T01 : fenêtre à caisson, fenêtre avec contre-fenêtre
- T02 : fenêtre avec verre simple
- T03 : fenêtre avec deux verres simples sans isolation, fenêtre couplée
- T04 : fenêtre avec verre isolant double
- bâtiments des études de cas
- 193 bâtiments recensés

Fig. 12 Répartition des bâtiments dans le temps et selon le type de fenêtre.

- T01 : pierre naturelle
- T02 : crépi
- T03 : similibrique / ciment moulé
- T04 : béton préfabriqué
- Autres: métal, Éternit, bois
- bâtiments des études de cas
- 193 bâtiments recensés

Fig. 13 Répartition des bâtiments dans le temps et selon leur type d'embrasure.

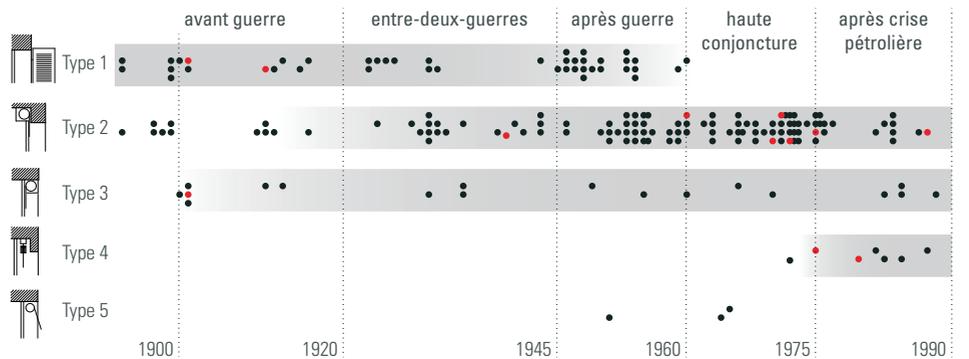
**Les embrasures** en pierre naturelle caractérisent les bâtiments jusqu'au début des années 30. Elles sont remplacées par les embrasures en similibrique ou ciment moulé qui dominent le paysage bâti jusqu'à la fin des années 50. Dans les années 60, elles diminuent au profit des embrasures crépies ou en béton.



**Les protections solaires.** Les volets battants sont souvent utilisés jusqu'au milieu des années 50. Les volets à rouleau, montés dans un caisson intérieur, deviennent alors dominants. Les volets à rouleau montés à l'extérieur se trouvent sur d'anciens bâtiments, mais aussi dans les immeubles des années 80. Ils sont alors recouverts d'un caisson métallique apparent. Les stores extérieurs à lamelles font leur apparition au milieu des années 70. Les stores en toile sont quant à eux peu répandus dans les immeubles étudiés.

- T01 : volets battants
- T02 : volet à rouleau avec caisson intérieur
- T03 : volets à rouleau extérieur
- T04 : store à lamelle
- T05 : store extérieur en toile
- bâtiments des études de cas
- 193 bâtiments recensés

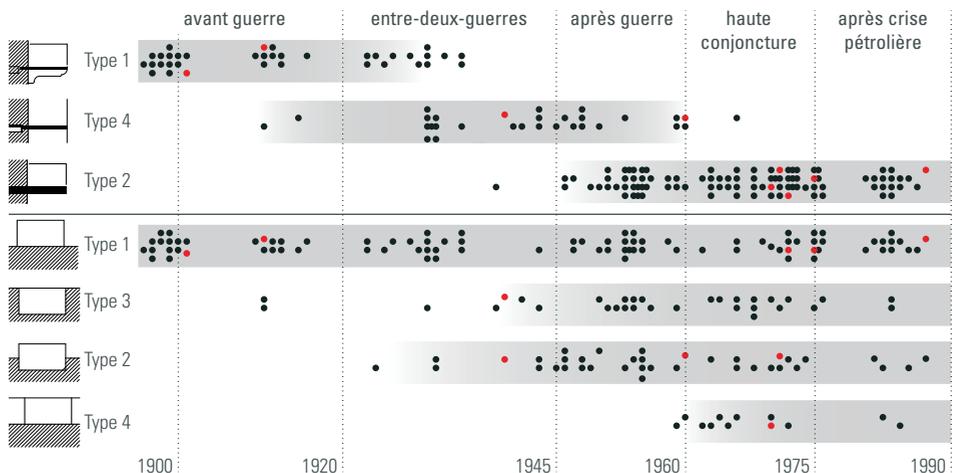
Fig. 14 Répartition des bâtiments dans le temps et selon leur type de protection solaire.



**Les balcons** réalisés avec des dalles posées sur des consoles se retrouvent dans les bâtiments anciens. Liés au mode de construction des planchers en bois, ils disparaissent dans les années 30. Les bâtiments avec des planchers en corps creux ont souvent des dalles plus fines en béton pour les balcons. Elles portent sur le mur de façade et sur des murs latéraux des espaces extérieurs partiellement en saillie ou des loggias. Ce type d'espaces extérieurs est fréquent entre 1945 et 1975. Dès les années 50, les espaces extérieurs sont réalisés avec une dalle en béton continue. Les balcons en saillie refont leur apparition. La rupture thermique de la dalle apparaît tardivement, au-delà des périodes étudiées.

- Selon la construction de l'espace extérieur :
- T01 : dalle sur console
- T02 : dalle continue en porte-à-faux
- T04 : dalle interrompue
- Selon l'emplacement de l'espace extérieur :
- T01 : balcon en saillie
- T02 : balcon partiellement en saillie
- T03 : espace extérieur encastré, loggia
- bâtiments des études de cas
- 193 bâtiments recensés

Fig. 15 Répartition des bâtiments dans le temps et selon leur type d'espace extérieur.



## LES MODÈLES DE BÂTIMENT

L'étude des caractéristiques constructives et architecturales a mis en évidence 15 modèles de bâtiments liés au mode de construction d'une époque. Dix modèles ont été sélectionnés pour une étude approfondie. Ils ont fait l'objet d'une analyse détaillée de l'état existant puis des stratégies de rénovation de l'enveloppe ont été développées, avec comme objectifs de trouver le meilleur équilibre entre l'efficacité énergétique (valeur-limite de la norme SIA 380/1 éd. 2009), l'aspect architectural, le confort des usagers, la physique du bâtiment et l'aspect financier. En mettant l'accent sur la rénovation énergétique de l'enveloppe, le projet traite uniquement les stratégies de rénovation partielle ou complète. Les stratégies de remplacement du bâtiment (démolition ou reconstruction) ou celles d'entretien (maintien de la valeur de l'immeuble) ont été écartées. Les études de cas présentées ont pour but de dégager des principes généraux d'intervention. Bien entendu, chaque cas est unique. Les propositions ne peuvent pas être reproduites telles quelles sur d'autres immeubles.

Les modèles 04, 06 et 13, peu présents en Suisse romande, n'ont pas été retenus comme cas d'étude. Le modèle 05 a également été écarté. Construit en périphérie et de manière économique, ce type de bâtiments est aujourd'hui démolit et reconstruit plutôt qu'assaini, ceci dans le but d'une densification. Le modèle 15 n'a pas été traité car une nouvelle isolation périphérique pose peu de difficultés constructives et ne change que peu l'aspect architectural du bâtiment.



Fig. 16 Illustration des 15 modèles définis. En rouge, les modèles sélectionnés pour les études de cas approfondies.

## MODÈLE 01

1920 |

1945 |

1960 |

1975 | 1980 |

**Situation** : bâtiment de 4 à 6 étages, contigu, parfois en fin d'îlot bâti, situé en centre-ville.

**Façade** : monolithique de grande épaisseur (45 à 65 cm) en maçonnerie de moellons recouverte de pierre naturelle apparente. Parfois, la pierre naturelle ne se déploie que sur les étages inférieurs. Le rez-de-chaussée est occupé par des espaces publics. L'épaisseur des murs diminue fréquemment dans les étages supérieurs. La façade sur « cour » est généralement d'une construction plus modeste uniquement avec un crépi de finition.

**Toiture** : combles aménagés avec une charpente complexe (à la Mansart) ou en pente avec des lucarnes.

**Planchers** : en bois ou en hourdis sur sous-sol. Aux étages, ils sont généralement en bois.

**Embrasures** : pierre naturelle

**Espaces extérieurs** : balcons en encorbellement. Ils sont en saillie de la façade et posés sur des consoles. Les garde-corps sont en ferronnerie.

**Décors** : bâtiment comprenant de nombreux éléments d'ornementation, chaînage d'angle en pierre naturelle, entablement ornemental, encadrements de fenêtres en pierre naturelle, parfois sculptée. La façade est généralement structurée horizontalement par des bandeaux d'étage ou d'appui en pierre naturelle.



Fig. 17 à 19 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1901 à Genève  
(étude de cas 01), bâtiment construit  
en 1912 à Genève, bâtiment construit  
en 1899 à Fribourg.

## MODÈLE 02

1920 |

1945 |

1960 |

1975 | 1980 |

**Situation** : bâtiment de 4 à 6 étages en ordre contigu, parfois en fin d'îlot bâti et implanté en centre-ville.

**Façade** : monolithique de grande épaisseur (45 à 65 cm), crépie. Elle est composée de moellons, parfois de briques. L'épaisseur diminue souvent dans les étages supérieurs. La façade sur « cour » est souvent d'une architecture plus modeste que la façade sur « rue ».

**Toiture** : combles aménagés avec une charpente complexe (à la Mansart) ou en pente avec des lucarnes.

**Planchers** : en bois ou en hourdis sur sous-sol. Aux étages, ils sont souvent en bois.

**Embrasures** : pierre naturelle.

**Espaces extérieurs** : balcons en encorbellement. Ils sont en saillie de la façade et la plateforme est posée sur des consoles. Les garde-corps sont en ferronnerie.

**Décors** : bâtiment comprenant de nombreux éléments d'ornementation, chaînages d'angles en pierre naturelle, entablement ornemental, encadrements de fenêtres en pierre naturelle taillée. La façade est généralement structurée horizontalement par des bandeaux d'étage ou d'appui en pierre naturelle.



Fig. 20 et 21 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1911 à Lausanne  
(étude de cas 02), bâtiment construit  
en 1915 à Fribourg.

## MODÈLE 03

1920 |

1945

| 1960 |

1975 | 1980 |

**Situation** : bâtiment de 5 à 7 étages en ordre contigu, parfois en fin d'îlot bâti, situé en centre-ville.

**Façade** : monolithique et crépie, souvent en briques d'une épaisseur de 35 à 45 cm. L'épaisseur a eu tendance à diminuer dans le temps. Le socle est parfois recouvert d'un placage en pierre ou en ciment.

**Toiture** : combles aménagés, majoritairement en pente, apparition des premiers attiques et des premières toitures plates.

**Planchers** : en hourdis ou parfois en béton sur sous-sol. Aux étages, ils sont généralement en bois ou en hourdis, parfois en béton ou béton nervuré.

**Embrasures** : majoritairement en similipierre.

**Espaces extérieurs** : loggias généralement peu ou pas en saillie de la façade. Elles sont réalisées avec une plateforme en béton interrompue ou continue. Les garde-corps sont principalement en maçonnerie crépie. Terrasses pour les bâtiments avec un attique.

**Décors** : dépouillement et pas d'ornementation. Un bandeau sépare généralement le rez-de-chaussée des étages. L'entablement de la façade est parfois marqué par un élément plus travaillé. Horizontalité souvent marquée par la présence de balcons en coursive.



Fig. 22 et 23 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1939 à Lausanne  
(étude de cas 03), bâtiment construit  
en 1943 à Fribourg.

## MODÈLE 04

1920 |

1945

| 1960 |

1975 | 1980 |

**Situation** : bâtiment de 4 à 6 étages, généralement non contigu, implanté proche des centres de ville.

**Façade** : crépie, composée d'un double mur en briques avec un vide d'air (12 cm / 6 cm / 12 cm). Le mur porteur est généralement à l'intérieur.

**Toiture** : majoritairement en pente, premiers attiques et premières toitures plates et présence de quelques toitures complexes au début de la période. Les planchers de combles isolés ou les toitures isolées sont rares.

**Planchers** : planchers en hourdis ou parfois en béton sur sous-sol. Aux étages, les planchers sont généralement en bois ou en hourdis, parfois en béton.

**Embrasures** : majoritairement en similipierre.

**Espaces extérieurs** : plateforme en béton interrompue. Les balustrades sont principalement en maçonnerie crépie, parfois en ferronnerie au début de la période ou en huisserie métallique vers la fin de la période.



Fig. 24 et 25 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1931 à Vevey,  
bâtiment construit en 1947 à Fribourg.

## MODÈLE 05

1920

1945

1960

1975 | 1980

**Situation** : bâtiment de 4 à 6 étages, généralement non contigu, implanté proche des centres de ville.

**Façade** : monolithique, crépie, généralement en briques d'une épaisseur de 25 à 30 cm.

**Toiture** : avec une faible pente et des combles rarement aménagés. Le plancher est parfois faiblement isolé.

**Planchers** : souvent en béton, parfois en hourdis ou mixtes. Le plancher des combles est parfois en bois.

**Embrasures** : souvent en similibrique.

**Espaces extérieurs** : généralement des loggias réalisées en saillie ou non de la façade avec une plateforme en béton interrompue ou continue. Les matériaux des garde-corps sont variés (balustrades en huisserie métallique, en panneaux de fibrociment, etc.).

**Décors** : extrême dépouillement. Les éléments se limitent au minimum fonctionnel; un avant-toit formé par le débordement de la toiture et un élément de socle (généralement une partie du sous-sol excavé).



Fig. 25 et 26 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1954 à Renens,  
bâtiment construit à Genève en 1947.

## MODÈLE 06

1920

1945

1960

1975 | 1980

**Situation** : bâtiment de 4 à 6 étages, non contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes ou des villages et des bourgs en développement.

**Façade** : crépie, composée d'un mur monolithique en briques « isolantes » de type DURISOL, YTONG, etc.

**Toiture** : combles pas aménagés majoritairement avec une faible pente. Le plancher des combles est parfois faiblement isolé.

**Planchers** : majoritairement en béton, parfois mixtes ou en hourdis.

**Embrasures** : en similibrique.

**Espaces extérieurs** : généralement des loggias réalisées légèrement en saillie de la façade avec une plateforme en béton interrompue ou continue. Les matériaux des garde-corps sont variés (balustrades en huisserie métallique, en panneaux de fibrociment ou en maçonnerie crépie).

**Décors** : dépouillement, un avant-toit formé par le débordement de la toiture et un élément de socle. Fréquemment une marquise surplombe l'entrée.



Fig. 27 et 28 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1954 à Renens,  
bâtiment construit en 1954 à Lausanne.

## MODÈLE 07

1920

1945

1960

1975

1980

**Situation** : bâtiment de 5 à 8 étages, généralement non contigu, implanté proche des centres de ville.

**Façade** : en maçonnerie crépie, composée d'un mur porteur extérieur, d'un vide d'air et d'un doublage intérieur (20 / 6 / 6 cm).

**Toiture** : combles pas aménagés majoritairement avec une faible pente. Le plancher des combles est parfois faiblement isolé.

**Planchers** : majoritairement en béton, parfois mixtes ou en hourdis.

**Embrasures** : en similipierre.

**Espaces extérieurs** : généralement des loggias réalisées légèrement en saillie de la façade avec une plateforme en béton interrompue ou continue. Les matériaux des garde-corps sont variés (balustrades en huisserie métallique, en panneaux de fibrociment ou en maçonnerie crépie).

**Décors** : dépouillement, un avant-toit formé par le débordement de la toiture et un élément de socle. Fréquemment une marquise surplombe l'entrée.



Fig. 29 et 30 de gauche à droite. Bâtiment construit en 1955 à Fribourg, bâtiment construit en 1960 à Lausanne (étude de cas 04).

## MODÈLE 08

1920

1945

1960

1975

1980

**Situation** : bâtiment de plus de 6 étages, en ordre contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes.

**Façade** : voile de béton coulé sur place, parfois préfabriqué, avec un vide d'air et un doublage intérieur, parfois avec une faible isolation. Les murs de refend sont porteurs et les façades longitudinales sont composées d'éléments de remplissage en panneaux sandwich ou d'éléments de vitrages.

**Toiture** : généralement plate et très faiblement isolée (2–3 centimètres de liège).

**Planchers** : en béton.

**Embrasures** : souvent en béton.

**Espaces extérieurs** : loggias réalisées en éléments de béton horizontaux structurant la façade, parfois rapportées sur celle-ci. La dalle est continue. Les garde-corps sont réalisés généralement en éléments de béton préfabriqué.

**Décors** : généralement pas de débordement de la toiture. Parfois, le rez-de-chaussée est libre, sur des pilotis.



Fig. 31 et 32 de gauche à droite. Bâtiment construit en 1970 à Chêne-Bougeries, bâtiment construit en 1971 à Onex.

## MODÈLE 09

1920 |

1945 |

1960 |

1975 | 1980 |

**Situation** : bâtiment de plus de 6 étages, non contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes.

**Façade** : mur extérieur en béton apparent porteur, coulé sur place ou préfabriqué, avec un vide d'air et un doublage intérieur, parfois avec une faible isolation.

**Planchers** : en béton.

**Toiture** : généralement plate et très faiblement isolée (2–3 centimètres de liège).

**Embrasures** : souvent en béton.

**Espaces extérieurs** : loggias réalisées par un décrochement vers l'intérieur de la façade avec une dalle de béton continue ou balcons avec une dalle en béton continue en saillie.

**Décors** : généralement pas d'élément de débordement de la toiture. Parfois, le rez-de-chaussée est libre, posé sur des pilotis.



Fig. 33 et 34 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1972 à Yverdon,  
bâtiment construit en 1975 à Fribourg  
(étude de cas 07).

## MODÈLE 10

1920 |

1945 |

1960 |

1975 | 1980 |

**Situation** : bâtiment de 4 à 5 étages, non contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes.

**Façade** : crépie, composée d'un mur porteur extérieur, d'une isolation de 3 à 5 cm et d'un doublage intérieur.

**Toiture** : en pente avec des combles rarement aménagés ou plate. Les toits avec une faible pente sont généralement isolés sur le plancher des combles ou entre les chevrons. Les toits plats sont parfois isolés.

**Planchers** : pratiquement toujours en béton.

**Embrasures** : généralement crépies, parfois en similibrique.

**Espaces extérieurs** : généralement des balcons réalisés en saillie de la façade avec une dalle en béton continue. Fréquemment, il s'agit de balcons en longueur. Les garde-corps sont fréquemment réalisés en éléments mixtes (béton/verre).



Fig. 35 et 36 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1972 à Denges,  
bâtiment construit en 1972 à Cossonay  
(étude de cas 06).

## MODÈLE 11

1920

1945

1960

1975 1980

**Situation** : bâtiment de plus de 6 étages, non contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes.

**Façade** : éléments non porteurs préfabriqués en béton apparent et généralement isolés.

**Planchers** : en béton.

**Toiture** : généralement plate et parfois avec une faible isolation.

**Embrasures** : généralement en éléments de béton préfabriqué.

**Espaces extérieurs** : loggias ou balcons généralement réalisés avec une dalle en béton continue. Le garde-corps comprend parfois des bacs pour des plantes.

**Décors** : les éléments de béton préfabriqués sont fréquemment en béton structuré (béton lavé, élément de forme complexe, et. Les éléments de corniches de toiture sont rares.



Fig. 37 et 38 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1973 à Morges,  
bâtiment construit en 1971 à Onex  
(étude de cas 08).

## MODÈLE 12

1920

1945

1960

1975 1980

**Situation** : bâtiment en ordre contigu, parfois en fin d'îlot bâti, en périphérie des villes ou au centre-ville en remplacement de bâtiments démolis.

**Façade** : rideau ou entre dalle, généralement composée d'une importante surface vitrée et de menuiserie en aluminium, parfois comportant des parties pleines en métal ou en verre émaillé.

**Toiture** : généralement plate.

**Planchers** : majoritairement en béton.

**Espaces extérieurs** : pas d'espaces extérieurs ou parfois des loggias encastrées.



Fig. 38 et 39 de gauche à droite.  
Bâtiment construit en 1960 à Genève,  
bâtiment construit en 1980 à Genève  
(étude de cas 09).

## MODÈLE 13

1920

1945

1960

1975 1980

**Situation** : bâtiment de 4 à 6 étages, non contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes ou des villages et des bourgs en développement.

**Façade** : crépie, monolithique en briques « isolantes » de type LECA, YTONG, etc.

**Toiture** : généralement des combles en pente aménagés ou non. L'isolation se trouve entre les chevrons, sinon le plancher des combles est généralement isolé.

**Planchers** : majoritairement en béton.

**Embrasures** : généralement crépies.

**Espaces extérieurs** : fréquemment des balcons en saillie réalisés avec une dalle en béton continue. Le garde-corps est souvent en huisserie métallique, en verre ou en élément composite. Parfois, des espaces extérieurs encaissés sont aménagés dans la toiture.

**Décors** : souvent un faible débordement de la toiture forme un avant-toit.

Fig. 40 Bâtiment construit en 1981 à Orbe.



### MODÈLE 14

1920 |

1945 |

1960 |

1975 | 1980 |



**Situation** : bâtiment de 4 à 8 étages, non contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes ou des villages et des bourgs en développement.

**Façade** : éléments préfabriqués non porteurs en béton apparent et isolés (béton/isolation). La paroi porteuse se trouve à l'intérieur. L'enveloppe du bâtiment développe des formes plus complexes.

**Planchers** : en béton.

**Toiture** : fréquemment des combles aménagés en pente, généralement isolés.

**Espaces extérieurs** : fréquemment des balcons en saillie d'une forme complexe, avec une dalle en béton continue. Le garde-corps est réalisé fréquemment en construction mixte (béton/métal ou verre).

Fig. 41 et 42 de gauche à droite. Bâtiment construit en 1987 à Fribourg, bâtiment construit en 1988 à Genève (étude de cas 10).



### MODÈLE 15

1920 |

1945 |

1960 |

1975 | 1980 |



**Situation** : bâtiment de 4 à 6 étages, non contigu, implanté dans des quartiers périphériques des villes ou des villages et des bourgs en développement.

**Façade** : crépie, généralement en maçonnerie de briques perforées recouverte d'une isolation périphérique de « première génération » de faible épaisseur (6 à 8 cm).

**Toiture** : autant plate qu'en pente.

**Planchers** : en béton.

**Embrasures** : généralement crépies.

**Espaces extérieurs** : loggias ou balcons généralement réalisés avec une dalle en béton continue. Le garde-corps est généralement en béton ou en huisserie métallique.

**Décors** : le caisson de store est souvent réalisé avec un élément métallique apparent.

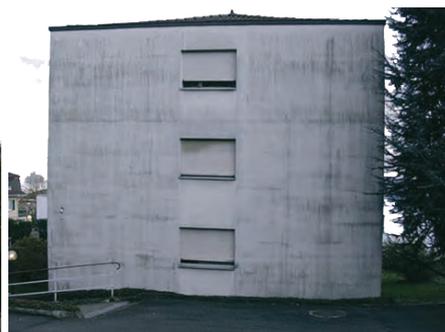
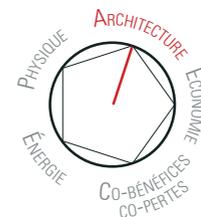


Fig. 43 et 44 de gauche à droite. Bâtiment construit en 1985 à Renens, bâtiment construit en 1977 à Pully.

# LES CARACTÉRISTIQUES ARCHITECTURALES



Chaque époque présente ses caractéristiques liées au mode de construction, aux matériaux à disposition (matériaux locaux ou pénurie de matériaux après la Deuxième Guerre mondiale par exemple), aux détails stylistiques de l'époque et à la localisation de la construction (bâtiment contigu en centre-ville, bâtiment isolé en périphérie).

Une rénovation énergétique généralisée du parc immobilier vieillissant et gourmand en énergie encouragée par la stratégie 2050 de la Confédération engendre le risque d'une homogénéisation de l'aspect des bâtiments et une perte des repères et de substance urbaine. Sans trop de réflexions, les fenêtres sont remplacées par des fenêtres en PVC blanc, la façade est enveloppée par une isolation périphérique crépie qui recouvre tous les détails architecturaux [voir illustrations ci-dessous].



Fig. 45 et 46. À droite, les conséquences d'une isolation périphérique non réfléchie sur les caractéristiques architecturales d'un bâtiment. À gauche, un autre bâtiment montrant les caractéristiques architecturales perdues dans le second.

Des interventions non réfléchies au niveau du détail constructif risquent d'affecter l'image architecturale et de diminuer la valeur culturelle et la qualité urbanistique du parc immobilier. L'enjeu d'une rénovation énergétique respectueuse et durable consiste à améliorer considérablement la performance de l'enveloppe thermique tout en préservant la diversité et l'histoire de l'environnement construit. Ces considérations doivent être prises en compte. Même si les bâtiments ne font pas l'objet d'une protection patrimoniale, ils participent de l'image de la ville et d'une forme de patrimoine collectif. Par ailleurs l'histoire a montré que ce qui était considéré comme indigne d'intérêt à une certaine époque prend souvent une autre dimension affective et culturelle pour les générations ultérieures.

Pour chaque étude de cas, les caractéristiques constructives et architecturales ont été analysées. Les éléments qui méritent d'être conservés et les éléments de construction facile et économique à améliorer ont été identifiés. Dans la plupart des cas, ces mesures ne suffisent pas pour atteindre les exigences énergétiques actuelles et il est nécessaire d'isoler également les façades. Différentes stratégies ont été développées en fonction des caractéristiques existantes. Elles ont permis d'atteindre les exigences énergétiques.

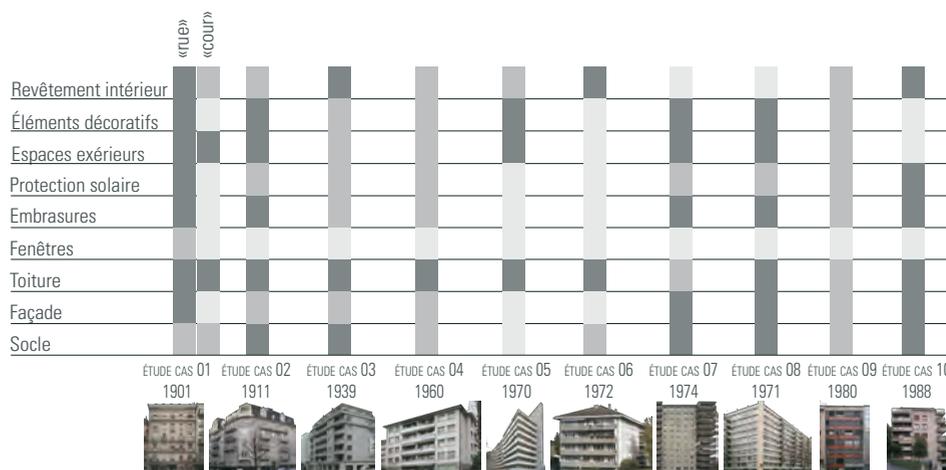
- Étude de cas 01 : compensation façade rue – façade cours
- Étude de cas 02 : pierre naturelle - Isolation intérieure
- Étude de cas 03 : crépis isolant et mesures ciblées
- Étude de cas 04 : isolation extérieure et reconstitution de détails caractéristiques
- Étude de cas 05 : isolation façade en retrait et mesures ciblées
- Étude de cas 06 : nouvelle image
- Étude de cas 07 : béton – remplacement du doublage intérieur par une isolation
- Étude de cas 08 : béton préfabriqué – ajout d'une isolation intérieure
- Étude de cas 09 : façade légère – nouvelle façade à l'identique
- Étude de cas 10 : fermeture des balcons et mesures ciblées

Les résultats des études de cas montrent qu'il est possible d'atteindre les exigences globales tout en respectant le caractère et les particularités constructives du bâtiment [voir figure 47], qui plus est à un coût acceptable. Le tableau de la figure 47 représente l'impact des scénarios de rénovation sur les caractéristiques architecturales. Il nécessite une interprétation détaillée, un grand nombre d'éléments rénovés avec une apparence modifiée n'est pas forcément une perte du caractère architecturale [voir étude de cas 05].

**L'enjeu d'une rénovation énergétique respectueuse et durable consiste à améliorer considérablement la performance de l'enveloppe thermique tout en préservant la diversité et l'histoire de notre environnement construit.**

Fig. 47 Évaluations du maintien des caractéristiques architecturales par élément.

- Pas rénové
- Rénové en conservant l'apparence
- Rénové en modifiant l'apparence



Selon les cas d'études, différentes stratégies de rénovation ont été étudiées :

### PRÉSERVER LES CARACTÉRISTIQUES

Dans certains cas, il est possible de préserver au maximum une façade richement décorée en compensant par d'autres éléments de construction, par exemple par une enveloppe très performante de la façade sur cour, moins remarquable [voir étude de cas 01].

Dans d'autres cas, une isolation intérieure permet de préserver les caractéristiques des façades complexes [voir études de cas 02, 07, 08], robustes et durables [voir étude de cas 07]. Dans l'étude de cas 02, une isolation en panneau minéral est mise en œuvre à l'intérieur en préservant les boiseries d'embrasures caractéristiques. Dans les études de cas 07 et 08, les façades complexes en béton sont isolées par l'intérieur avec des éléments préfabriqués. Une intervention par l'intérieur, très délicate au niveau de la physique du bâtiment, nécessite un soin particulier dans le traitement des ponts thermiques et le comportement hygrométrique des détails proposés.

Si l'application d'une isolation extérieure s'avère compliquée, un crépi isolant minéral peut remplacer le crépi actuel et améliorer le bilan énergétique tout en gardant l'aspect du bâtiment [voir études de cas 02 et 03]. Il atténue aussi les problèmes de ponts thermiques.

### RECONSTRUIRE LES CARACTÉRISTIQUES

Les bâtiments, non contigus, avec des façades moins complexes permettent plus facilement une isolation par l'extérieur. Le choix de la bonne épaisseur d'isolation et le soin des détails de raccord permettent de garder les caractéristiques de cette époque [voir étude de cas 04]. Dans cette étude de cas, une épaisseur trop importante d'isolation extérieure aurait fait disparaître la saillie des balcons, caractéristiques de cet immeuble. Les embrasures en similibrique ont été reconstruites en ciment moulé pour conserver l'une des caractéristiques de l'immeuble.

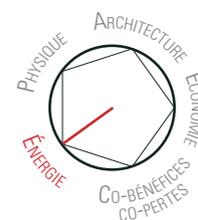
La façade rideau du bâtiment [voir étude de cas 09] a été remplacée en gardant les proportions, les couleurs et la répartition des parties pleines et vitrées de la façade existante.

### AJOUTER DE NOUVEAUX ÉLÉMENTS OU MODIFIER L'IMAGE

Dans certains cas, la qualité de la construction justifie un changement complet de l'image et permet d'atteindre des exigences énergétiques élevées [voir étude de cas 06]. Dans d'autres cas, la fermeture des balcons augmente la surface habitable et règle les problèmes de ponts thermiques d'une manière simple et économique et réversible [voir étude de cas 10]. Parfois, des mesures supplémentaires au premier scénario afin d'atteindre la valeur-limite pour les besoins de chaleur ont fait perdre des qualités architecturales au bâtiment [voir études de cas 03, 05].

Pour connaître les possibilités et les limites d'une intervention sur l'enveloppe et définir la bonne stratégie, une étude détaillée par un professionnel est nécessaire. Elle permet de déterminer les forces et faiblesses du bâtiment et de trouver le meilleur compromis entre efficacité énergétique et rénovation respectueuse de la substance d'origine. Elle a pour objectif d'établir de manière précise les conditions tant techniques que financières de l'intervention. Une étude détaillée est indispensable si l'on entend éliminer le risque d'être entraîné dans une opération aventureuse avec un résultat peu convaincant.

Pour connaître les possibilités et les limites d'une intervention sur l'enveloppe et définir la bonne stratégie, une étude détaillée par un professionnel est nécessaire.



## LES BILANS THERMIQUES

L'analyse thermique des bâtiments a été réalisée en plusieurs étapes. Lors d'une première étape, le bilan énergétique de l'état existant a été calculé et comparé aux relevés des consommations. Pour confirmer les hypothèses de composition, des mesures de la valeur U ont été effectuées, voire parfois des sondages. Dans une seconde étape, un scénario de rénovation énergétique visant à atteindre les valeurs-limites de la norme SIA 380/1 éd. 2009 en conservant les caractéristiques architecturales relevées précédemment a été élaboré puis son bilan thermique a été calculé. Lors d'une troisième étape, si l'objectif n'a pas été atteint, un nouveau scénario avec des mesures d'isolation supplémentaires a été développé pour atteindre l'objectif énergétique.

### LES BILANS ÉNERGÉTIQUES DE L'ÉTAT EXISTANT

La consommation énergétique des dix bâtiments retenus pour l'étude a été analysée à partir de deux approches :

- les moyennes sur 3 à 4 ans (2009-2013) des relevés de consommation réelle<sup>16</sup> (énergie finale) mis à disposition par les propriétaires ou les IDC<sup>17</sup> (Indice de dépense de chaleur, information obligatoirement transmise aux services de l'État dans le canton de Genève) : l'énergie utile en a été extraite après prise en compte du rendement de l'installation de chauffage (80 % pour une chaudière individuelle et 90 % pour un chauffage à distance) et d'une part d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire (75 MJ/m<sup>2</sup> an pour les logements respectivement 25 MJ/m<sup>2</sup> an pour les surfaces commerciales, selon la norme SIA 380/1 éd. 2009).
- un bilan thermique (énergie utile, par la suite convertie en énergie finale) calculé selon la norme SIA 380/1 éd. 2009.

Pour des questions de cohérence d'un objet à l'autre et d'unité de méthode, ce sont les bilans calculés et non pas les consommations réelles qui serviront plus loin de base de comparaison avec les bilans thermiques des scénarios de rénovation au risque de parfois sur ou sous-évaluer les interventions.

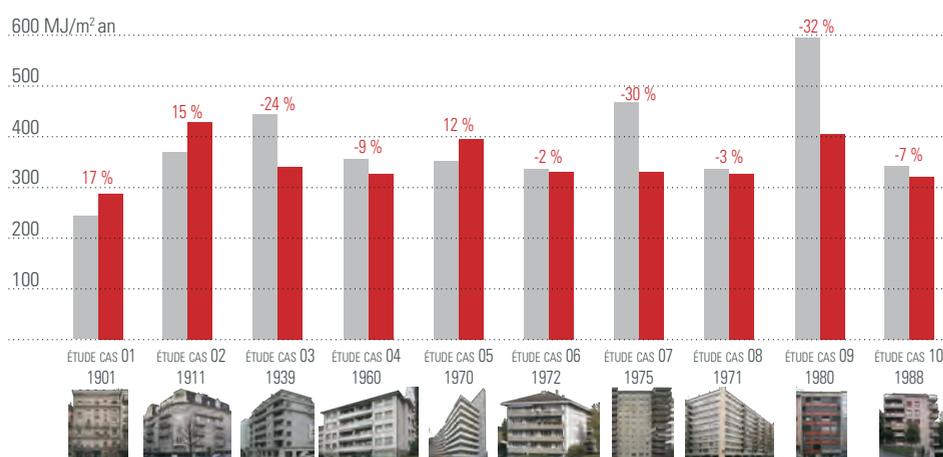


Fig. 48 Représentation des besoins de chaleur pour le chauffage « relevés » (gris) et des besoins de chaleur pour le chauffage  $Q_h$  « calculés » (rouge) en MJ/m<sup>2</sup>.an.

- besoin de chaleur pour le chauffage  $Q_h$  « relevés »
- besoin de chaleur pour le chauffage  $Q_h$  « calculés »
- % écart en %

La comparaison entre valeurs relevées et calculées a pour but de vérifier la plausibilité des calculs et de les confronter à la réalité. En cas d'écart important (plus de 20%), il convient de vérifier les paramètres de calcul et de rechercher la source des écarts. L'échantillon étudié est trop restreint pour définir statistiquement un pourcentage d'écart. Le chiffre de 20% à partir duquel les écarts doivent être vérifiés a été arrêté arbitrairement, mais il est considéré comme raisonnable pour tenir compte des nombreux paramètres qui peuvent expliquer un écart de cet ordre entre le calcul et la réalité.

<sup>16</sup> Pour les bâtiments des études de cas 02, 03, 04, 06, 07.

<sup>17</sup> Pour les bâtiments des études de cas 01, 05, 08, 09, 10.

**En cas d'écart important entre le bilan calculé et la consommation réelle, il convient de vérifier les paramètres de calcul et de rechercher la source des écarts.**

Parmi les paramètres qui peuvent varier, on relèvera :

- les variations possibles entre les conditions météorologiques prises en compte dans le modèle de calcul et les conditions réelles durant les quatre hivers sur lesquels portent les relevés de consommation.
- la température réelle régnant à l'intérieur des appartements considérée dans les calculs à 20 °C selon la norme SIA 380/1 éd. 2009 mais qui peuvent être sensiblement différentes selon les occupants et le taux d'occupation.
- le taux d'infiltration arrêté à 0,7 m<sup>3</sup>/h (selon la norme SIA 380/1 éd. 2009) dans les bilans calculés alors que les taux d'infiltration réels n'ont pas pu être mesurés et sont susceptibles de varier fortement selon les usagers et la qualité de la construction existante.
- les valeurs U des éléments de construction qui n'ont pas pu être validées par les mesures effectuées in situ ainsi que les valeurs  $\lambda$  des matériaux qui peuvent différer entre les valeurs théoriques et réelles.
- le rendement des installations de chauffage (uniformisé à 80 % dans les bilans calculés) et le réglage des courbes de chauffe.
- la part des besoins en énergie pour la production d'eau chaude sanitaire qui peut varier en fonction du taux d'occupation et des habitudes des habitants.

Sur l'échantillon de dix bâtiments étudiés, trois présentent un écart supérieur à 20 %. Il s'agit des bâtiments des études de cas 03 (écart de 24 %), 07 (écart de 30 %) et 09 (écart de 32 %). Dans les trois cas, le besoin de chaleur calculé est inférieur au besoin de chaleur réel. Ces écarts sont explicables à plusieurs titres selon les bâtiments.



**Étude de cas 03 – écart de 24 %.** La question de la température intérieure donne une piste d'explication. Lors de la visite des appartements, il est en effet apparu que la température semblait supérieure aux 20 °C. Cette impression est confirmée par les températures relevées lors des mesures de valeur U des éléments d'enveloppe qui ont été effectuées dans deux pièces. Les températures mesurées varient de 20 à 22 °C. Elles induiraient une augmentation du besoin de chaleur.

La « suroccupation » des locaux est la deuxième piste d'explication. Toujours lors de nos visites, il a été constaté que certains appartements étaient occupés par plus de locataires que ce que la surface de l'appartement permet d'accueillir habituellement, en utilisant par exemple les espaces de circulation et de distribution comme des pièces à vivre à part entière. Les personnes supplémentaires engendrent une consommation d'eau chaude sanitaire probablement supérieure à celle prise en compte dans le calcul.



**Étude de cas 07 – écart de 30 %.** Le bâtiment fait partie d'une barre d'habitation comprenant trois entités qui partagent la même installation de production de chaleur, sans compteurs individuels. Une répartition des consommations a été opérée sur la base des surfaces de référence énergétique des différents bâtiments. Il est possible que le modèle 07 « bénéficie » d'un niveau de consommation plus élevé que d'autres bâtiments de la barre. Il se situe en extrémité d'une barre et compte ainsi plus de surface de façade.

La construction par étapes des trois parties de la barre, échelonnée dans le temps, fait que les façades sont vraisemblablement de composition différente. Les plans de demande de permis de construire montrent une isolation de 2 cm, alors que l'immeuble considéré possède 6 cm d'isolation en façade.

Les radiateurs du bâtiment ne sont pas tous équipés de vannes thermostatiques. Selon la norme SIA 380/1 éd. 2009, l'absence de vannes thermostatiques doit être compensée dans les calculs par une température intérieure supérieure de 2 °C (22 °C en lieu et place de 20 °C). En tenant compte d'une température de 1 °C supplémentaire (pour ne prendre en considération qu'une partie des radiateurs), ceci représenterait un besoin de chaleur pour le chauffage supplémentaire de 40,7 MJ/m<sup>2</sup> an. Ce besoin de chaleur supplémentaire n'a pas été pris en considération dans le bilan thermique « calculé » du bâtiment existant. Cela ramènerait le besoin de chaleur pour le chauffage « calculé » à 371,1 MJ/m<sup>2</sup> an, soit un écart de 21 %.

**Étude de cas 09 – écart de 32 %.** La température intérieure donne une piste d'explication. Lors des visites des logements durant l'hiver 2014–15, il est apparu que la température était suffocante. Cette impression est confirmée par les températures relevées lors des mesures de valeur U des éléments d'enveloppe qui ont été effectuées dans trois pièces différentes. Les températures varient de 18 à 27 °C. Il a été calculé qu'un écart de 2 °C sur la température intérieure induit une augmentation du besoin de chaleur d'environ



183 MJ/m<sup>2</sup> an, ce qui ramène l'écart entre les valeurs calculées et réelles à 2 %. La surconsommation de ce bâtiment pourrait aussi trouver une explication dans la faible inertie de son enveloppe (façade légère très vitrée). Ce défaut d'inertie peut entraîner une situation d'inconfort qui inciterait les occupants à chauffer d'avantage.

D'une manière générale, les besoins de chaleur (calculées ou relevés) s'inscrivent dans l'ordre de grandeur des valeurs habituellement observées sur des bâtiments du XX<sup>e</sup> siècle n'ayant pas ou que peu subi de rénovation énergétique. Dans une large mesure, les écarts constatés entre les valeurs de consommation relevées et les calculs théoriques trouvent une explication plausible. On relèvera en outre que l'échantillon des dix bâtiments étudiés est trop restreint pour qu'un schéma corrélatif entre besoins de chaleur (relevé ou calculé) et les typologies constructives ou l'époque de construction puisse apparaître. La recherche n'a pas pour objectif de mettre en évidence un tel lien.

## LES VALEURS U MESURÉES ET CALCULÉES

Les sources précises (plans de construction et détails des compositions d'origine) faisant souvent défaut et les sondages destructifs étant parfois impossibles, il a été décidé dans le cadre de cette étude de mesurer des valeurs U d'éléments d'enveloppe sur chacune des dix études de cas afin d'écarter, tant que faire se peut, les sources d'erreur et d'affiner les valeurs théoriques qui ont été prises en compte dans les calculs de bilans thermiques.

La majorité des éléments d'enveloppe significatifs dont la composition réelle ne pouvait être déterminée avec certitude ont fait l'objet de mesure de valeur U selon la norme ISO 9869 (2014). L'ensemble des mesures a été effectué entre les mois de novembre 2014 et mars 2015.

Leur valeur U théorique a également été calculée selon la méthode classique qui considère une composition constructive comme succession de couches à résistance thermique différentes. Le tableau ci-dessous [voir figure 49] donne les résultats comparatifs de ces mesures et calculs ainsi que l'élément de construction analysé et le bâtiment de référence.

Dans certains cas, des percements ont été effectués pour pouvoir déterminer la composition des murs à l'aide d'un endoscope, en particulier pour vérifier la présence d'un espace d'air entre les couches « dures » ou du remplissage de cet espace avec de l'isolation.

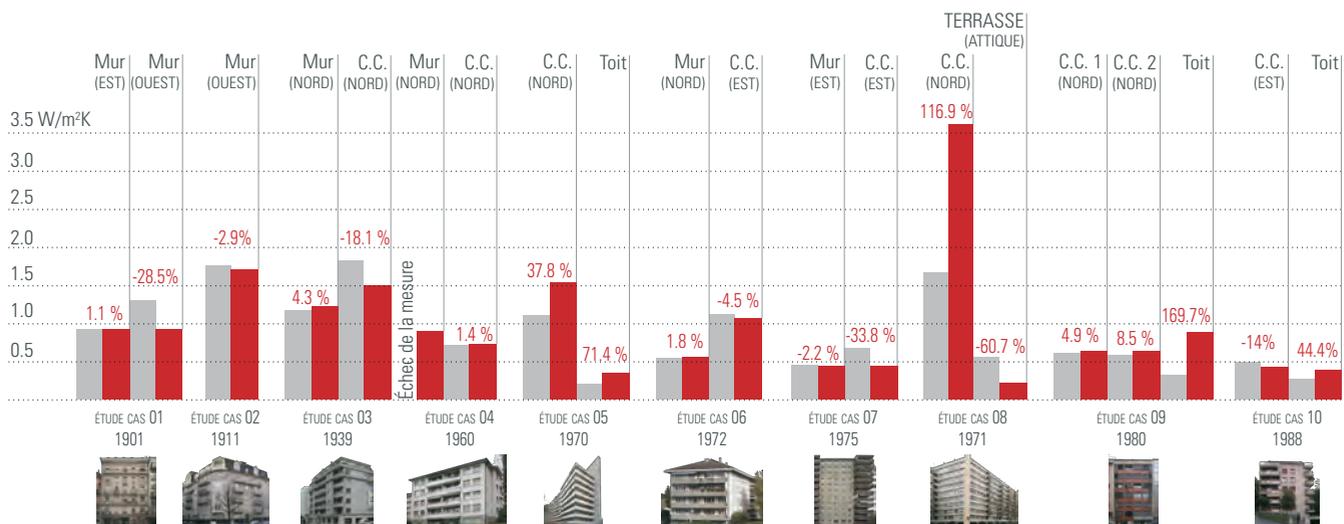
Les valeurs U mesurées pouvant présenter une marge d'erreur d'environ 15 %, on considère que les écarts inférieurs à ce chiffre ne sont pas significatifs. Cela concerne dix mesures sur dix-neuf.

Les écarts supérieurs à 15 % peuvent être expliqués comme suit :

- inconnues quant aux compositions réelles des éléments
- inconnues quant aux épaisseurs réelles des couches
- coefficient de conductibilité énergétique réel (valeur λ) des matériaux d'époque
- inconnues quant à la mise en œuvre de certains détails (ponts thermiques ponctuels)

Fig. 49 Représentation des valeurs U mesurées (gris) et des valeurs U calculées (rouge) en W/m<sup>2</sup>K.

● valeur U mesurée  
● valeur U calculée avec Lesoaf  
% écart en %





Les écarts très importants constatés dans le bâtiment de l'étude de cas 08 et de la toiture de celui de l'étude de cas 09 méritent d'être analysés plus attentivement.

**Étude de cas 08.** Le contrecœur est un élément monolithique de béton préfabriqué, sans aucune couche autre qu'une peinture intérieure. La mesure a été faite sur un contrecœur dont le radiateur était éteint. Les hypothèses qui peuvent être avancées pour expliquer l'écart sont les suivantes :

- l'inertie thermique (effet de masse - déphasage) de l'élément n'est pas prise en compte dans le calcul théorique statique. Pour l'appréhender, il faudrait effectuer un calcul dynamique.
- les murs de refends connectés directement aux éléments de façade en préfabriqué forment un pont thermique qui peut contribuer à « réchauffer » le contrecœur.
- lors des visites in situ, il a été constaté que le béton préfabriqué des éléments d'enveloppe, qui n'ont aucun rôle structurel, présente une surface constellée de micros-nids de gravier et bulles d'air. Il est fort possible que le béton soit relativement poreux et que la valeur  $\lambda$  du matériau soit plus favorable que celle prise en compte dans le calcul théorique.

Des écarts du même ordre ont pu être observés lors d'une campagne de mesure menée par Hepia à l'hiver 2014-15 dans plusieurs bâtiments de la même époque présentant des compositions monolithiques en béton. Ces observations pourraient également expliquer les écarts importants constatés sur les contrecœurs des études de cas 03, 05 et 07.

La terrasse de l'attique présente un écart très important. Le modèle théorique a été bâti sur la foi des déclarations de la gérance quant à la composition de la dalle de la terrasse, isolée récemment. N'ayant pas pu effectuer de sondage, il est impossible de vérifier que la composition annoncée correspond réellement à ce qui a été mis en œuvre, ou que la totalité des surfaces ait été traitée. Les mesures permettent d'en douter.



**Étude de cas 09.** La toiture présente des valeurs mesurées nettement meilleures que les calculs théoriques. Selon les plans d'origine, la dalle en béton armé de toiture ne serait recouverte que de 5 cm d'isolation. Il est possible que dès l'origine, l'épaisseur mise en œuvre ait été supérieure ou que des travaux d'assainissement dont nous n'avons pas eu connaissance aient déjà été entrepris. En l'absence de sondages, nous ne pouvons apporter d'explication véritablement satisfaisante.

Cette synthèse et les écarts parfois très importants relevés entre valeurs théoriques et mesurées permet de conclure qu'intervenir sur des constructions existantes et de baser une approche d'avant-projet d'assainissement énergétique sur des hypothèses théoriques (plans, témoignages, valeurs  $\lambda$  de référence) est délicat.

Seuls des sondages établissant des compositions et épaisseurs exactes, voire des analyses des matériaux pour en vérifier la conductibilité thermique, ou encore la prise en compte de paramètres dynamiques dans les modèles de calcul permettraient de définir des valeurs U des éléments de construction existants réellement fiables.

A défaut, les hypothèses de base servant à l'élaboration des avant-projets peuvent être erronées et amener à des décisions discutables (efficacité moindre que prévu) et à des dépenses qui pourraient s'avérer superflues. Le danger pour la crédibilité des mesures d'assainissement que l'on cherche à encourager est bien réel et malheureusement, il est extrêmement rare que des campagnes de mesures in situ et des sondages sérieux soient entrepris dans le cadre des projets de rénovation énergétique. C'est regrettable car le coût de ces travaux préparatoires est dans l'immense majorité des cas sans commune mesure avec les investissements consentis pour les travaux d'assainissement.

**Intervenir sur des constructions existantes et baser une approche d'avant-projet d'assainissement énergétique sur des hypothèses théoriques est délicat.**

## LES BILANS THERMIQUES DES SCÉNARIOS

Pour chaque bâtiment, un scénario de rénovation a permis d'atteindre la valeur-limite de la SIA 380/1 pour les besoins de chaleur. Cependant, seuls trois bâtiments ont atteint cette limite dès le premier scénario. Pour les sept autres, il a fallu mettre en place des mesures d'isolation supplémentaires pour atteindre les objectifs. Dans certains cas, elles ont une conséquence plus importante sur les qualités architecturales du bâtiment [voir études de cas 03, 10] alors que dans d'autres, l'impact se situe sur le coût des travaux, nettement supérieur [voir études de cas 02, 04, 05, 07].

On constate cependant que les scénarios initiaux qui n'atteignaient pas les valeurs-limites, le gain énergétique n'est pas négligeable du point de vue de l'économie d'énergie. Ils permettent d'atteindre entre 68 % et 88 % des gains requis par la norme SIA 380/1 éd. 2009, souvent avec un impact architectural et financier moindre.

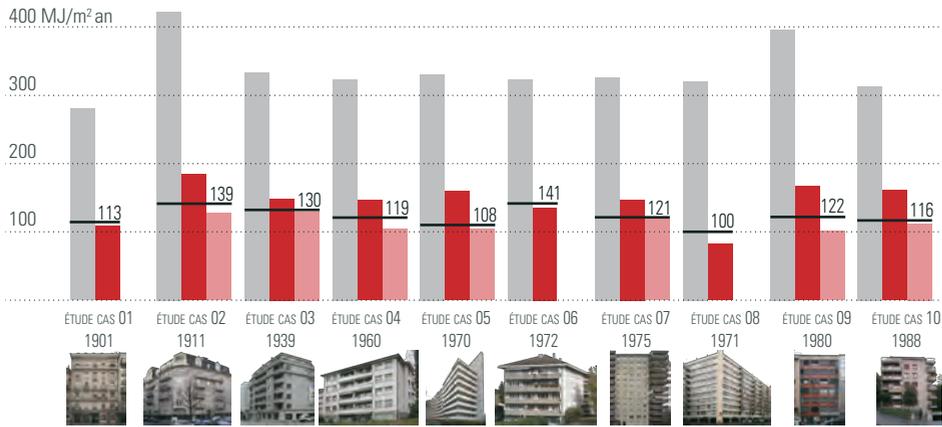


Fig. 49 Représentation des besoins de chaleur pour le chauffage  $Q_h$  « calculés » de l'état existant (gris) et des besoins de chaleur pour le chauffage  $Q_h$  « calculés » les scénarios de rénovation (rouge) en  $MJ/m^2 an$ .

- besoin de chaleur pour le chauffage  $Q_h$  (état existant)
- besoin de chaleur pour le chauffage  $Q_h$  (● scénario 1 – ● scénario 2)
- valeur-limite  $Q_{h,li}$  pour la transformation selon norme SIA 380/1 éd. 2009

Parfois, le surcoût pour améliorer de quelques pour cent le gain énergétique est disproportionné. L'étude de cas 07 le démontre. Pour combler les 17 % de gains énergétiques manquant au scénario 1, le coût des travaux augmente d'environ 135 %. Dans le cas 10, un changement de mesures (agrandissement de la SRE) dans le scénario 2, permet d'atteindre la valeur-limite en réduisant les coûts.

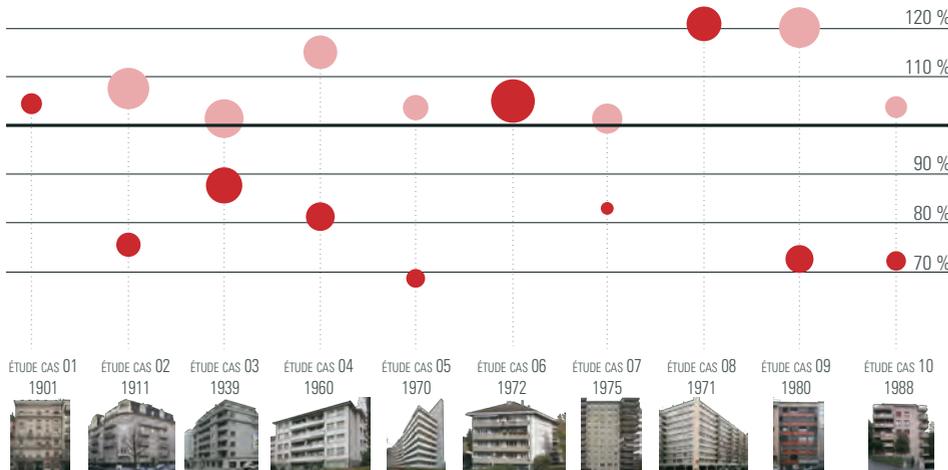
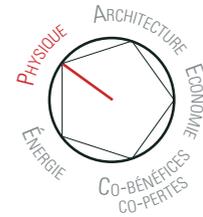


Fig. 50 Graphique représentant l'écart des besoins de chaleur calculés des scénarios par rapport à la valeur-limite SIA 380/1 éd. 2009. La surface des cercles représente le coût des travaux en CHF/m<sup>2</sup> de SRE.

- Scénario 1
- Scénario 2
- Valeur-limite SIA 380/1 éd. 2009 des besoins de chaleur pour le chauffage
- Coût en CHF/m<sup>2</sup>SRE





# LA PHYSIQUE ET LES PONTS THERMIQUES

Lors d'une rénovation énergétique d'un bâtiment, il est essentiel de traiter les ponts thermiques car ils peuvent être responsables d'une part importante des pertes totales par transmission du bâtiment.

## LES DÉPERDITIONS PAR LES PONTS THERMIQUES

Les ponts thermiques linéaires correspondent aux endroits de l'enveloppe thermique ayant des déperditions thermiques supplémentaires par rapport aux pertes considérées à travers les différents éléments de construction. Les pertes sont calculées en fonction de la valeur U de ces éléments, en les considérant comme indépendants les uns des autres. Or ce n'est pas le cas. Ces éléments sont liés les uns aux autres (angle entre toiture et façade ou entre dalle et façade) et ces jointures nécessitent la prise en compte d'un facteur correcteur PSI dans le bilan thermique. Ceci est particulièrement important lorsqu'une rupture d'isolation intervient. Les pertes à travers 1 mètre linéaire de pont thermique peuvent alors être supérieures aux pertes à travers une importante surface de façade ou de toiture.

Le catalogue des ponts thermiques<sup>18</sup> peut être utilisé pour caractériser les ponts thermiques d'un bâtiment. Il regroupe un nombre important de détails de construction standards avec des facteurs PSI précalculés en fonction des valeurs U des différents éléments. Toutefois, il est parfois difficile d'y trouver un détail correspondant à la situation rencontrée. Afin de modéliser le plus précisément possible les déperditions supplémentaires liées à un pont thermique, l'utilisation d'un outil de calcul approprié (par éléments finis) est recommandée. Il permet de considérer une géométrie et des matériaux de construction conformes aux détails de construction réels.

Les scénarios de rénovation analysés permettent de se rendre compte de l'importance de traiter les ponts thermiques. C'est notamment le cas des bâtiments construits dans les années 70 [voir études de cas 07 et 08] pour lesquels l'isolation intérieure de la façade a été remplacée ou ajoutée. Les ruptures d'isolation liées aux nombreuses dalles d'étages ou cloisons intérieures sont responsables de 38 % des pertes à travers l'enveloppe [voir figure 51]. Par contre, un bâtiment construit dans les années 1910, auquel on a appliqué une isolation intérieure à moins de pertes par ponts thermiques [voir étude de cas 02]. Des mesures particulières telles que les retours d'isolation sur les cloisons, planchers ou plafonds améliorent quelque peu ces situations, mais sont souvent difficiles à mettre en œuvre (esthétique, place, coût). Les scénarios de rénovation intégrant une isolation périphérique [voir études de cas 04 et 06] permettent de diminuer ce type de déperditions, particulièrement lorsque l'on rapporte ces pertes aux m<sup>2</sup> d'enveloppe [voir figure 51]. Elles restent cependant élevées. En effet, les nombreuses contraintes de mise en œuvre limitent la continuité parfaite de la couche isolante. Des solutions peuvent alors être trouvées pour limiter les effets néfastes des quelques ponts thermiques subsistants tels que les balcons. Les bâtiments contigus ont des pertes par ponts thermiques nettement inférieurs, entre 9 % et 10 % [voir études de cas 01 et 09].

18 INFOMIND SARL, *Catalogue des ponts thermiques*, Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne, 2003.

**Les nombreuses contraintes de mise en œuvre d'une isolation périphérique limitent la continuité parfaite de la couche isolante et créent environ 15% de pertes par les ponts thermiques selon les cas d'étude.**

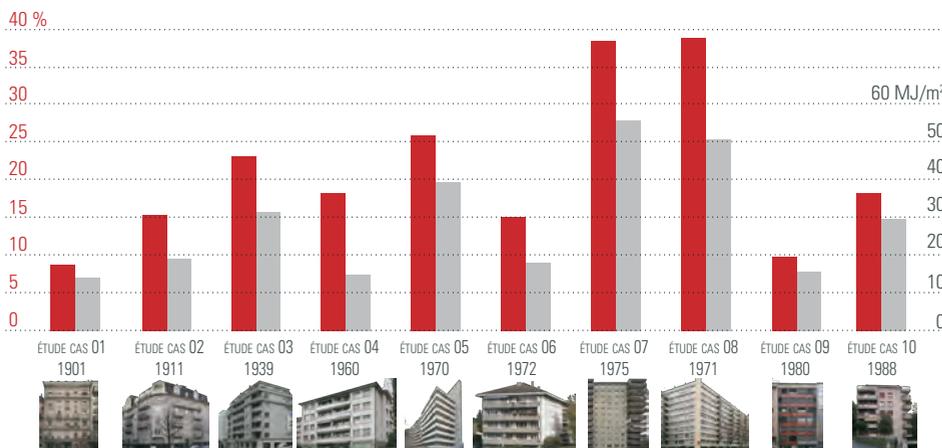


Fig. 51 Représentation des ponts thermiques (sans tenir compte des pertes par aération) pour chaque scénario atteignant la valeur-limite SIA 380/1 éd. 2009.

- part des pertes par ponts thermiques en % (sans tenir compte des pertes par aération)
- pertes par ponts thermiques (sans tenir compte des pertes par aération) en MJ/m<sup>2</sup> de surface d'enveloppe

Plusieurs cas de figure ont été rencontrés et analysés. Le remplacement des balcons par des éléments autoporteurs indépendants de la façade réduit considérablement les pertes et supprime les ponts thermiques des balcons [voir étude de cas 06]. Dans d'autres cas, il a été choisi de réaliser des retours d'isolation au-dessous et au-dessus des dalles de balcons [voir études de cas 04, 05]. Cette mesure a réduit les ponts thermiques liés aux balcons afin de satisfaire aux exigences de la norme SIA 380/1 éd. 2009, et son effet important sur les déperditions thermiques (env. 20 % dans l'étude de cas 05). Parfois, les balcons ont été transformés en loggias et ils ont été inclus dans la surface chauffée [voir étude de cas 10]. Ce qui a comme double effet d'augmenter la surface de référence énergétique et de supprimer le pont thermique du balcon par la mise en place d'une isolation périphérique.

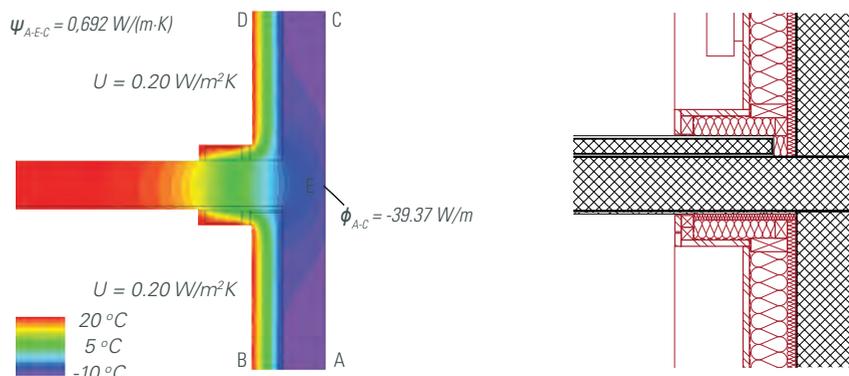


Fig. 52 Illustration des températures au raccord de la dalle à la façade dans l'étude de cas 07, scénario 2.

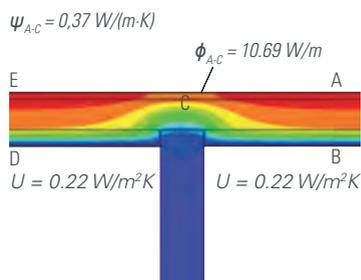


Fig. 53 Illustration des températures au raccord de la dalle sur le sous-sol et des cloisons intérieures du sous-sol dans l'étude de cas 03.

L'isolation intérieure des façades est généralement discontinue au niveau des dalles d'étage [voir étude de cas 07, figure 52]. Des retours d'isolations sont installés aussi bien au niveau du plancher que du plafond. Cette situation va générer des pertes supplémentaires de 0,69 W/(mK) par rapport aux pertes calculées en considérant un mur avec une valeur U de 0,2 W/(m²K) sur toute sa surface.

Une isolation placée sous la dalle contre des locaux non chauffés est fréquemment discontinue [voir étude de cas 03, figure 53]. Les nombreux murs intérieurs du sous-sol génèrent des pertes thermiques supplémentaires de 0,37 W/(mK) dans cette étude de cas. Ces ruptures d'isolation sont responsables d'environ 45 % des déperditions totales à travers la dalle.

Mis à part les dalles de balcon, les caissons de stores ainsi que les jonctions entre les nouveaux cadres de fenêtres et les façades existantes se sont souvent révélés problématiques. Un soin particulier des retours d'isolation autour des cadres et entre les cadres et les murs permettent de régler ces points délicats [voir chapitre sur l'humidité superficielle], qui, dans la réalité sont malheureusement souvent négligés. En ce qui concerne les caissons de stores, dans les meilleurs des cas, ils ont été supprimés au profit de stores en toiles déportés aux extrémités des dalles de balcon [voir étude de cas 05], ou de nouveaux stores à lames orientables ont été intégrés dans l'isolation périphérique [voir étude de cas 01,06] ou à la nouvelle façade [voir étude de cas 09]. Ces mesures permettent un assainissement optimal de ces éléments. Dans les autres cas, la mise en place d'une isolation à l'intérieur des caissons [voir étude de cas 03], ou par-dessus le caisson intérieur [voir étude de cas 10], ou encore le remplacement de ceux-ci par des caissons isolés [voir études de cas 04,07,08] ont été étudiés en détail afin de réduire les déperditions thermiques de ces éléments, mais surtout afin d'éviter au maximum les éventuels risques de condensation.

## L'HUMIDITÉ SUPERFICIELLE

Les faiblesses de l'isolation ainsi que les caractéristiques géométriques des ponts thermiques peuvent également engendrer des températures de surfaces intérieures relativement faibles. Ces situations peuvent causer l'apparition de condensation, puis de moisissures. En fonction de la situation géographique du bâtiment, la norme SIA180, éd. 2014 définit un facteur de température superficielle minimal (fR<sub>si</sub>) au-dessus duquel le risque de condensation est exclu pour autant que la moyenne journalière de l'humidité relative intérieure ne dépasse pas une limite donnée. Les difficultés liées à la mise en œuvre (construction non conforme) ou à une utilisation inadéquate par les occupants (production excessive d'humidité) ne sont pas considérées dans ce calcul. Une valeur de fR<sub>si</sub> supérieure ou égale à 0,72 est requise pour s'assurer de la conformité d'un détail de construction sur le plateau romand. Un résultat inférieur ne signifie pas qu'il y aura auto-

**Les faiblesses de l'isolation peuvent engendrer des températures de surfaces intérieures relativement faibles et causer l'apparition de condensation, puis de moisissures.**

matiquement de la condensation ou des moisissures, mais si cela se produit, ingénieurs et architectes pourraient en être tenus responsables. Une mesure de rénovation visant à améliorer la performance thermique de l'enveloppe ne permet pas toujours d'éviter des problèmes de températures de surfaces trop faibles. Parfois, de nouvelles problématiques peuvent même apparaître. Il est donc important d'analyser les ponts thermiques aussi bien du point de vue thermique qu'hygrométrique.

Le logiciel employé (Flixo Energy) calcule la distribution des températures dans le modèle et peut donc en déduire un fRsi, en fonction de la température de surface et des températures ambiantes intérieures et extérieures. D'une manière générale, les angles (type dalle – façade ou façade – toiture) sont à surveiller. En effet, une surface de contact avec l'air plus grande du côté extérieur que du côté intérieur nécessite d'apporter un soin particulier au raccord d'isolation.

Les ruptures d'isolation causées par des dalles d'étages, des balcons ou des murs intérieurs sont également à examiner. Des retours d'isolation [voir étude de cas 07, figure 52], permettent généralement de régler ces cas. La longueur d'un retour d'isolation a habituellement plus d'influence sur le fRsi que son épaisseur.

La discontinuité de l'isolation entre une façade sur laquelle a été apposé un crépi isolant à l'extérieur et une dalle de comble isolée par le dessus engendre une température de surface relativement faible dans l'angle [voir étude de cas 03, figure 54]. Ces mesures de rénovation, telles qu'elles avaient été initialement définies, ne sont pas conformes aux recommandations de la norme SIA 180, éd. 2014, car elles conduisent à un fRsi inférieur à 0,72. La situation a pu être corrigée en isolant l'angle intérieur sur une longueur suffisante, à la fois contre le mur et le plafond.

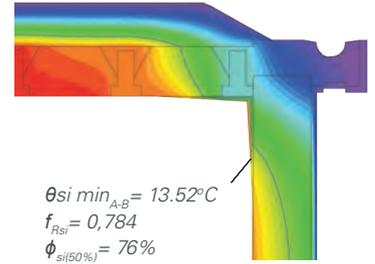
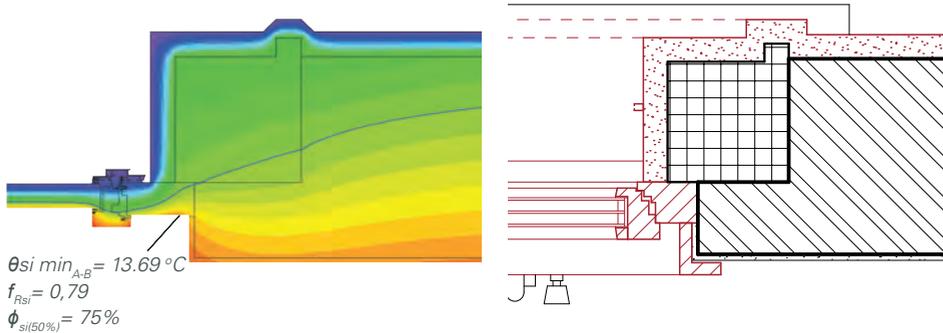


Fig. 54 Illustration des températures au raccord de la dalle des combles et de la façade dans l'étude de cas 03.

Fig. 56 Illustration des températures dans l'embrasure de l'étude de cas 03. Les embrasures en pierre naturelle ont été, tout comme les façades, recouvertes de crépi isolant.

Lorsque des caissons de stores sont mis en œuvre à l'intérieur, le fRsi est très sensible à la fixation du cadre et au positionnement de l'isolant. Une isolation dans la partie inférieure du caisson, sur toute sa longueur, a permis d'augmenter la température de surface dans l'angle entre le cadre et le caisson et à atteindre un fRsi admissible.

Sur de nombreux scénarios de rénovation analysés, les raccords des fenêtres à la façade s'avéraient critiques. Les températures de surfaces, à l'angle intérieur entre le cadre et le mur, étaient relativement faibles. Dans le cas de bâtiments isolés par l'extérieur, un retour de l'isolation dans l'embrasure, jusqu'au cadre, permet généralement de régler ces problèmes [voir étude de cas 03, figure 56]. Dans le cas où l'on souhaite conserver l'aspect original des embrasures, des solutions alternatives doivent être trouvées. Différents essais ont montré qu'une isolation apposée contre une partie du cadre à l'intérieur peut engendrer des températures encore plus faibles à la surface de la partie de cadre non isolée. La pose d'un isolant entre le cadre et le mur améliore la situation [voir étude de cas 02, figure 57].

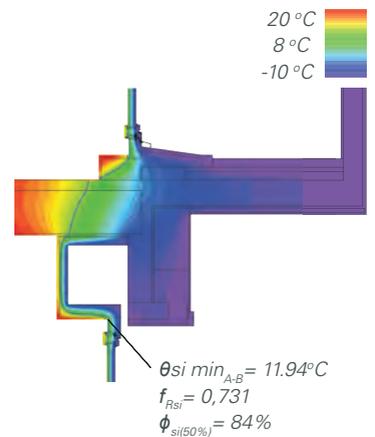
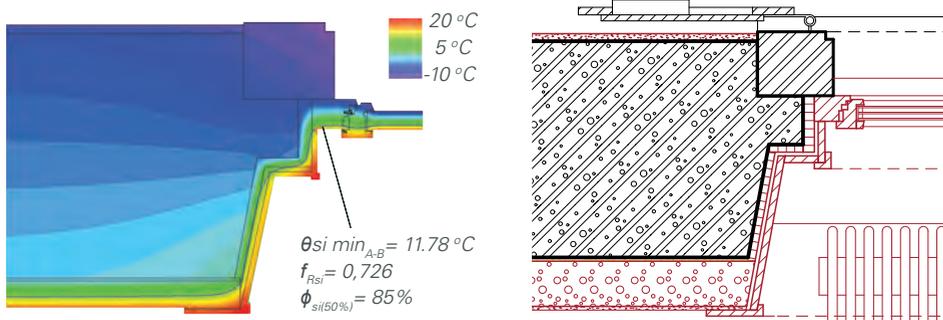


Fig. 55 Illustration des températures dans la construction du caisson de store de l'étude de cas 04.

Fig. 57 Illustration des températures dans l'embrasure de l'étude de cas 02. Les embrasures en pierre naturelle ont été maintenues apparentes, une isolation de 3 à 5 cm a été insérée entre la façade et le cadre afin d'atteindre des températures de surface admissible dans l'angle.

**Dans tous scénarios de rénovation, il s'agit de s'assurer que les différents éléments de construction d'un bâtiment sont exempts de problèmes liés à la diffusion de vapeur d'eau.**

**Il est difficile et peu réaliste de croire que dans les conditions de chantiers et en particulier dans la transformation, il est possible de répondre pleinement aux exigences de la pose d'un pare-vapeur dans les règles de l'art et durable.**

## LES RISQUES DE L'HUMIDITÉ INTERSTITIELLE

Certains détails de construction peuvent présenter un risque de condensation intérieure, aux interfaces entre les différents matériaux, lorsque la pression de la vapeur d'eau est supérieure à la pression de saturation. La méthode de Glaser (ISO13788) permet de s'assurer que les différents éléments de construction d'un bâtiment sont exempts de problèmes liés à la diffusion de vapeur d'eau. Concernant les scénarios de rénovation étudiés dans le cadre de ce projet, une attention particulière a dû être portée lorsque les bâtiments sont rénovés par l'intérieur [voir études des cas 07, 08, 02]. Deux types d'intervention se distinguent. Un premier type, avec une barrière-vapeur, prévoit la pose d'une isolation en laine minérale à l'intérieur avec un pare-vapeur [voir études des cas 07, 08] alors qu'un second type, sans barrière-vapeur, prévoit des panneaux minéraux à l'intérieur couplés avec un crépi isolant extérieur [voir étude des cas 02]. Dans le premier cas, la mise en œuvre d'un pare-vapeur dans les règles de l'art est difficile à obtenir [voir chapitre *Limites de l'isolation intérieure*], mais elle est une condition indispensable à la pose d'une épaisseur d'isolation importante. Dans le second cas, l'utilisation de panneaux minéraux particuliers, ouverts à la diffusion de vapeur, permet d'éviter la mise en place d'un pare-vapeur mais limite parfois l'épaisseur de l'isolant à une dizaine de centimètres avant l'apparition possible de condensation.

Les outils à disposition dans ce projet de recherche ne permettent pas d'analyser cette problématique de manière complète. En effet, Lesosai se limite aux simples éléments de construction. Les endroits plus complexes tels que les jointures d'éléments nécessitent l'utilisation d'outils spécifiques (par exemple WUFI) pour s'assurer de l'absence de problème. Les détails de construction tels que les encastresments des planchers d'étages en bois [voir étude des cas 02] constituent une situation sujette à une détérioration des têtes de poutres<sup>19-20</sup> en bois causée par l'humidité. Étant donné les difficultés de mise en œuvre d'un pare-vapeur étanche dans une telle situation, une analyse dynamique, basée sur un modèle en trois dimensions, serait nécessaire.

## LES LIMITES DE L'ISOLATION THERMIQUE PAR L'INTÉRIEUR

La mise en œuvre d'une isolation par l'intérieur est délicate. Plus l'isolation intérieure est performante et donc épaisse, plus la température de la paroi qui se trouve derrière s'abaisse, car elle ne bénéficie plus de l'apport de chaleur venant de l'intérieur. La vapeur, qui va traverser l'isolation et entrer en contact avec cette surface froide, va condenser sur celle-ci et se transformer en eau. Si cette eau ne peut pas sécher, elle va faire pourrir les matériaux sensibles, par exemple les têtes des poutres en bois [voir études de cas 01, 02]. Dans ces conditions, des moisissures vont également se développer.

Il est possible de limiter la migration de vapeur par la pose d'un frein vapeur. Toutefois, la mise en œuvre de cette feuille (polyamide et polypropylène) requiert un savoir-faire et une grande rigueur. Les feuilles doivent être collées entre elles et contre les supports divers (dalles, poutres...) avec des bandes autocollantes spécifiques à haute performance. Par ailleurs, cette couche ne doit jamais être percée pendant le chantier ni par la suite. Il est difficile et peu réaliste de croire que dans les conditions de chantiers et en particulier dans la transformation, il est possible de répondre pleinement à ces exigences. La durée de vie des bandes autocollantes est limitée (les fabricants ne donnent en général pas de garanties de longue durée) et à long terme, il est fort probable que la vapeur pourra migrer plus facilement avec le risque de condensation que l'on connaît.

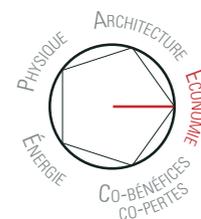
La pluie battante et les processus d'infiltration par capillarité et absorption dans les structures du bâtiment doivent également être pris en compte. L'emploi de logiciels dynamiques est indispensable pour vérifier ces situations.

Une étude réalisée par le bureau Gartenmann Engineering SA et publiée dans la revue de la SIA Tracés n° 19 du 5 octobre 2011 conclut que compte tenu des difficultés décrites brièvement ci-dessus, il est préférable d'utiliser des panneaux isolants intérieurs minéraux ou silicocalcaires d'une épaisseur de 6 à 8 cm, perméables à la vapeur d'eau, offrant une grande capacité d'assèchement et ne nécessitant pas la pose d'un frein vapeur.

19 MAUGARD, Alain, «*Pathologie des risques liés à l'humidité au niveau des poutres encastrees dans un mur extérieur isolé par l'intérieur*», Programme d'accompagnement des professionnels «*Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012*», septembre 2013.

20 GAUTHIER, Frank, «*Poutres encastrees et isolation intérieure*», *Qualité construction*, 142 (37 à 39), janvier 2014.

# ÉCONOMIE



Étant donné l'importance des montants en jeu, la question des coûts est centrale dans tout projet d'assainissement énergétique, en particulier dans les immeubles de logement collectif. Dans la majorité des cas, les charges de chauffage sont supportées directement par les locataires, ce qui implique que les économies d'énergie ne profitent pas directement au propriétaire qui assume le coût des travaux. Un report des frais d'assainissement sur les loyers s'avérant souvent problématique, on comprend pourquoi nombre de propriétaires d'immeubles de rendement sont peu motivés par la perspective d'un projet d'assainissement énergétique.

La présente étude ambitionne de trouver un juste équilibre entre les exigences énergétiques, la préservation du caractère architectural, les valeurs d'usage et les contraintes économiques. Il est donc indispensable de procéder à un chiffrage financier permettant de compléter les scénarios afin que ce paramètre puisse être pris en considération et fournir une vision globale de la problématique.

Tous les scénarios étudiés ont été chiffrés (hors coûts de financement), ce qui permet de mettre en perspective les gains énergétiques attendus avec les investissements nécessaires pour les obtenir, de comparer l'impact financier des différents scénarios et de vérifier la viabilité économique des solutions retenues (privilégiant la préservation du caractère architectural) par rapport aux solutions d'emballage périphérique communément mises en œuvre de nos jours.

**L'objectif est de vérifier la viabilité économique des solutions retenues privilégiant la préservation du caractère architectural par rapport aux solutions d'emballage périphérique communément mises en œuvre de nos jours.**

## LA MÉTHODE

L'estimation des coûts de réalisation des scénarios sous la forme d'un devis général a été menée selon la méthode du code des coûts de construction du bâtiment (eCCC-Bât) édictée par le centre de rationalisation du bâtiment (CRB), soumis à la norme SN 506 511. Les groupes principaux (A. Terrain, B. Travaux préparatoires, C. Gros œuvre, D. Installations, etc.) se décomposent en Groupes d'éléments (C1. Fondations, C2. Parois porteuses, C3. Piliers, etc.) eux-mêmes décomposés en éléments (C1.1 Canalisations sous le bâtiment, C1.2 Etanchéité et isolation sous dalle de sol et radier, C1.3 Massifs de fondation, semelles filantes, etc.). La liste des éléments proposée par la méthode eCCC-Bât n'est pas exhaustive et peut ainsi être complétée et adaptée à chaque projet de construction.

Des métrés ont été établis pour quantifier chaque élément. Les unités courantes sont le mètre carré (m<sup>2</sup>) pour les surfaces de toiture, de plancher, de façade, etc., les mètres linéaires (m<sup>1</sup>) pour les longueurs de garde-corps, de ferblanterie, de retours d'isolation ou les pièces (pces) pour les éléments finis livrés sur le chantier tels que fenêtres, portes, radiateurs, etc.

Un prix unitaire en CHF (TVA incluse) est attribué à chaque élément. Dans le cadre de cette étude, les prix ont été définis de trois manières :

- issus de l'expérience professionnelle de bureaux d'architecture travaillant activement dans la rénovation en Suisse romande.
- tirés de catalogues et séries de prix (par exemple, série de prix indicatifs pour travaux du bâtiment et génie civil éditée tous les deux ans par la Fédération vaudoise des entrepreneurs – FVE)
- déterminés sur la base d'offres d'entreprises, en particulier pour les éléments spécifiques (façade métallique, caissons préfabriqués, fenêtres de remplacement à l'ancienne, etc.).

Les coûts des éléments ont été uniformisés quelle que soit la situation géographique du modèle. Un coefficient appliqué à chaque élément permet de pondérer son coût unitaire en fonction de la complexité de sa mise en œuvre. Un coefficient de 1 est attribué lorsque l'opération est considérée comme standard. Un coefficient supérieur à 1 est pris en compte lorsque la complexité de mise en œuvre est élevée et inversement.

Certains travaux qui ne peuvent être évités en raison de la nature de l'intervention, mais qui sont apparentés à de l'entretien périodique ont été inclus dans les chiffrages avec un coefficient inférieur à 1. Par exemple, lors du remplacement des fenêtres, des travaux de peinture sont indispensables et en général le propriétaire en profitera pour faire rafraîchir l'ensemble de la pièce, voire de l'appartement, ce qui fait partie des frais d'entretien usuels. Dans ce cas, le rafraîchissement de l'entier du logement a été inclus

dans le chiffrage, mais avec un coefficient variant de 0,6 à 0,8, en fonction des situations. Même remarque concernant les cuisines et les sanitaires qui doivent être remplacés lors des interventions contenant de l'isolation intérieure.

Les éléments sont regroupés par famille (façade, toiture, plancher contre terre ou sur sous-sol, attiques, etc.) à des fins d'analyse. Finalement, le coût des éléments de construction de chaque scénario est complété par les coûts indirects (coûts d'étude, divers et imprévus, frais administratifs) pour définir une somme totale. C'est cette dernière qui est reportée sur les fiches de chacun des modèles et qui correspond aux détails présentés sur la fiche.

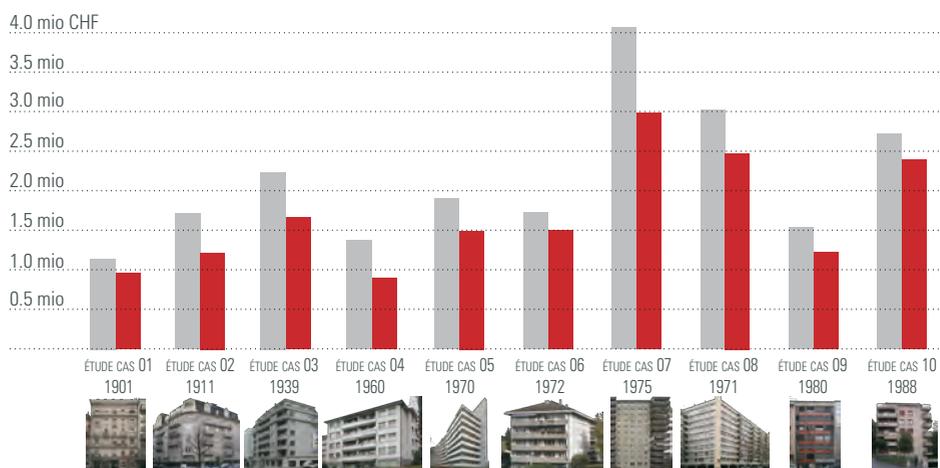
## LES COÛTS LIÉS À L'ASSAINISSEMENT ÉNERGÉTIQUE

Dans l'analyse économique d'un assainissement énergétique, les coûts des travaux qui doivent être considérés sont ceux qui ne sont entrepris qu'à des fins d'économie d'énergie, à l'exclusion des frais d'entretien et de ravalement usuels qui auraient dû être engagés à moyen ou long terme dans le cadre du plan de maintenance de l'immeuble, pour des raisons de vétusté et de conservation de la valeur du bien immobilier. En l'absence d'une méthodologie claire et reconnue concernant la répartition des coûts globaux entre assainissement, entretien courant et améliorations non liées à l'énergie, nous avons pris le parti d'exclure certains éléments selon notre logique propre au moment de passer à l'analyse de l'impact financier des mesures proposées.

Ces coûts collatéraux ont été isolés dans les chiffrages des scénarios et exclus des coûts purement relatifs à l'assainissement énergétique. Ils concernent principalement les éléments suivants :

- solde des travaux de peinture dans les appartements et du remplacement des cuisines et sanitaires qui demeurait dans le devis général .
- remplacement des stores toiles.
- maintenance des fenêtres et volets (changement des joints et garnitures, réglages, peinture, etc.).
- ravalement des façades crépies.
- étanchéités sur les toitures plates.

Fig. 58 Graphique représentant la correspondance entre les coûts de rénovation totaux (en gris) et les coûts liés exclusivement à l'assainissement énergétique (en rouge).



- coût total de rénovation en CHF
- part des coûts liée exclusivement à l'assainissement énergétique

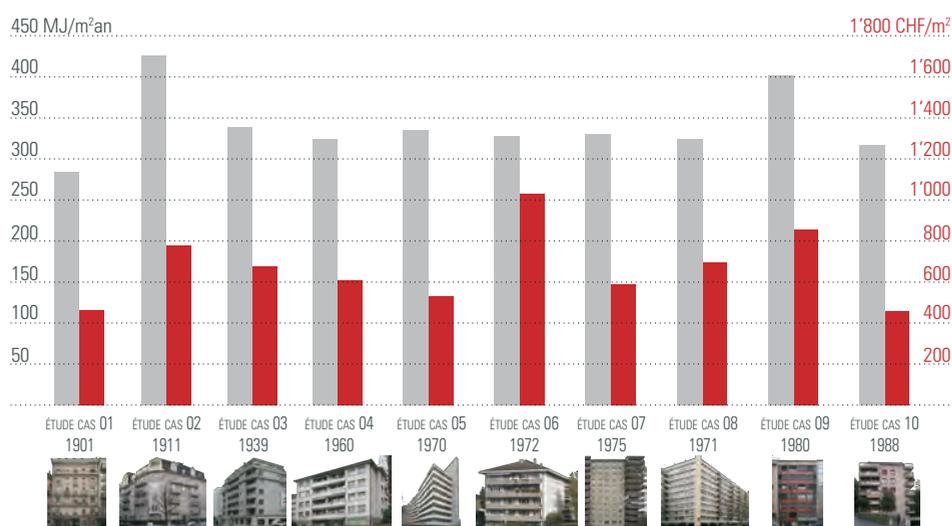
En moyenne, les coûts strictement imputables à l'assainissement énergétique dans les scénarios retenus se montent à environ 75 % du total.

Sauf indication contraire, les coûts et ratios analysés plus avant sont basés sur les coûts d'assainissement à l'exclusion des travaux de rénovation ordinaire. Ceci peut expliquer des écarts dans les ratios par rapport aux fiches des modèles.

L'angle de vue habituellement retenu est celui du coût par mètre carré de surface de référence énergétique (SRE). D'une manière générale, les investissements nécessaires pour atteindre les objectifs énergétiques fixés par la norme SIA 380/1 éd.2009 sont élevés car seules des interventions lourdes et en général onéreuses (remplacement des fenêtres, isolation des parties pleines, etc.) permettent de satisfaire aux exigences actuelles.

## LES COÛTS EN LIEN AVEC LA CONSOMMATION EXISTANTE

Sur l'échantillon étudié, on n'observe pas de corrélation entre l'époque de construction et le coût de l'assainissement énergétique. En revanche, un certain lien existe entre la consommation d'énergie de chauffage du bâtiment avant travaux et le coût de rénovation : lorsqu'un bâtiment présente une consommation d'énergie élevée, les coûts de rénovation par m<sup>2</sup> de SRE seront proportionnellement élevés. La corrélation entre ces deux grandeurs n'est cependant pas très élevée (coefficient de corrélation d'environ 0,4 – corrélation parfaite à 0 et décorrélation totale à 1) car les coûts ne sont pas exclusivement liés aux mesures énergétiques « in abstracto », mais tributaires des caractéristiques architecturales, géométriques et constructives de l'immeuble.



Les coûts ne sont pas exclusivement liés aux mesures énergétiques « in abstracto », mais tributaires des caractéristiques architecturales, géométriques et constructives de l'immeuble.

Fig. 59 Graphique représentant la correspondance entre consommation énergétique calculée (en gris) et l'investissement financier (en rouge).

- consommation calculée des bâtiments avant travaux en MJ/m<sup>2</sup>/an
- rapport coûts/SRE en CHF/m<sup>2</sup>

Ce ratio est utile car il permet de mettre en relation le coût des travaux avec les loyers (considérés en francs par mètre carré de surface locative qui peuvent être rapprochés aux mètres carrés de SRE) et leur éventuelle adaptation suite aux travaux. Cependant, il ne met pas en relation les dépenses et le gain énergétique, autrement dit, l'efficacité énergétique des dépenses consenties. Un scénario peut proposer un coût par mètre carré de SRE peu élevé, mais s'avérer moyen en matière d'efficacité énergétique pour chaque franc investi. Ceci est vrai en particulier lorsque la consommation avant travaux est déjà relativement proche de celle qui doit être atteinte.

## L'EFFICACITÉ DES MESURES DE RÉNOVATION

Pour illustrer l'efficacité de chaque scénario, nous avons calculé l'investissement nécessaire en francs pour économiser 1 MJ de besoin de chauffage. Cette analyse montre que le modèle 01, qui est le moins onéreux en CHF par m<sup>2</sup> de SRE (31 % en dessous de la moyenne) ne se situe que 10% en dessous de la moyenne en matière de coût par MJ économisé (moyenne par ailleurs fortement impactée à la hausse par le modèle 06). Ceci est à mettre en relation avec le fait que le bâtiment dans son état actuel est déjà relativement performant.

Le modèle 06 est le plus cher en CHF/m<sup>2</sup> de SRE mais de peu. Par contre, en matière d'efficacité énergétique, il est de très loin le pire.

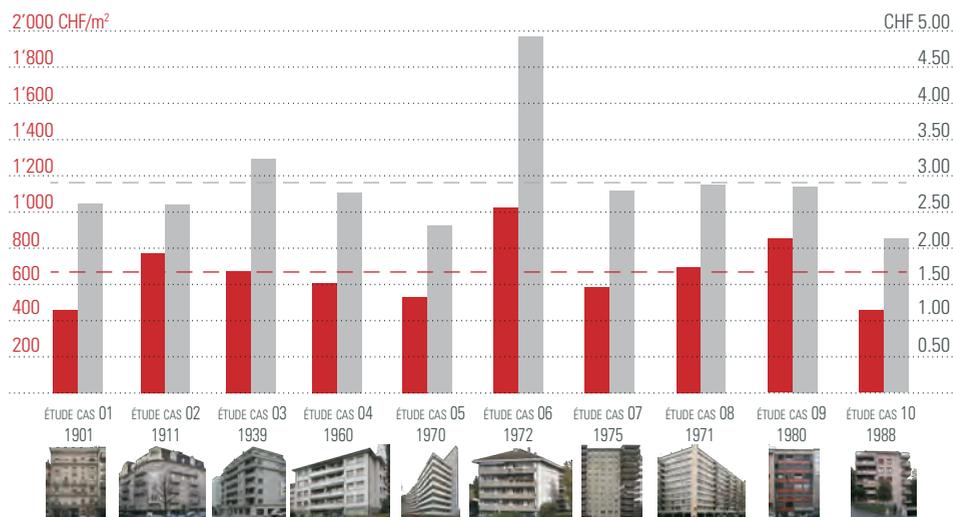
À investissement similaire par m<sup>2</sup> de SRE, chaque franc dépensé peut avoir un impact énergétique bien différent. L'analyse d'efficacité permet de s'en rendre compte et d'orienter les investissements là où ils s'avéreront les plus efficaces. Dans une optique de pure efficacité énergétique, on investira en priorité dans les modèles 05 ou 10, avant de s'occuper du modèle 01. La simple observation du critère de francs par m<sup>2</sup> de SRE aurait conduit à la décision inverse.

De manière globale, l'investissement et le gain financier lié aux économies d'énergie peuvent être mis en relation. En considérant le coût moyen de CHF 2.91 sur les 10 modèles pour économiser 1 MJ/an et un prix de l'énergie<sup>21</sup> de 3.2ct/MJ on calcule un rapport de 90 pour 1, soit une durée de retour sur investissement moyenne de 90 ans. Dans le meilleur des cas (modèle 10) la durée est ramenée à environ 70 ans.

21 prix moyen du litre de mazout de chauffage entre 2010 et 2015 pour un volume de 9001 à 14'000 litres = CHF 0.91 (source OFS). 1 litre de mazout équivalant approximativement à 10kWh, soit 36MJ. Le coût de 1 MJ = 2.5ct pour le besoin de chauffage, soit 3.2ct/MJ après correctif lié au rendement de la chaudière considéré à 80% (selon la norme SIA 380/1 (2009)).

Fig. 60 Graphique représentant la correspondance entre coût par MJ économisé en besoin de chauffage (en rouge) et investissement financier (en gris).

● rapport coûts/SRE en CHF/m<sup>2</sup>  
 ● coût en CHF pour chaque MJ en besoin de chauffage économisé  
 -- valeur médiane



Selon la norme SIA 480 éd. 2004 « *Calcul de rentabilité pour les investissements dans le bâtiment* », la durée de vie technique approximative pour un usage moyen est estimée à 40 ans pour le chauffage, la ventilation, les protections solaires et les toitures, 50 ans pour les fenêtres et 70 ans pour les façades. Le retour sur investissement des scénarios proposés est systématiquement supérieur à ces durées. Un calcul affiné par actualisation des cash-flows futurs ne changerait pas fondamentalement le résultat.

**Tant que le prix de l'énergie restera aux niveaux actuels, les projets d'assainissement énergétique resteront très éloignés du seuil de rentabilité et ne pourront être justifiés sur le seul critère économique.**

Tant que le prix de l'énergie restera aux niveaux actuels, les projets d'assainissement énergétique ne pourront être justifiés sur le seul critère de l'économie d'énergie réalisée à futur. Cette conclusion doit cependant être mise en perspective et ne peut constituer à elle seule une raison valable de différer ou d'abandonner simplement tout projet de rénovation énergétique :

- les bâtiments construits durant la période passée en revue dans l'étude sont vieillissants (moyenne de 55 ans d'âge pour les dix cas d'étude). Ils ne correspondent plus aux standards actuels en matière d'habitabilité et de normes techniques. Le propriétaire souhaitant maintenir la valeur de son bien n'a pas d'autre choix que d'intervenir et lorsque cette intervention va au-delà du cosmétique, la réglementation impose d'atteindre les valeurs de consommation de la norme SIA 380/1 (2009). L'assainissement énergétique est donc obligatoirement inclus dans les travaux de rénovation.
- la pression politique est importante et la réglementation peut évoluer de l'incitation à l'obligation, ou à la taxation de plus en plus lourde des énergies fossiles.
- la prise de conscience individuelle par les propriétaires de leur responsabilité peut être un élément déclencheur dans un projet de rénovation énergétique, prenant le pas sur les considérations de rendement économique.

## LE GAIN ÉNERGÉTIQUE ET L'ANALYSE DES SCÉNARIOS

L'analyse des différents scénarios proposés pour chaque modèle et de leur efficacité énergétique mise en relation avec leur coût d'intervention (ici le coût total y compris les travaux d'entretien ordinaire) est également intéressante.

Ce diagramme montre que dans certains cas on réalise une économie d'énergie substantielle, mais insuffisante au regard de la norme pour des coûts qui sont nettement inférieurs à ceux du scénario qui permet d'atteindre les valeurs requises. Ce n'est pas systématique, mais cela est le cas pour le modèle 07, et dans une moindre mesure pour les modèles 02 et 03.

Dans le cas des scénarios qui se rapprochent de très près de l'économie énergétique demandée (90 % et plus), il y aurait probablement moyen d'arriver à respecter les prescriptions sans effet de seuil en matière financière en réglant, en améliorant ou remplaçant les installations techniques par exemple.

Dans le cas du modèle 07, il existe un effet de seuil. La différence entre les scénarios 1 et 2 tient à l'isolation de la façade, qui représente un montant très élevé. On peut imaginer que le solde d'économie à réaliser (11 %) pourrait aisément être atteint en n'isolant qu'une partie des façades.

**Dans certains cas, on réalise une économie d'énergie substantielle, mais insuffisante au regard de la norme pour des coûts qui sont nettement inférieurs à ceux du scénario qui permet d'atteindre les valeurs requises.**

Dans le cadre d'un avant-projet réel, d'autres considérations qui n'ont pas pu être étudiées dans le cadre de cette étude entreraient en ligne de compte : taux de renouvellement d'air, efficacité des installations techniques, etc.

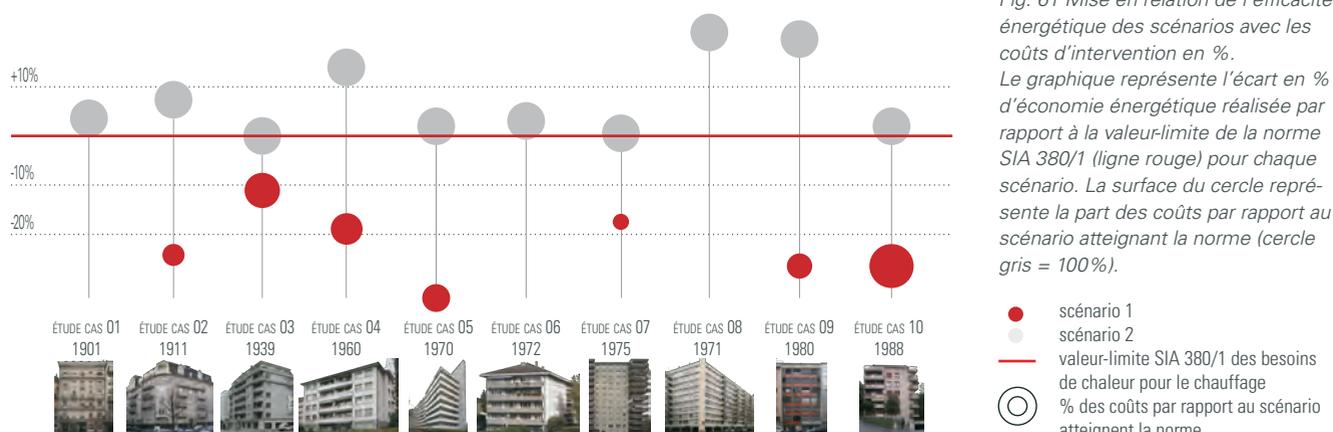


Fig. 61 Mise en relation de l'efficacité énergétique des scénarios avec les coûts d'intervention en %. Le graphique représente l'écart en % d'économie énergétique réalisée par rapport à la valeur-limite de la norme SIA 380/1 (ligne rouge) pour chaque scénario. La surface du cercle représente la part des coûts par rapport au scénario atteignant la norme (cercle gris = 100%).

- scénario 1
- scénario 2
- valeur-limite SIA 380/1 des besoins de chaleur pour le chauffage
- % des coûts par rapport au scénario atteignant la norme

L'analyse ci-dessus met en évidence la divergence majeure qui peut exister entre capacités technique et économique de l'ouvrage et de son propriétaire et valeurs énergétiques normatives, qui peuvent s'avérer disproportionnées eu égard à la substance du bâtiment.

La réponse n'est pas univoque et une des conclusions générales de notre recherche s'applique ici aussi : chaque cas est particulier et mérite qu'une étude approfondie soit menée avant d'appliquer des solutions toutes faites qui ne seraient pas forcément adéquates.

## LE MAINTIEN DU CARACTÈRE ARCHITECTURAL N'ENGENDRE PAS FORCÉMENT DE SURCÔÛT

Le chiffrage des scénarios d'intervention permet de tirer plusieurs enseignements.

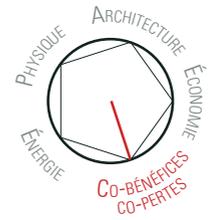
Le parti pris de l'étude consistant à privilégier le maintien des caractéristiques architecturales de l'enveloppe des bâtiments étudiés n'engendre pas de surcoûts particuliers, contrairement à certaines idées reçues. Des chiffrages parallèles menés sur certains modèles pour des solutions d'emballage en isolation externe (isolation périphérique crépie et façade ventilée sur isolation externe) ont débouché sur des écarts de l'ordre de 15 % maximum, et pas systématiquement dans le sens d'un surcoût pour la solution respectueuse des caractéristiques architecturales de l'immeuble. Ces différences se situent dans la marge de variation admissible à ce stade du projet.

Un assainissement énergétique visant à respecter la norme 380/1 éd. 2009 nécessite, sur l'ensemble des modèles, des travaux conséquents (changement des fenêtres, isolation des façades, etc.) qui entraînent d'importantes dépenses allant bien au-delà des besoins en financement pour des rénovations ordinaires à minima, sans plus-value énergétique. Cependant, des questions de vétusté, de mise à niveau du standing des appartements, de gain de surfaces locatives par densification, etc. peuvent être couplées à la rénovation énergétique qui, dans cette approche globale de la problématique, s'en trouve parfaitement justifiée.

Certains scénarios n'atteignant pas les exigences de la norme, mais s'en rapprochant grandement présentent des coûts moindres en pourcentage relatif. L'effort financier à consentir pour réaliser l'économie des derniers mégajoules apparaît important, mais il serait erroné d'en tirer des conclusions générales. Dans ces situations, il serait utile de remettre l'ouvrage sur le métier et d'élaborer un scénario alternatif, d'intervenir sur les installations techniques ou sur les sources d'énergie pour tenter d'atteindre la norme pour un coût intermédiaire.

**Le parti pris de l'étude consistant à privilégier le maintien des caractéristiques architecturales de l'enveloppe des bâtiments étudiés n'engendre pas de surcoûts particuliers, contrairement à certaines idées reçues.**





## LES CO-BÉNÉFICES ET LES CO-PERTES

Une amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment a inévitablement des conséquences sur l'utilisation des espaces et leurs qualités. Elle peut apporter des « co-bénéfices », mais aussi des « co-pertes » souvent sous-estimés. Même s'ils ne peuvent être financièrement chiffrés, il serait faux d'en faire abstraction lors de l'évaluation d'une intervention. Dans chaque scénario, une évaluation a été faite afin de tenir compte d'une vue globale des forces et des faiblesses de chaque intervention.

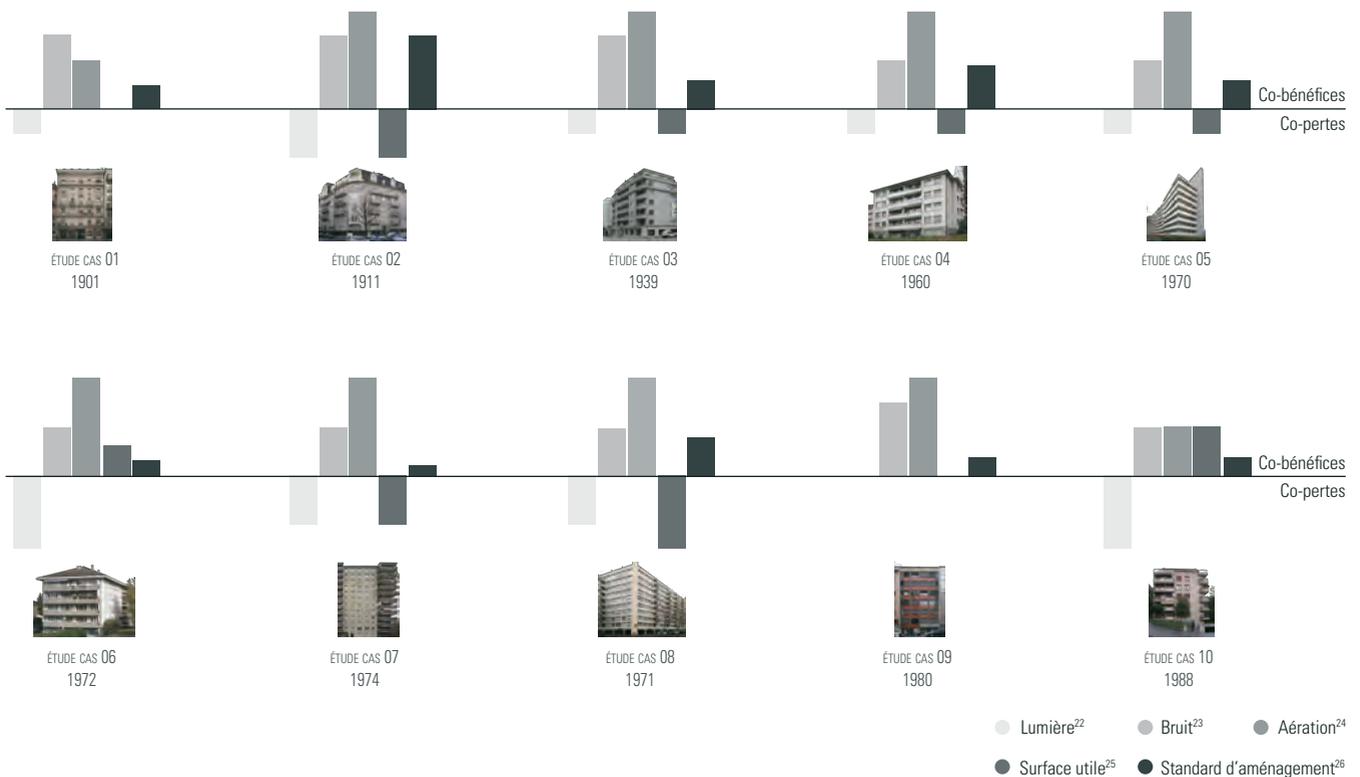


Fig. 62 Graphiques d'évaluation des co-bénéfices et co-pertes selon cinq critères pour les dix bâtiments des cas d'étude.

**La lumière<sup>22</sup>** : une isolation des façades augmente la profondeur d'embrasure [voir études de cas 01, 06, 07, 08], réduit fréquemment le vide de maçonnerie [voir études de cas 03, 04, 06] et ainsi diminue l'apport de lumière. La position de la nouvelle fenêtre est importante, elle peut minimiser la perte de lumière [voir étude de cas 06].

**L'aération<sup>23</sup>** : l'enveloppe rénoverée, plus étanche, apporte un meilleur confort en diminuant les infiltrations d'air frais et en augmentant les températures de surface. Cependant, il faut prévenir les dégâts dus à l'humidité en assurant un renouvellement d'air suffisant, soit en installant une aération contrôlée, soit des grilles de ventilation hygro-réglable [voir fiches des études de cas] en façades. Il s'agit d'un aspect crucial d'une rénovation énergétique de l'enveloppe. En effet, une aération par l'ouverture des fenêtres s'avère souvent insuffisante ; les usagers étant souvent absents une grande partie de la journée, ils ne peuvent ainsi pas ouvrir les fenêtres.

**La modification de la surface utile<sup>24</sup>** : les mesures d'assainissement énergétique de l'enveloppe s'accompagnent parfois par une augmentation de la surface utile, avec des espaces supplémentaires dans les combles ou des espaces extérieurs plus grands [voir études de cas 06, 10]. Ils permettent parfois également d'optimiser la répartition des pièces aux besoins actuels. Mais une isolation intérieure peut aussi diminuer la surface utile des pièces du logement [voir étude de cas 08]. La perte de surfaces dans le logement peut s'avérer problématique tant du point de vue réglementaire (surfaces minimums) que de l'état locatif (réduction de sa valeur). Dans certains cas, la démolition du doublage intérieur avant la pose de l'isolation intérieure permet de limiter la perte de surface utile [voir étude de cas 07].

**Même si les « co-bénéfices » et les « co-pertes » ne peuvent être financièrement chiffrés, il serait faux d'en faire abstraction lors de l'évaluation d'une intervention sur l'enveloppe du bâtiment.**

- 22 Critères pour la lumière : aucune diminution des vides de lumière, augmentation de la profondeur des embrasures, diminution du vide de lumière, ajout d'éléments d'ombrage (balcons).
- 23 Critères pour l'aération : suppression /diminution des infiltrations d'air, amélioration des températures de surfaces, aucune amélioration.
- 24 Surface utile : augmentation de la surface intérieure ou extérieure, surface identique, diminution de la surface, diminution du nombre de pièces.
- 25 Critères pour le standard d'aménagement : salles de bain neuves, cuisines neuves, nouveaux revêtements de sol, nouveaux stores.
- 26 Critères pour le bruit : amélioration phonique envers les bruits extérieurs en bord de route ou en périphérie, amélioration phonique entre appartements.

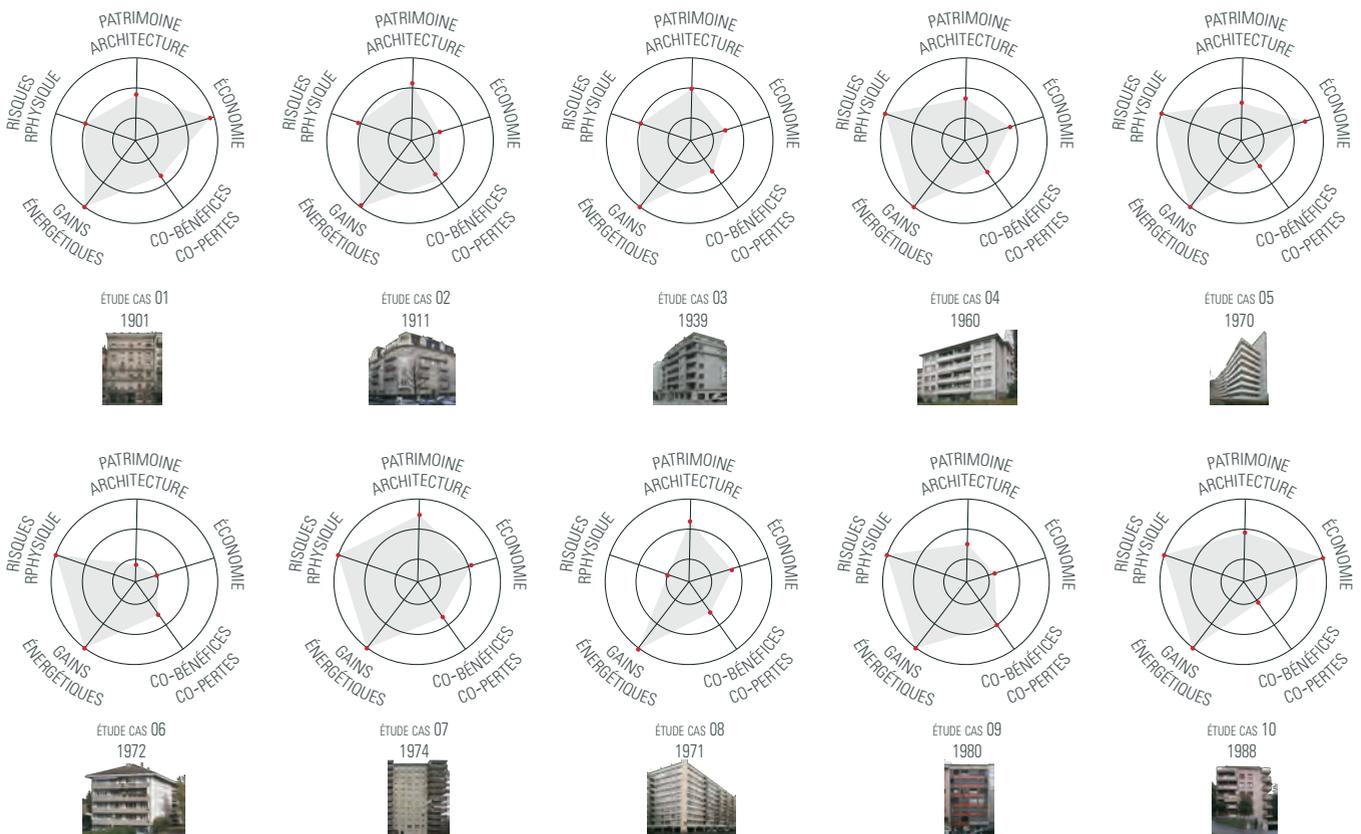
**Le standard de l'aménagement<sup>25</sup>** est amélioré par les co-bénéfices apportés par les travaux indirectement liés à l'assainissement de l'enveloppe. Lors d'une isolation intérieure, il est parfois nécessaire de modifier des cuisines [voir études de cas 07, 08], des espaces sanitaires [voir étude de cas 02] ou de rafraîchir des peintures. Il est parfois nécessaire de changer des stores [voir études de cas 04, 07, 08, 09], une étanchéité ou des revêtements de sol extérieur lors d'une intervention sur les façades extérieures. Une planification correcte d'un assainissement énergétique permet de réaliser simultanément des travaux habituellement attribués à l'entretien. Ses travaux permettent aussi une mise aux normes de sécurité de certaines parties de l'ouvrage comme les garde-corps [voir études de cas 03, 04], les portes des logements, etc.

**Le bruit<sup>26</sup>** : le remplacement des fenêtres, l'isolation des façades ou la fermeture d'espaces extérieurs [voir étude de cas 10] améliorent la protection contre les bruits aériens extérieurs. Cette amélioration de l'isolation phonique envers l'extérieur augmentera la perception des bruits d'équipements et les bruits aériens et d'impacts intérieurs. Une isolation thermique du plancher des combles, de la toiture ou du plancher sur un sous-sol peut parfois améliorer l'isolation phonique entre les logements et les espaces communs.

## UNE ALTERNATIVE À « L’EMBALLAGE »

Existe-t-il des alternatives plus respectueuses de la substance architecturale que l’emballage systématique en isolation périphérique pour atteindre les niveaux de consommation d’énergie prescrits par les normes? Ces alternatives sont-elles économiquement réalistes? Quelle approche méthodologique permet d’y parvenir?

Le projet eRen a permis de donner des réponses étayées à ces questions mises en évidence en introduction. Sur l’ensemble des dix modèles étudiés la solution de l’isolation périphérique protégée par un bardage en bois a été préconisée dans un cas, les autres proposent des solutions mixtes ou d’isolation par l’intérieur.



Pour chaque modèle au moins un scénario conforme à la norme 380/1 éd. 2009 en matière de consommation énergétique a pu être dégagé, qui préserve les caractéristiques architecturales de l’enveloppe du bâtiment dignes d’être conservées.

«Thermiquement l’isolation périphérique ça marche. Mais le projet eREN démontre qu’il n’y a pas que ça qui marche.»

Ce résultat a pu être atteint grâce à une collaboration intense entre les différents spécialistes qui implique un investissement que souvent les propriétaires hésitent à consentir, bien qu’il ne représente qu’une fraction relativement faible du coût total.

Les chiffrages ont démontré que le coût d’une rénovation énergétique d’une enveloppe de bâtiment est certes élevé mais que les solutions alternatives peuvent être concurrentielles par rapport à la solution habituelle de l’isolation périphérique systématique, tout en offrant des solutions parfois meilleures au niveau de la durabilité des matériaux et éléments de construction.

L’étude montre aussi que les coûts d’une rénovation énergétique demeurent très élevés en regard des gains que l’on peut espérer réaliser sur l’économie d’énergie, au tarif actuel de cette dernière.

Il est vrai que le volet énergétique de la rénovation est souvent inclus dans un projet visant à revaloriser un immeuble qui nécessite de toute façon des travaux pour des questions de salubrité, de vétusté ou pour la mise en valeur d’un potentiel inexploité. Il n’en demeure pas moins que dans de nombreux cas où le bâtiment a été entretenu et où les

Fig. 63 Graphiques d’évaluation du scénario de rénovation de l’enveloppe qui atteint la norme SIA 380/1 éd. 2009 pour les dix bâtiments selon cinq critères [voir l’évaluation du scénario 2 dans la fiche de l’étude de cas].

**PATRIMOINE – ARCHITECTURE :** [voir critères d’évaluation du graphique p.24].

**GAINS ÉNERGETIQUES :** valeur-limite de la norme SIA 380/1 éd. atteinte ou pas atteinte.

**RISQUE PHYSIQUE :** aucun risque, principes délicats (sans pare-vapeur), principes délicats nécessitant un soin particulier à la mise en œuvre (pare-vapeur), détails non résolus.

**ÉCONOMIE :** selon le coût/m<sup>2</sup> de SRE, sur une échelle de 500 CHF/m<sup>2</sup> à 1’400 CHF/m<sup>2</sup>.

**CO-BÉNÉFICES – CO-PERTES :** moyenne des co-bénéfices et co-pertes [voir critères d’évaluation du graphique p.41].

perspectives d’augmentation des loyers sont faibles, une rénovation énergétique a peu de chances d’être entreprise, faute d’incitation économique suffisante.

L’obligation d’atteindre les valeurs sévères prescrites par la norme SIA 380/1 éd. 2009 dans le cadre de la rénovation peut même avoir l’effet pervers de décourager le propriétaire d’entreprendre certains travaux qui amélioreraient notablement la situation à moindre coût sans pour autant atteindre les limites légales. Le durcissement des valeurs cibles pour la rénovation qui a commencé avec la révision de 2009 de la norme et qui va selon toute vraisemblance se poursuivre pourrait encore amplifier le décalage entre des intentions en soi louables et le taux de rénovation.

Finalement, inscrire dans la loi l’obligation d’assainir l’enveloppe des bâtiments à court ou moyen terme pourrait impliquer des coûts très élevés que de très nombreux propriétaires ne seraient pas à même d’assumer, faute de fonds de rénovation suffisant. Les collectivités publiques sont d’ailleurs confrontées au même défi. Force est aussi de constater que tant les mandataires que les entreprises spécialisées de qualité feraient défaut devant l’immensité de la tâche.

Ces conclusions peuvent sembler négatives. Elles ne le sont que si l’on s’arrête à ce constat en baissant les bras. Nous pensons que les pistes existent pour infléchir le cours des choses :

- La réglementation et également les labels qui ont été jusque-là axés principalement sur les constructions neuves doivent beaucoup mieux prendre en compte les spécificités de la rénovation du bâti existant et de ses limites.
- L’information, l’incitation et l’obligation doivent être menées de front intelligemment et avec une vision à long terme, à l’échelle de la durée de vie des bâtiments. L’implication des spécialistes des différents domaines et la prise en compte des particularités du système politique suisse sont de mise afin d’éviter les écueils.
- L’effort de formation dans le domaine auprès des professionnels, des entreprises, des apprentis et étudiants doit être renforcé pour que la rénovation énergétique bénéficie de professionnels qualifiés.

Le jeu en vaut la chandelle. Et quoi qu’il en soit, avons-nous le choix ?

## CHECK-LIST

Les bâtiments étudiés montrent les contraintes et les limites d'un assainissement énergétique qui tient compte de l'efficacité économique, des contraintes constructives réelles et de la protection de la substance architecturale des enveloppes touchées. La mise en œuvre d'une isolation thermique n'est pas toujours simple. Elle a souvent des conséquences sous-estimées, voire négligées sur des éléments adjacents. De nombreux détails constructifs nécessitent d'être étudiés et pris en compte. Par exemple, les cloisons de grenier, souvent présentes dans les combles, empêchent de poser simplement une isolation sur le plancher. De nombreuses conduites passent au plafond des sous-sols. Elles peuvent réduire l'épaisseur d'isolation qui peut être mise en place ou devoir être déplacées. Il est aussi judicieux de maintenir un accès aux installations. L'isolation extérieure des embrasures de fenêtre réduit le vide de l'ouverture et implique parfois le remplacement des fenêtres (cochonnet trop faible). Il est aussi nécessaire de remplacer les dispositifs d'occultation existants.



Toutes ces interventions, induites indirectement par une mesure d'isolation, doivent être anticipées. Elles représentent un coût souvent négligé lors d'une étude sommaire. La check-list, élaborée sur la base des études de cas, relève les éléments qui pourraient être concernés par la pose d'une isolation.

*Fig. 64 et 65 de gauche à droite. Les cloisons de greniers compliquent la pose d'une isolation sur la dalle des combles, tout comme les conduites sous celle du sous-sol.*

### ISOLATION DE LA TOITURE OU DU PLANCHER DES COMBLES

Il faut vérifier :

- la composition des couches et la capacité de diffusion de la vapeur (type de pare-vapeur, type de sous-toiture existante).
- la présence de cloisons de grenier.
- la présence de conduits de ventilation, de conduits de fumée, etc.
- la présence d'éléments décoratifs (moultures, stucs, etc.)
- la présence de lucarnes, coupoles, cheminées, sorties de ventilation primaire ou toute autre installation qui doivent être modifiées en cas d'isolation sur une toiture (ligne de vie, antennes, coupoles, etc.).
- la présence de cloisons dans les appartements lors de la mise en œuvre d'une isolation sous le plancher des combles (difficulté de raccorder le pare-vapeur).
- la présence des luminaires au plafond et prévoir leurs déplacements éventuels dans le cas d'une isolation sous le plancher des combles.
- le vide d'étage lors d'une isolation sous le plancher des combles.
- les difficultés de raccorder l'éventuel pare-vapeur aux chevrons et à la sablière.
- l'isolation de l'accès aux combles lors de l'isolation du plancher.
- la hauteur de la dernière marche d'escalier lors de l'isolation du plancher.
- l'ouverture de l'escalier escamotable et son isolation.
- la hauteur de l'acrotère lors d'une isolation sur la toiture.
- la pente d'évacuation des eaux de toiture (minimum 1.5%).
- l'isolation des superstructures en toiture (escalier d'accès, cage d'ascenseur)

## ISOLATION DES BALCONS OU DES TERRASSES D'ATTIQUES

Lors de l'isolation par-dessus ou sous la dalle des balcons et des attiques, il faut vérifier :

- la profondeur des loggias et balcons et leur possibilité d'usage lors de l'isolation extérieure des façades.
- à maintenir un vide d'étage suffisant.
- la hauteur du vide de maçonnerie de la porte-fenêtre lors de l'isolation du linteau ou le remplacement du seuil.
- la nécessité de modifier ou remplacer les protections solaires extérieures, par exemple les stores en toile.
- la hauteur des garde-corps (100 cm minimum ou 90 cm si largeur > 20 cm).
- la pente et l'évacuation des eaux de surface.
- l'isolation du seuil et la hauteur des remontées d'étanchéité.

## ISOLATION DES PLANCHERS SUR SOUS-SOL OU TERRAIN

Lors de l'isolation par-dessus ou sous le plancher contre les espaces non chauffés, il faut vérifier :

- le vide d'étage lors de l'isolation sous le plancher, particulièrement dans les escaliers pour éviter d'entraver l'accès au sous-sol.
- la présence de conduites au plafond des sous-sols.
- l'accès aux installations techniques.
- la présence de cloisons de caves.
- la présence des luminaires au plafond et prévoir leurs déplacements éventuels.
- l'isolation de l'accès.
- l'accès pour les personnes à mobilité réduite lors d'une isolation sur le plancher, souvent création d'une marche supplémentaire.
- la hauteur de la première marche d'escalier dans le cas d'une isolation sur dalle.
- la hauteur des contrecœurs de fenêtre lors d'une isolation sur le plancher.
- le seuil et la hauteur des portes lors d'une isolation sur le plancher.
- la nécessité d'isoler les cloisons entre les éventuelles parties chauffées et les éventuelles parties non chauffées du sous-sol.
- la possibilité de démontage de l'isolation lors de l'isolation d'abri de protection civile.

## ISOLATION DES FAÇADES

Lors du changement de fenêtres, il faut vérifier :

- la possibilité de remplacer un verre existant par un verre isolant.
- la valeur g du nouveau vitrage

Lors d'une isolation intérieure, il faut vérifier :

- les couches de construction existante (type de crépi), leur capacité de diffuser la vapeur et leur adéquation avec les solutions de rénovation proposées.
- l'impact sur les cuisines et les sanitaires situés contre les parois externes.
- la surface des pièces.
- la largeur des couloirs et des escaliers.
- le raccordement d'un éventuel pare-vapeur.
- l'isolation du caisson de store intérieur.
- la position des radiateurs et des prises et interrupteurs.
- à porter une attention particulière aux raccords autour des poutres en bois encastrees dans la façade.
- l'isolation autour du cadre de fenêtre et de l'embrasure.
- la ventilation suffisante des locaux.

Lors d'une isolation extérieure, il faut vérifier :

- dans le cas de bâtiments contigus, étudier les raccords aux bâtiments voisins.
- à respecter les distances aux limites.
- la dimension des cochenets avec le maintien des fenêtres existantes.
- à assurer un vide de jour suffisant avec l'isolation des embrasures.
- la dispositif d'occultation lors de l'isolation des embrasures de fenêtre, modification du vide de maçonnerie.
- l'isolation du caisson de store intérieur.
- la position des ferments des volets battants.
- à assurer la continuité de l'isolation aux raccords de l'avant-toit.
- la ventilation suffisante des locaux.

# LEXIQUE

**Surface de référence énergétique (SRE)** : « *total de toutes les surfaces brutes de plancher calculées au sens de la recommandation SIA 180/4 des locaux chauffés ou climatisés situés au-dessous et au-dessus du niveau du terrain.* »<sup>27</sup>

**Surface d'enveloppe développée** : surface d'enveloppe A<sup>28</sup> définie dans la norme SIA 380/1 éd. 2009 mais sans facteur de pondération. Elle comprend les « *éléments d'enveloppe constituant la limite du système prise en compte pour les transferts thermiques dans le calcul des besoins de chaleur pour le chauffage* ».

**Consommation moyenne d'énergie (énergie finale)** : moyenne des relevés de consommation d'énergie sur trois ou quatre ans selon les bâtiments entre 2009 et 2013.

**Indice de dépense de chaleur (IDC)** : consommation d'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire rapportée à la SRE et pondérée en fonction des conditions météo.

**Besoins de chauffage « relevé »** : énergie finale relevée (consommation moyenne d'énergie) moins les pertes de chaleur du système de chauffage (admis à 20 %), moins les besoins de chaleur pour l'eau chaude sanitaire Q<sub>ww</sub> (calculés selon la norme SIA 380/1 éd. 2009), par unité de surface de référence énergétique et par année.

**Besoins de chauffage « calculé » (Q<sub>h</sub>)** : « *quantité de chaleur à fournir à l'espace chauffé pour maintenir la température intérieure de consigne, par unité de surface de référence énergétique et par année.* »<sup>29</sup>

**Coût de l'ouvrage** : il se répartit selon les éléments d'intervention. Les honoraires des mandataires (admis 20 %) ont été répartis au prorata du montant total de chaque élément. Il en va de même pour les frais secondaires (5 %) et une provision (5 %). Les frais généraux comprennent le relevé, les installations et les échafaudages, les peintures nécessaires aux travaux d'assainissement énergétique, les protections et les nettoyages.

**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments** :

- façades : il s'agit des coûts de tous les éléments de façades (démolition d'éléments de parois, isolation de parois, caissons de store, stores, balcons, éléments sanitaires ou cuisines devant être modifiés, etc.) rapportés à la surface développée des façades. Les surfaces des façades enterrées intégrées au volume chauffé ont été comptabilisées.
- toiture : il s'agit des coûts de tous les éléments de toiture (isolation, démolition d'éléments existants, de cloisons, couverture, ferblanterie, isolation d'éléments de superstructure) rapportés à la surface de toiture ou de dalles des combles.
- plancher : il s'agit des coûts de tous les éléments de plancher (isolation, déplacement de conduites, démolition de cloisons, reconstruction de cloisons, modifications nécessaires de l'aménagement intérieur)

**Umes** : valeur U de l'élément mesurée in-situ selon la norme ISO 9869 (1994 et 2014).

**Ucal existant** : valeur U théorique de l'élément calculée selon la composition des couches obtenues selon des plans ou des sondages.

**Ucal rénové** : valeur U théorique de l'élément calculée selon les solutions de rénovation.

**Facteur de température superficielle minimal (fR<sub>si</sub>)** : facteur de température superficielle minimal au-dessus duquel le risque de condensation est exclu pour autant que la moyenne journalière de l'humidité relative intérieure ne dépasse pas une limite donnée.

**Pont thermique** : « *points faibles de l'enveloppe, par lesquels s'écoule localement plus de chaleur que par les éléments adjacents* »<sup>30</sup>. La perte de chaleur provoquée par ce pont thermique est exprimée par le coefficient de transmission thermique linéique (psi) en W/mK.

**Fenêtre simple** : la fenêtre est dite « simple » lorsqu'elle est composée d'un seul cadre avec un verre simple.

27 Norme SIA 380/1 éd. 2009, *L'énergie thermique dans le bâtiment.*

28 Norme SIA 380/1 éd. 2009, *L'énergie thermique dans le bâtiment.*

29 Norme SIA 380/1 éd. 2009, *L'énergie thermique dans le bâtiment.*

30 INFOMIND SARL, *Catalogue des ponts thermiques*, Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne, 2003.

- 31 ORTELLI Luca, ZURBRÜGG Pierre, WALL CAGO Catarina, ROCHE Georgine, *ReHAB – Rénovation et réhabilitation des bâtiments d’habitation du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle – Assainissement de fenêtres dans les immeubles d’habitation 1850–1920*, Laboratoire de construction et conservation (EPFL), 2012, 41.
- 32 ORTELLI [voir note 31], 49.
- 33 ORTELLI [voir note 31], 45.
- 34 GLAS TRÖSCH SA, *Le verre et ses applications*, Glas Trösch SA, Bützberg, 2002.
- 35 OFFICE FÉDÉRAL DE L’ÉNERGIE, *Fiche technique fenêtres*, Office fédéral des constructions et de la logistique, 2009.
- 36 GLAS TRÖSCH SA, [voir note 34].
- 37 OFFICE FÉDÉRAL DE LA STATISTIQUE, *Registre fédéral des bâtiments et des logements - Catalogue des caractères*, Département fédéral de l’intérieur, Neuchâtel, 2012.
- 38 OFFICE FÉDÉRAL DE LA STATISTIQUE, [voir note 38].

**Fenêtre avec contre-fenêtre** : « pour doubler la fenêtre, une première solution facile à mettre en œuvre consiste à la compléter par une deuxième fenêtre, dite contre-fenêtre, placée à l’extérieur, dans l’embrasure de l’encadrement. Le cadre de cette dernière est, la plupart du temps, amovible, ce qui offre la possibilité de démonter toute la fenêtre pendant les mois d’été. »<sup>31</sup>

**Fenêtre à caisson** : « la fenêtre à caisson ou fenêtre emboîtée est un deuxième type de double fenêtre qui, par l’ajout d’une embrasure en bois sur la face intérieure de la fenêtre, permet d’installer une deuxième fenêtre, reliée de manière fixe avec la première, pour former un seul élément. Ce type de fenêtres a surtout été utilisé en Allemagne, en Autriche et en Suisse alémanique. En Suisse romande, les fenêtres à caisson sont moins répandues, mais on trouve néanmoins encore quelques exemples originaux en bon état de conservation. »<sup>32</sup>

**Fenêtre couplée** : « une variante de double fenêtre dans laquelle les vantaux des deux fenêtres sont liés par un système de crochet afin que leur ouverture se fasse simultanément. »<sup>33</sup>

**Fenêtre avec double verre** : fenêtre avec un seul cadre comprenant deux verres simples légèrement espacés.

**Fenêtre avec verre isolant double** : fenêtre avec un cadre et un verre isolant double. « Un verre isolant est une unité de vitrage fabriquée avec deux plaques de verre ou plus, qui sont séparées les unes des autres par un intercalaire sur tout le périmètre. L’espace intercalaire est rendu étanche au gaz vis-à-vis de l’extérieur à l’aide de différents matériaux d’étanchéité et sert de liaison durable entre les plaques de verre. Le double joint sur tout le périmètre évite l’entrée de poussière et de condensation (assemblage périphérique). »<sup>34</sup>

**Fenêtre avec verre isolant triple** : fenêtre avec un cadre et un verre isolant triple [voir définition verre isolant double].

**Coefficient de transmission thermique du cadre (Uf)** : il est l’équivalent de la valeur U pour les cadres de fenêtres. « Le coefficient moyen de transmission thermique d’un cadre de fenêtre est désigné par l’abréviation Uf. Sa valeur dépend du matériau qui le compose et de la conception du profil. Pour déterminer la valeur Uf moyenne du cadre, se reporter à la norme SIA 331, annexe B. »<sup>35</sup>

**Coefficient de transmission thermique du verre (Ug)** : il est l’équivalent de la valeur U pour les vitrages isolants (norme EN 673). « Il convient de noter que la valeur Ug ne s’applique qu’à la zone dite « non perturbée », c’est-à-dire hors influence de la zone de bord (dans laquelle le flux thermique est significativement plus élevé) »<sup>36</sup>.

**Facteur solaire (g)** : il exprime la proportion d’énergie solaire qui traverse un vitrage (en % ou de 0 à 1). Plus le facteur g est élevé, plus les apports solaires passifs seront importants (donnée par le fabricant selon EN 410).

**Maisons à plusieurs logements** : « Les maisons à plusieurs logements se composent exclusivement de logements (bâtiments exclusivement à usage d’habitation, pas d’usage annexe). Une maison à plusieurs logements compte deux logements ou plus. »<sup>37</sup>

**Bâtiments d’habitation avec usage annexe** « Des bâtiments d’habitation comprenant des logements et par exemple un commerce, un atelier ou une banque au rez-de-chaussée. Des bâtiments d’habitation comprenant des logements et des cabinets médicaux ou des bureaux. »<sup>38</sup>

# BIBLIOGRAPHIE

- ACHILLES Andreas, NAVRATIL Diane, *Construire en verre*, Birkhäuser, Bâle, 2009.
- AHNERT R., KRAUSE K.H., *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 Brand I*, Verlag für Bauwesen, Berlin, 2000.
- AHNERT R., KRAUSE K.H., *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 Brand II*, Verlag für Bauwesen, Berlin, 2001.
- AHNERT R., KRAUSE K.H., *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 Brand III*, Verlag für Bauwesen, Berlin, 2002.
- ASSOCIATION SUISSE DES FABRICANTS DE BRIQUES ET TUILES, « La maçonnerie », *Element*, Association suisse des fabricants de briques et de tuiles, Faktor Verlag, Zürich, 3 (1960).
- ASSOCIATION SUISSE DES FABRICANTS DE BRIQUES ET TUILES, « Murs et ouvertures », *Element*, Association suisse des fabricants de briques et de tuiles, Faktor Verlag, Zürich, 5 (1962).
- ASSOCIATION SUISSE DES PROFESSIONNELS DU BÉTON PRÉFABRIQUÉ, *La façade préfabriquée en béton*, Association Suisse des Professionnels du Béton Préfabriqué, Pfäffikon, 1985.
- BERNSTEIN, Daniel, CHAMPETIER, Jean-Pierre, VIDAL, Thierry, *Anatomie de l'enveloppe des bâtiments*, Le Moniteur, Paris, 1997.
- BINZ Armin, ERB Markus, LEHMANN Gerold, *Ökologische Nachhaltigkeit im Wohnungsbau*, Office fédéral de l'énergie, 2000.
- BUSSET, Thomas, GARNIER, Alain, JOYE, Dominique, SCHULER, Martin, *Une typologie exploratoire des bâtiments*, Institut de recherche sur l'environnement construit (école polytechnique de Lausanne), 1990.
- BUSSET Thomas, ROULET Barbara, SCHULER Martin, *La constitution du parc immobilier suisse - approche typologique de l'habitat*, institut de recherche sur l'environnement construit (école polytechnique de Lausanne), 1994.
- CLEMENS Richarz, SCHULZ Christina, ZEITLER Friedemann, « Energetische Sanierung », *Détail*, Institut für internationale Architektur-Dokumentation GMBH, München, 2006.
- DÉPARTEMENT DES CONSTRUCTIONS ET DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION DU CANTON DE GENÈVE, *Logements économiques à Genève construits entre 1920-1960*, DAEL, Genève, 2007.
- DÉPARTEMENT FÉDÉRAL DE L'INTÉRIEUR, *Registre fédéral des bâtiments et des logements : catalogue des caractères*, office fédéral de la statistique, Neuchâtel 2012.
- GAUTHIER Franck, « Poutres encastrées et isolation par l'intérieur », *Qualité construction*, N° 142 (2014).
- GIEBLER Georg, FISCH Rainer, KRAUSE Harald, MUSSO Florian, PETZINKA Karl-Heinz, RUDOLPHI Alexander, *Rénover le bâti*, Les Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012.
- GLAS TRÖSCH SA, *Le verre et ses applications*, Glas Trösch SA, Bützberg, 2002.
- HINDEN Reto, *De la construction en brique massive - Le cas du logement urbain*, EPFL, ENAC, 2007.
- INFOMIND SÀRL, *Catalogue des ponts thermiques*, Office fédéral de l'énergie, Berne, 2003.
- KHOURY Jad, *Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs : état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois*, In: Soutenance de thèse de doctorat, Genève, 2014.

MARCHAND Bruno, SAVOYAT Marielle, CHENU Laurent, *Architecture du canton de Vaud 1920–1975*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2012.

MARTI Kurt, *Catalogue d'éléments de construction avec calcul de la valeur U: assainissement*, Office fédéral de l'énergie, 2002.

ORTELLI Luca, ZURBRÜGG Pierre, WALL GAGO Catarina, ROCH Georgine, *ReHAB: Rénovation et réhabilitation des bâtiments d'habitation du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles*, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2012.

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE, *Fiche technique fenêtres*, Office fédéral des constructions et de la logistique, 2009.

PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS, « Evaluation des risques de pathologies liées à l'humidité », *Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012*, AQC, 2013.

RICHTLINIE ENERGIEEFFIZIENZ AM BAUDENKMAL, *The 3Encult Project*, Bundesdenkmalamt, Austria, 2011.

SCHEFFLER Gregor A., « Diffusionsoffene Innendämmung macht Schule », *Forschung & Innovation*, Bauplaner, 12 (2010), 2–6.

SCHWEHR Peter, FISCHER Robert, *Building Typology and Morphology of Swiss Multi-Family Homes*, Hochschule Luzern, January 2010.

SIGRIST Donald, KESSLER Stefan, *Effets des lois cantonales sur l'énergie: analyse de l'efficacité conformément à l'art. 20 LEne, actualisation pour l'année 2012*, Office fédéral de l'énergie, Ittigen, juillet 2013.

SOCIÉTÉ DE COMMUNICATION DE L'HABITAT SOCIAL, *Habitation: revue trimestrielle romande de l'Association Suisse pour l'habitat*, Société de communication de l'habitat social, 1 (1928) à 63 (1990).

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES, *L'énergie thermique dans le bâtiment – Guide d'utilisation de la norme SIA 380/1*, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 2002.

SUISSE ÉNERGIE, *Mieux isoler les sous-sol*, Services de l'énergie des cantons de Suisse et de la principauté du Liechtenstein, Energie Suisse, Office fédéral de l'énergie, 2002.

# ABSTRACT

## METHODEN UND WERKZEUGE FÜR DIE ENERGETISCHE SANIERUNG DER GEBÄUDEHÜLLE

Die energetische Sanierung des Wohnungsbestands ist ein wesentliches Ziel der Energiestrategie 2050 des Bundes. Trotz der politischen Absichten, bleibt die Zahl der energetischen Sanierungen relativ gering und daran scheint sich auch in Zukunft nichts zu ändern. Wesentliche Hindernisse sind die Baukosten, der niedrige Energiepreis, technische Schwierigkeiten, denkmalpflegerische Aspekte, die Verfügbarkeit qualifizierter Fachleute oder die aktuelle Wohnungsnot.

Einzelmaßnahmen ohne ein Gesamtkonzept sind die Regel. Realisierte Gesamtmaßnahmen beschränken sich oft auf die Erneuerung der Haustechnik, den Austausch der Fenster und ein Wärmedämmverbundsystem. Diese energetisch vielleicht sinnvollen Maßnahmen sind oft fraglich in baukonstruktiver, denkmalpflegerischer, bauphysikalischer und nachhaltiger Hinsicht. Die typologische Vielfalt im Gebäudebestand verlangt Lösungen, die die architektonischen und konstruktiven Eigenarten des Gebäudes berücksichtigen.

Ren basiert auf einem globalen und interdisziplinären Ansatz für die energetische Sanierung der Gebäudehülle und sucht ein Gleichgewicht zwischen Energieeffizienz, konstruktiven und bauphysikalischen Aspekten, Wirtschaftlichkeit, Nutzen und Verlusten und baukulturellem Wert.

Mit Fallstudien typischer Mehrfamilienhäuser der Westschweiz werden die Möglichkeiten und Grenzen einer energetischen Sanierung der Gebäudehülle aufgezeigt und ein Hilfsmittel für zukünftige Gebäudesanierungen zur Verfügung gestellt. Die Studie richtet sich an Eigentümer und Gebäudeverwalter, Baufachleute und die betroffenen Behörden.

Baukonstruktive Merkmale von Mehrfamilienhäusern der Westschweiz zwischen 1900 und 1990 wurden erfasst und fünf charakteristische Bauepochen definiert: Vorkriegszeit (1900–1920), Zwischen-den-Weltkriegen (1921–1945), Nachkriegszeit (1946–1960), Hochkonjunktur (1961–1975) und nach der Ölkrise (1975–1990); Zeitraum, indem das Bewusstsein um die Endlichkeit der Energieressourcen geweckt und erste Empfehlungen und gesetzliche Regelungen zur Energieeinsparung formuliert wurden.

Jede dieser Bauepochen verfügt über charakteristische architektonische und konstruktive Merkmale. Fünfzehn Typologien (Modelle), repräsentativ für den Westschweizer Wohnungsbau des 20. Jahrhunderts, wurden definiert. Jede Typologie ist unterschiedlich und verdient einen respektvollen Umgang mit dem Bestand. Jeder Eingriff in den Gebäudebestand (selbst banal) muss auch unter baukulturellen Aspekten betrachtet werden. Jedes noch so gewöhnliche Gebäude trägt seinen Teil zur Identität und Stadtgeschichte bei und nicht ausreichend durchdachte Lösungen können Ursache vieler Probleme sein.

Zehn repräsentative Gebäude der häufigsten Typologien wurden für eine Fallstudie ausgewählt und eine umfassende Bestandsanalyse und eine globale Sanierungsstrategie für jeden Fall entwickelt:

- Wesensmerkmale wahren
- Wesensmerkmale rekonstruieren
- Neue Elemente oder ein neues Erscheinungsbild

Um der gewählten Strategie zu folgen und gleichzeitig den energetischen Zielsetzungen der SIA-Norm 380/1 (2009) zu genügen, wurden mehrere Szenarien pro Fall untersucht. Jedes Szenario wurde in thermischer und hygrometrischer Hinsicht geprüft. Durch ein kontinuierliches Wechselspiel zwischen Architekten und Bauphysikern konnte für jedes der 10 Fallbeispiele eine den definierten Kriterien entsprechende Lösung aufgezeigt werden (siehe oben). Die Baukosten wurden für jedes Szenario berechnet um auch die wirtschaftlichen Aspekte miteinzubeziehen.

In allen Fallstudien konnten die normativen Anforderungen erfüllt und der architektonische Charakter, soweit erforderlich, gewahrt werden; bei mit herkömmlichen Lösungen vergleichbaren Baukosten. Ein respektvoller Umgang mit dem Gebäudebestand und eine energetische Gebäudesanierung im Kostenrahmen sind also kein Ding der Unmöglichkeit. Dieses Ergebnis konnte nur dank einer intensiven Zusammenarbeit verschiedener Fachleute erreicht werden und einem Planungsaufwand, in den Gebäudeeigentümer oft nicht investieren; obwohl dieser nur einen relativ geringen Teil der Gesamtbaukosten ausmacht.

Die Studie zeigt allerdings auch, dass die Kosten einer energetischen Sanierung der Ge-

bäudehülle im Vergleich zu den zu erwartenden Einsparungen durch den gesenkten Energieverbrauch bei den aktuellen Energiekosten sehr hoch sind.

Auch wenn die energetische Sanierung häufig Teil einer Gesamtaufwertung des Gebäudes ist (aufgrund von Bauschäden, Überalterung, Aufwertung ungenutzter Potenziale), fehlen in vielen Fällen, in denen ein Gebäude regelmäßig unterhalten wurde oder die Möglichkeiten einer Mieterhöhung beschränkt sind, ökonomische Anreize für eine energetische Sanierung.

Die Verpflichtung die strengen Auflagen der SIA-Norm 380/1 (2009) bei einer Gebäudesanierung einzuhalten, kann sogar den gegensätzlichen Effekt haben und Eigentümer entmutigen energetische Maßnahmen zu ergreifen, die bei geringen Kosten die Situation verbessern ohne den gesetzlichen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Verschärfung der Zielwerte für die Gebäudesanierung, die mit der Revision der Norm in 2009 begonnen hat und wie es aussieht weiterverfolgt wird, könnte die Diskrepanz zwischen lobenswerten Absichten und realer Sanierungsrate noch verstärken.

Eine gesetzliche Regelung, die die energetische Sanierung der Gebäudehülle kurz- oder längerfristig verpflichtend vorschreibt, würde sehr hohe Kosten bedeuten, die sehr viele Eigentümer aufgrund unzureichender Sanierungsfonds nicht aufbringen können. Diese Herausforderung betrifft im übrigen auch öffentliche Bauherren. Man kommt nicht umhin festzustellen, dass es bei einer derart großen Aufgabe selbst an Auftragnehmern und qualifizierten Fachfirmen mangeln wird.

Diese Schlussfolgerungen scheinen sehr negativ. Allerdings nur, wenn man tatenlos zusieht. Wir sind überzeugt, dass durchaus Möglichkeiten bestehen um dem Ziel ein Stück näher zu kommen:

- Die Gesetzgebung und Gebäudelabels, die bisher im Wesentlichen auf Neubauten ausgerichtet waren, müssen verstärkt die Besonderheiten der Sanierung des Gebäudebestands und seiner Grenzen berücksichtigen. (Die im Projekt eRen erarbeiteten Hilfsmittel sind hier ein erster Schritt).
- Informationen, Anreize und Auflagen müssen auf einer langfristigen Sichtweise basieren, um der Lebensdauer der Gebäude gerecht zu werden. Der Einbezug von Spezialisten verschiedener Fachbereiche und die Berücksichtigung der Besonderheiten des schweizerischen politischen Systems sind notwendig um Fehlschläge zu vermeiden.
- Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten für Fachleute, Unternehmen, Lehrlinge und Studenten in diesem Bereich müssen verstärkt werden, um in Zukunft über ausreichend qualifizierte Fachleute für anspruchsvolle Sanierungen zu verfügen.

Der Einsatz lohnt sich. Und wie dem auch sein, haben wir eine Wahl?

## METHODS AND TOOLS FOR ENERGY-EFFICIENT RETROFITTING OF BUILDING ENVELOPE

The energy refurbishment of housing is a key issue of the Swiss government's « 2050 Energetic strategy ». However, despite the pressure imposed by politicians, the energy refurbishment rate remains low today and does not seem to improve. High labour costs, low energy prices, technical complexities, heritage issues, lack of qualified professionals and contractors together with the current housing shortage can be identified as the main reasons for this problem.

Partial interventions without a global overview are usually carried out and when a project is aiming at an overall refurbishment, it is often limited to the replacement of the M&E equipment, to the windows and to a perimeter insulation of the walls. Maybe these solutions provide answers on the energy issue, but as far as the architecture, heritage preservation, construction and the buildings' physical appearance goes, they tend to lack pertinence. The diversity of existing building typologies requires specific solutions that take into account their architectural and constructive characteristics.

eREN is focusing on the envelope of existing housing in Western Switzerland and is based on a global and interdisciplinary approach aiming at achieving well-balanced solutions between energy efficiency, constructive feasibility, building physics, cost and preservation of the architectural heritage.

The eREN project proposes tools and a framework available to all stakeholders to help them developing refurbishment projects efficiently, taking into account all the above aspects. It is intended for owners, real estate agents, professional teams, contractors and public services in charge of the related issues.

Housing production between 1900 and 1990 has been divided in five different periods: pre World War I period (1900 – 1920), Interwar period (1921 – 1945), post World War II period (1946 – 1960), the boom period (1961 – 1975) and post oil shock period (1975 – 1990), marked by the growing awareness of the energy consumption issue and the first energy standards in the construction industry.

Each of these periods has its own architectural and construction specifications. Fifteen models have been retained covering the different ways of building collective housing during these periods. All of them deserve respect, because applying changes to an existing building (even an ordinary one) implies cultural and heritage issues. The ordinary housing stock plays its part in forming the city's identity and insufficiently developed solutions can be the root of numerous problems.

Ten multi-dwelling buildings characteristic of the most common constructive typologies have been selected and used as case studies. Their current state has been analysed and in a second stage, a general strategy has been decided for each of them:

- Maintaining the envelope typical features
- Rebuilding the envelope typical features
- Adding new features or changing the image of the envelope

Refurbishment scenarios have been developed for the ten study cases responding to the chosen strategy and checked against the legal requirement based on the Swiss energy standard SIA 380/1 (2009).

The scenarios have been through an iterative process by the team's architects and engineers which eventually resulted in solutions satisfying both the energy requirements and the other criteria set above: architectural identity, construction feasibility, building physics and cost.

In every case a scenario could be elaborated that complies with the legal requirements of SIA 380/1 (2009) at a cost comparable to more standard solutions, like rendered perimeter insulation. Energetic refurbishment that respects the architecture of the building envelope is possible and at reasonable cost. This result was obtained thanks to an intense collaboration between the various specialists working on the project, which implies an investment that many owners do not want to consider, although it only amounts to a low fraction of the total cost.

Not surprisingly, the project also demonstrates that the price one pays for an energetic refurbishment is high, against those savings that one could expect on their energy bill, going by today's rates.

It's true that the energy refurbishments are often included in wider projects directed at upgrading a building that requires work anyway, to solve hygiene or obsolescence issues, or that increases opportunities to gain surfaces to rent. Nevertheless, in many other cases where the building has been well maintained and the perspective of reviewing the rents are distant for various reasons, an energy refurbishment is not on the agenda due

to a lack of economic incentive to undertake such projects.

Worse still, the requirement to achieve the SIA 380/1 (2009) standard strict values in the field of refurbishment, could have a perverse outcome, discourage or even prevent owners from undertaking projects that could enable them to achieve a high percentage of the targeted energy savings and at a reasonable cost, for fear that their work may not meet 100% of the stated legal requirements. Since the last revision of the standards in 2009, it appears that the requirements will get harder and harder to achieve which could further broaden the gap.

Finally, making energy refurbishment compulsory in the short to medium term, would imply a financial burden that many owners could not afford. The public authorities face the same challenge. On top of that, the professionals and the specialised contractors available on the market to date, would be totally overwhelmed by the magnitude of the task.

At first sight, these conclusions look like a bleak prospect. They are, if we give up and make no effort to take a step further. Solutions do exist to change the direction of things:

- Regulation and private energy standards have been primarily focused on new constructions. They must consider existing buildings as a real field in its own with its specific rules and limits (the tools developed within eREN are a first step in this direction).
- Information, incentives, legal obligations have to be coordinated in the long term, at the scale of a building's life expectancy which is counted in decades, employing specialists from different fields and taking into account the Swiss political system's specificities will also help avoiding many pitfalls.
- An effort is to be made in training the professionals, contractors, students and apprentices, in order to put on the market qualified people, able to take the challenge of the energy refurbishment.

The challenge is worth it, and anyway do we have the choice?

## REMERCIEMENTS À:

Nous remercions les propriétaires et les gérants ci-dessous pour nous avoir mis à disposition les bâtiments ayant servi de cas d'étude.

Fondations Immobilières de Droit Public, CH-1205 Genève.

Gérances foncières SA, CH-1705 Fribourg.

Fondation de placement immobilier Lithos, CH-1211 Genève.

Retraites populaires, CH-1001 Lausanne.

# Hes·SO

Haute Ecole Spécialisée  
de Suisse occidentale

Fachhochschule Westschweiz

L'assainissement énergétique des immeubles d'habitation est un enjeu majeur de la stratégie énergétique 2050 de la Confédération suisse. Malgré la volonté politique, le taux de rénovation énergétique reste relativement limité et le rythme ne semble pas s'accélérer. Parmi les obstacles le coût des travaux, le faible prix de l'énergie, les difficultés techniques, les questions patrimoniales, la disponibilité spécialistes qualifiés, ou la pénurie de logements.

Les interventions ponctuelles sans vision d'ensemble sont la norme. Lorsqu'un projet complet est mené à bien, il se résume souvent à une mise à jour des installations techniques, un remplacement des fenêtres et une isolation périphérique. Ces solutions peut-être valables sur le plan énergétique posent souvent des questions constructives, patrimoniales, de physique du bâtiment ou encore de durabilité.

eREN a mené un travail sur l'enveloppe des bâtiments basé sur une approche globale et interdisciplinaire cherchant le meilleur équilibre entre efficacité énergétique, aspects constructifs et de physique du bâtiment, économie, co-bénéfices et co-pertes et valeur patrimoniale.



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg  
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie  
et d'architecture de Genève

heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion  
du Canton de Vaud

Hes·SO VALAIS  
WALLIS

Haute Ecole d'Ingénierie  
Hochschule für Ingenieurwissenschaften



Situation 1: 2'000

0 5 120

<b>Année de construction</b>	1901
<b>Surface bâtie [m<sup>2</sup>]</b>	285
<b>Nombre de logements</b>	18
<b>Surface référence énergétique (SRE) [m<sup>2</sup>]</b>	2'072
<b>Surface d'enveloppe développée [m<sup>2</sup>]</b>	1'406
<b>Facteur de forme</b>	0.81
<b>Consommation moyenne d'énergie [kWh/an]</b>	222'344

**Besoins de chauffage « relevé » [MJ/m<sup>2</sup>]** 243

**Besoins de chauffage « calculé » [MJ/m<sup>2</sup>]** 285

**Production de chaleur**  
Chaudière à gaz

**Distribution de chaleur**  
Radiateur avec vannes thermostatiques

**toiture**

en pente, couverture en tuiles terre cuite et cuivre, isolée

**mur de refend**

Pierre calcaire massive

**espaces extérieurs**

balcons linéaires ou ponctuels, posés sur consoles en pierre massive

**éléments décoratifs**

Pierre calcaire

**fenêtres**

cadres en bois, simple vitrage

**dalle d'étage**

plancher bois

**corniche**

Pierre calcaire

**façade rez-de-chaussée**

vitrines cadres métalliques, double vitrage

**dalle sur sous-sol**

dalle à hourdis

*Extrait de la façade est.*

## CARACTÉRISTIQUES

Ce bâtiment est très représentatif des immeubles genevois des années fin 1800, début 1900. Il est situé au centre-ville de Genève, en contiguïté avec un immeuble de logements et un théâtre. Le rez-de-chaussée accueille des surfaces commerciales, alors que les cinq étages sont consacrés au logement. La toiture en pente asymétrique abrite encore deux niveaux de combles, également habités. Caractéristique des immeubles de son époque, ce bâtiment présente deux façades d'aspect différent sur rue et sur cour: la façade sur rue est richement décorée (revêtement en pierre naturelle, balcons sur consoles, corniches et moulures) alors que la façade sur cour est beaucoup plus sobre et dépouillée (seuls des encadrements en pierre calcaire soulignent le contour des fenêtres, pour le reste, la façade est simplement crépie).

La structure du bâtiment est simple: les façades ainsi qu'un massif porteur au centre du bâtiment soutiennent un plancher traditionnel à solivage en bois. Datant du début du XX<sup>e</sup> siècle, ce bâtiment a déjà subi de nombreuses interventions successives (installations sanitaires et cuisines, réaménagement des combles, toiture, chauffage, etc.) qui n'ont pourtant pas porté préjudice à l'apparence globale de l'ouvrage.



### Mur de façade ouest (cour)

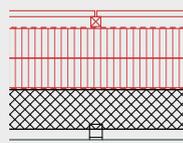
U<sub>mes</sub>: 1.30 W/m<sup>2</sup>K (15%)  
Ucal existant: 0.93 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.12 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 270 mm
- . Mur moellons
- . Lattage
- . Panneau de bois

### Toiture commerce

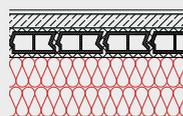
Ucal existant: 0.6 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.1 W/m<sup>2</sup>K



- . Revêtement
- . Étanchéité
- . Isolation 300 mm
- . Barrière-vapeur
- . Dalle béton
- . Plafond suspendu

### Dalle rez-de-chaussée

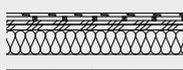
Ucal existant: 1.78 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.11 W/m<sup>2</sup>K



- . Carrelage sur chape
- . Dalle à hourdis
- . Isolation 300 mm

### Toiture

Ucal existant: 0.5 W/m<sup>2</sup>K



- . Tuiles terre cuite
- . Lattage et contre-lattage
- . Isolation et pare-vapeur
- . Lattage et lambris

### Fenêtres est (sur rue)

U<sub>verre</sub> existant: 6 W/m<sup>2</sup>K  
U<sub>cadre</sub> existant: 3 W/m<sup>2</sup>K  
g existant: 0.92  
U<sub>verre</sub> rénové: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
U<sub>cadre</sub> rénové: 3.0 W/m<sup>2</sup>K  
g rénové: 0.6

- . Cadres bois (chêne)
- . Verre simple
- . Cadres bois (chêne)
- . Verre isolant double

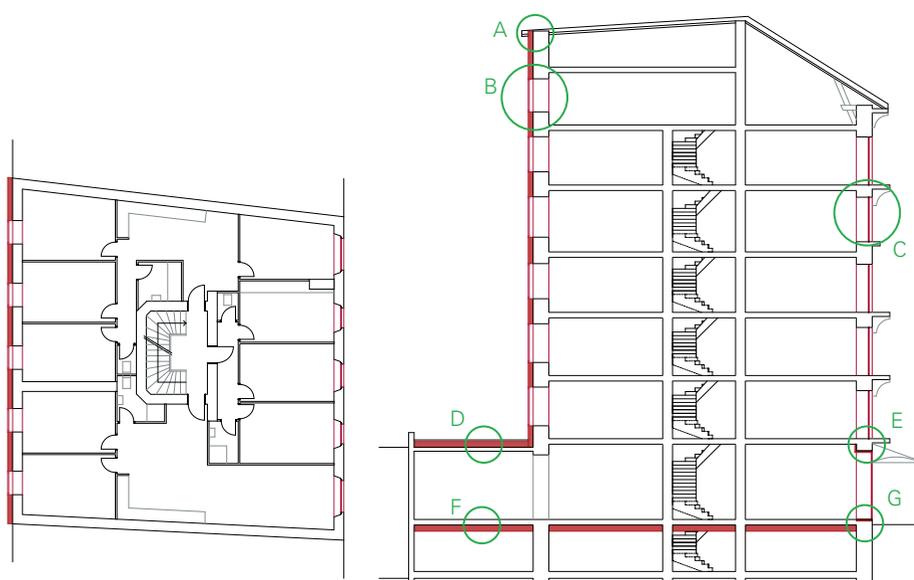
### Fenêtres ouest (sur cour)

existantes, idem que celles sur rue  
U<sub>verre</sub> rénové: 0.6 W/m<sup>2</sup>K  
U<sub>cadre</sub> rénové: 1.2 W/m<sup>2</sup>K  
g rénové: 0.45

- . Cadres bois (chêne)
- . Cadres bois-métal
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION

L'intervention proposée tient compte des spécificités architecturales des deux façades, en particulier du caractère patrimonial de la façade sur rue qui doit être préservé, alors que la façade sur cour ne présente pas d'intérêt particulier. C'est pourquoi on a opté pour une stratégie d'intervention très différente des deux côtés : en façade sur rue, seules les fenêtres feront l'objet d'un assainissement (sur-cadre et mise en place d'un verre isolant double en conservant les menuiseries d'origine) alors que l'intervention sera plus importante côté cour, à titre de compensation (pose d'une isolation périphérique et remplacement des fenêtres). La dalle du rez-de-chaussée est isolée par en-dessous pour assurer la continuité de l'enveloppe thermique. La toiture du bâtiment, récemment assainie, ne subit aucun changement, au contraire de la toiture plate de la cour qui est isolée. Finalement, la partie du pignon sud en contact avec l'extérieur est isolée périphériquement.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°1. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Façade ouest (cour):** elle constitue le point principal d'intervention, en compensation des mesures légères mises en œuvre sur la façade est (rue): pose d'une isolation périphérique crépie, remplacement des fenêtres. Les volets sont remplacés par des stores.

**Façade est (rue):** mise en place d'un sur-cadre et d'un verre isolant double.

**Toiture magasin:** il est prévu d'assainir la toiture plate de la cour. Un nouveau complexe d'isolation et d'étanchéité est mis en œuvre, ainsi que le remplacement complet des verrières. Cette intervention doit se faire en prenant garde aux épaisseurs d'isolants qui modifient les hauteurs d'éléments tels les seuils de porte.

**Toiture:** la toiture du bâtiment, pour partie en tuiles et partie en cuivre ne présente que peu de signes de vétusté (assainissement et isolation fait récemment) et ne fait l'objet d'aucune intervention.

**Pignon sud:** la partie du pignon sud, non contigüe au bâtiment voisin, est isolée par l'extérieur.



Façade ouest sur cour



Toiture des commerces



Toiture du bâtiment

## DÉTAILS

**A** En façade ouest (sur cour), il est prévu de mettre en place une isolation de type EPS, directement sur la façade existante. Sur cette nouvelle isolation prend place un crépi clair qui permet à la façade de conserver son caractère d'origine.

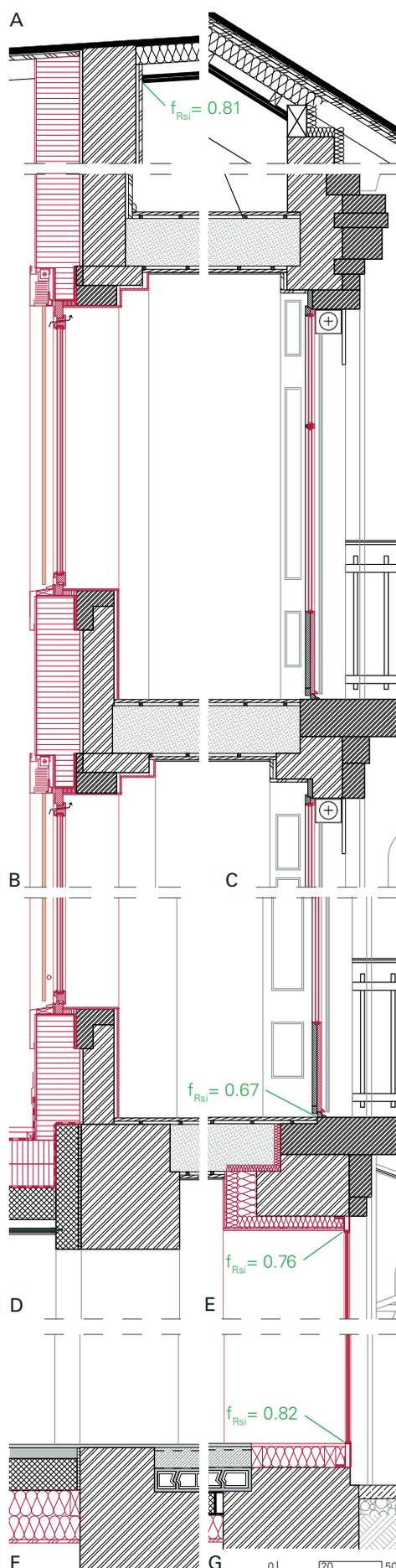
**B** Les anciennes fenêtres en bois, de même que les boiseries intérieures sont déposées afin de permettre la mise en place de nouvelles fenêtres à cadres bois-métal. Une grille hygro-réglable permet de gérer le renouvellement d'air réduit par la nouvelle enveloppe plus étanche. Une fois les fenêtres posées, les boiseries intérieures sont reconstituées. Les anciens encadrements en pierre calcaire sont réinterprétés en tôle aluminium thermolaquée.

**C** En façade est (sur rue), l'intervention propose de préserver au mieux ses qualités architecturales et décoratives. On ajoute aux cadres de fenêtres d'origine en chêne un sur-cadre de la même essence qui permet de remplacer le verre simple existant par un verre isolant double. Les ferrures devraient être changées si elles ne supportent pas le nouveau poids de la fenêtre. Seule l'épaisseur totale du cadre est modifiée, les autres caractéristiques de la fenêtre et de la façade sont conservées. Une solution alternative consistant à mettre en place un vitrage sous vide hautement performant aurait également permis de conserver les cadres existants.

**D** La proposition d'intervention prévoit l'assainissement complet de la toiture plate sur les commerces dans la cour intérieure car elle représente un poste important en terme de perte énergétique. La dalle est mise à nu et un nouveau complexe d'isolation et d'étanchéité bitumineuse est mis en œuvre sur la dalle. Les verrières désuètes sont remplacées. Une attention particulière est portée à la hauteur des seuils de portes et des garde-corps.

**E-G** Au rez-de-chaussée, de nouvelles vitrines commerciales à verre isolant triple prennent place dans une embrasure augmentée par la suppression du muret en pierre existant.

**F** Le plafond de la dalle à hourdis sur sous-sol est isolé par 30 centimètres d'isolation de polystyrène expansé. Des retours d'isolation sont prévus à la rencontre des murs porteurs ou des cloisons.



### Toiture

- . Couverture cuivre
- . Lambrissage de support 20 mm
- . Isolation entre chevrons 120 mm
- . Lattage 80 mm
- . Lambris de finition 20 mm

### Façade ouest (cour)

- . Crépi minéral (teinte claire), 10 mm
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 270 mm
- . Crépi minéral 10 mm
- . Mur à moellons 450-650 mm
- . Lattage de support 40 mm
- . Panneau de bois de finition 25 mm

### Façade pignon (sud)

- . Crépi minéral (teinte claire), 10 mm
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 100 mm
- . Crépi minéral 10 mm
- . Mur à moellons 450-650 mm
- . Lattage de support 40 mm
- . Panneau de bois de finition 25 mm

### Façade est (rue)

- . Revêtement pierre calcaire 140 mm
- . Mur à moellons 450-650 mm
- . Lattage de support 40 mm
- . Panneau bois de finition 25 mm

### Plancher étage courant

- . Parquet 20 mm
- . Lattage 20 mm
- . Chaille entre solivage 300 mm
- . Lattage 20 mm
- . Lattis bois plâtre 20 mm
- . Enduit de finition 10 mm

### Toiture commerces

- . Dalles béton sur taquets 30 mm
- . Etanchéité bitumineuse multicouche
- . Isolation polystyrène extrudé,  $\lambda = 0.033 \text{ W/mK}$ , 300 mm
- . Barrière-vapeur
- . Dalle béton 200 mm
- . Plafond suspendu 20 mm
- . Enduit de finition 10 mm

### Linteau dans zone commerciale

- . Revêtement pierre calcaire 140 mm
- . Mur à moellons 400 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 190 mm entre lattage
- . Pare-vapeur
- . Panneau de plâtre gypsé 30 mm

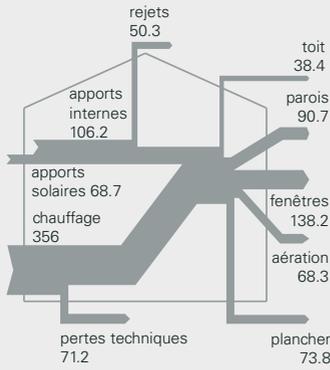
### Dalle du rez-de-chaussée (partie sous la cour)

- . Carrelage 10 mm
- . Chape ciment 70 mm
- . Dalle béton armé 200 mm
- . Isolation laine minérale entre ossature bois,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 300 mm
- . Panneau de bois 10 mm

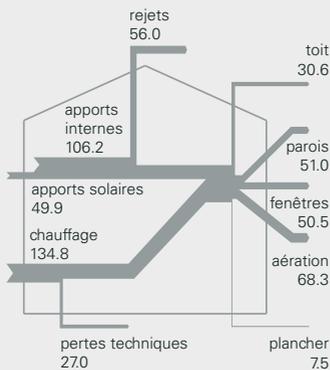
### Dalle du rez-de-chaussée

- . Carrelage 10 mm
- . Chape ciment 70 mm
- . Dalle à hourdis pierre 210 mm
- . Isolation laine minérale entre ossature bois,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 300 mm
- . Panneau de bois 10 mm

Extrait des coupes façade rue et cour présentant les propositions d'intervention du scénario 1.

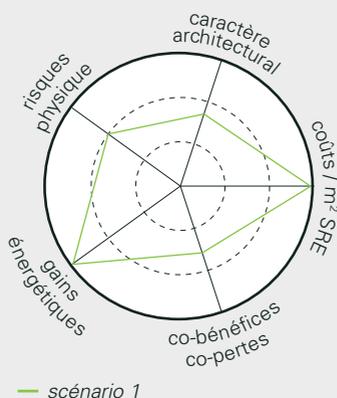


EXISTANT Diagramme de Sankey en [MJ/m²]. La valeur limite SIA 380/1 est de 112.8 MJ/m² et les besoins de chauffage sont de 284.8 MJ/m².



SCÉNARIO 1 Diagramme de Sankey en [MJ/m²]. La valeur limite SIA 380/1 est de 112.8 MJ/m² et les besoins de chauffage sont de 107.9 MJ/m².

Part des pertes par les ponts thermiques : 8.7 % (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



ÉVALUATION du scénario. Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

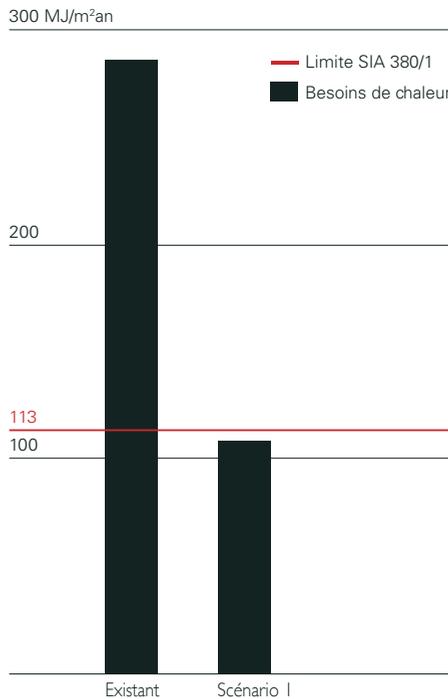
**Coûts totaux (T.T.C.):**  
Scénario 1: 1'155'000 CHF

**Coût / m² de SRE (T.T.C.):**  
Scénario 1: 555 CHF

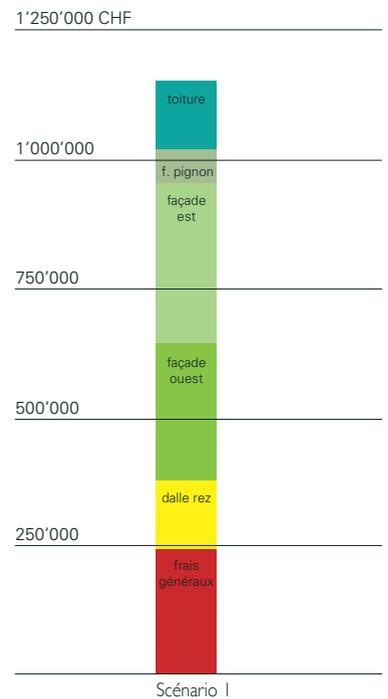
**Coût / m² d'éléments (T.T.C.):**  
Toiture: 1'130 CHF  
Façades et fenêtres: 825 CHF  
Dalle sur espace non-chauffé: 330 CHF

## LE SCÉNARIO

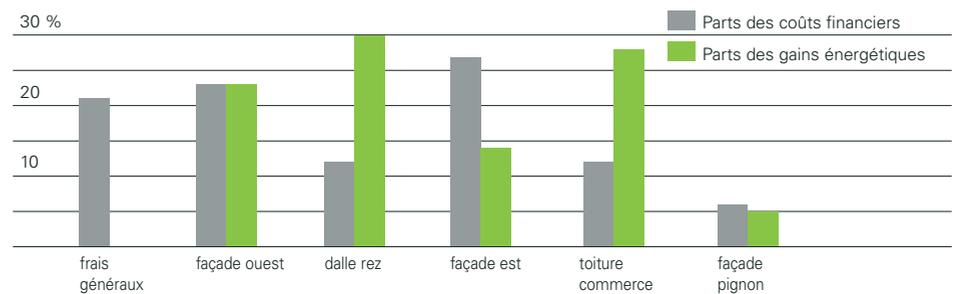
Scénario 1: il intègre l'isolation périphérique et le remplacement des fenêtres en façade ouest, le doublage des cadres de fenêtres en façade est et l'ajout d'un verre isolant double, l'isolation sous dalle du rez-de-chaussée et enfin l'assainissement complet de la toiture de la cour et le remplacement des verrières existantes pour permettre d'atteindre la valeur-limite. Il apporte un gain énergétique de 176.9 MJ/m², soit 62%.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et du scénario.



Graphique des coûts financiers du scénario répartis par éléments.



Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention pour le scénario 1.

## CONCLUSION

Les caractéristiques architecturales et décoratives de la façade sur rue peuvent être maintenues (le remplacement du verre simple par un verre isolant double n'implique que l'épaississement des cadres ainsi que la perte des «vibrations» provoquées par les irrégularités des verres anciens). La stratégie globale d'intervention offre une continuité d'approche avec l'architecture même de ce type d'immeubles bourgeois du XIX<sup>e</sup> et début XX<sup>e</sup> siècle qui différenciait nettement le traitement des deux façades sur rue et sur cour. Dans le cas présent, on note toutefois une difficulté de mise en oeuvre des mesures d'isolation du pignon sud, liée à la géométrie tourmentée des raccords au théâtre voisin.

## CARACTÉRISTIQUES

L'immeuble, implanté au centre-ville de Lausanne, termine un ensemble de quatre bâtiments accolés en forme de U. Il est recensé (note 3), mais pas protégé. L'immeuble d'angle comporte un appendice saillant qui tient de l'oriel. Assis sur un socle de maçonnerie en moellons ébauchés, il s'élève sur cinq étages. Au cinquième étage, la toiture à la Mansart accueille trois appartements. Du côté de la rue principale, le langage architectural classique est à la fois sobre et décoré. Les ouvertures sont composées d'encadrements en pierre naturelle, parfois reliées verticalement pour rythmer la façade. Du côté cour, l'expression architecturale apparaît plus simple et dépouillée. Les fenêtres à caisson d'origine avec leurs cadres en bois et leurs verres simples sont encore présentes dans quelques appartements. Le travail sur les embrasures intérieures en bois démontre un soin du détail. Des volets en bois permettent d'obscurcir les ouvertures de taille modeste. Les façades monolithiques sont construites en maçonnerie de moellons crépie et leur épaisseur varie de 50 à 60 centimètres selon les étages. Ses balcons en saillie animent les façades nord et est. Leur dalle en ciment est posée sur des consoles moulurées en pierre naturelle. Des fers forgés servent de garde-corps. La dalle sur sous-sol en ciment est composée de poutres nervurées tandis que les planchers des étages et des combles sont construits avec des poutres en bois enchâssées dans les façades et reposant sur un mur de refend.



Situation 1: 2'000

0 5 120

Année de construction	1910
Surface bâtie [m <sup>2</sup> ]	258
Nombre de logements	17
Surface référence énergétique (SRE) [m <sup>2</sup> ]	1'563
Surface d'enveloppe développée [m <sup>2</sup> ]	1'659
Facteur de forme	0.99
Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]	241'800
Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	370
Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	426
Production de chaleur	Chaudière à mazout
Distribution de chaleur	Radiateurs sans vannes thermostatiques

### toiture

mansardée, en tuiles

### balustrade

fer forgé

### protection solaire

volets en bois

### balcons

dalle béton posée sur des consoles en pierre naturelle

### embrasure

pierre naturelle

### dalle d'étage

plancher avec poutres en bois

### fenêtre

cadre bois, fenêtre avec contre-fenêtre

### mur de façade

maçonnerie de moellons crépie de 50 à 60 cm d'épaisseur diminuant avec l'élévation des étages

### socle

maçonnerie de moellons apparents

Extrait de la façade est.

### Mur de façade

U<sub>mes</sub>: 1.75 W/m<sup>2</sup>K (±14%)  
 Ucal existant: 1.70 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové sc. 1: 0.74 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové sc. 2: 0.41 W/m<sup>2</sup>K



- . Crépi isolant minéral 20 mm
- . Maçonnerie de moellons 550 mm
- . Isolation 60 mm

### Mur de façade socle

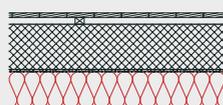
Ucal existant: 1.55 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.46 W/m<sup>2</sup>K



- . Maçonnerie de moellons 600 mm
- . Isolation 60 mm

### Dalle sur sous-sol

Ucal existant: 1.35 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.18 W/m<sup>2</sup>K



- . Revêtement de sol 20 mm
- . Lattage 30 mm
- . Ciment armé 200 mm
- . Isolation 160 mm

### Toiture, dalle des combles

Ucal existant: 0.98 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.18 W/m<sup>2</sup>K



- . Revêtement de sol 12 mm
- . Sous-couche en ciment 50 mm
- . Planchéage 20 mm
- . Poutraison 210 mm
- . Isolation 210 mm + 40 mm
- . Pare-vapeur

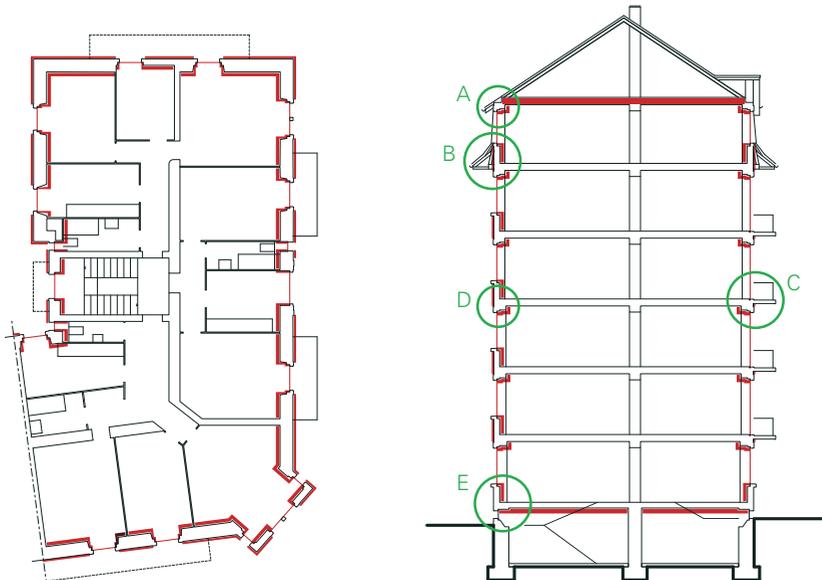
### Fenêtres

U<sub>g</sub> existant: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
 U<sub>f</sub> existant: 1.65 W/m<sup>2</sup>K  
 g existant: 0.55  
 U<sub>g</sub> rénové: 0.6 W/m<sup>2</sup>K  
 U<sub>f</sub> rénové: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
 g rénové: 0.67

- . Cadre rénové en PVC ou d'origine en bois
- . Verre isolant double rénové ou fenêtres à caisson avec verre simple d'origine
- . Cadre en bois
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION

La stratégie d'intervention privilégie une intervention à l'intérieur afin de conserver le caractère du bâtiment avec ses embrasures en pierre et son socle de moellons apparents. De plus, les nombreux éléments de décor qui structurent la façade rendent complexe l'application d'une isolation extérieure. Le remplacement du crépi extérieur par un crépi isolant ainsi que l'isolation de la dalle sur sous-sol et celle des combles se sont avérés insuffisants du point de vue énergétique. La construction en moellons et les planchers en bois rendent l'intervention par l'intérieur complexe, tant du point de vue de la physique du bâtiment que de l'exécution de l'étanchéité à l'air. C'est pourquoi une isolation minérale intérieure minimale, ouverte à la diffusion de vapeur, est mise en œuvre.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°2. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Murs:** le crépi existant est remplacé par un crépi isolant minéral de 20 mm afin de conserver les embrasures en pierre. Pour atteindre la valeur-limite de la norme SIA 380/1, un panneau d'isolant minéral de 60 mm ouvert à la diffusion de vapeur constitué de sable, de calcaire, de ciment et d'eau est mis en place à l'intérieur.

**Dalle sur sous-sol et combles:** une isolation de 160 mm en laine minérale est placée sous la dalle sur sous-sol dans les caves et la buanderie. Le plancher des combles est isolé entre les solives lors des travaux effectués dans les appartements de l'étage mansardé.

**Les fenêtres:** la majorité des fenêtres à caisson d'origine ont déjà été remplacées par des fenêtres avec cadre PVC et verre isolant double, toutes les fenêtres sont remplacées par de nouvelles fenêtres avec un cadre bois et un verre isolant triple. Les embrasures intérieures en bois sont démontées et ajustées.



Façade ouest et sud



Combles



Embrasures intérieures en bois

## DÉTAILS – SCÉNARIO 2

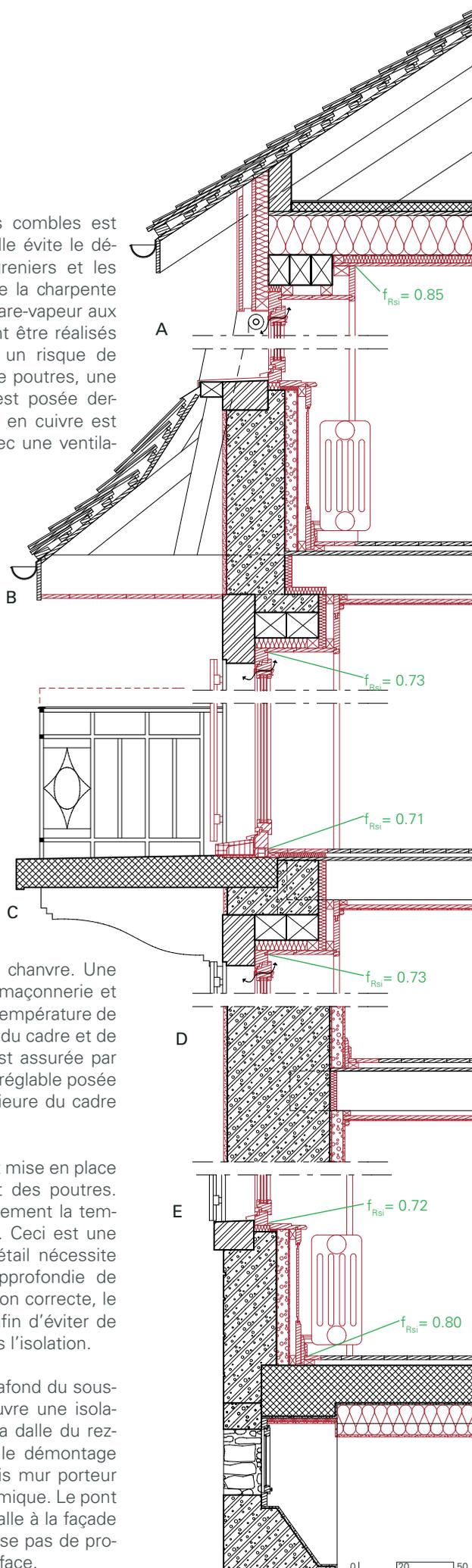
**A** L'isolation de la dalle des combles est réalisée entre les poutres. Elle évite le démontage des cloisons de greniers et les nombreux raccords autour de la charpente complexe. Les raccords du pare-vapeur aux fenêtres et aux parois doivent être réalisés soigneusement. Pour éviter un risque de condensation sur les têtes de poutres, une isolation en laine minérale est posée derrière à l'extérieure. La partie en cuivre est démontée puis remontée avec une ventilation.

**B** Les appartements de la mansarde sont isolés par l'intérieur. La mise en oeuvre de l'isolation doit éviter tout vide d'air entre le mur et la couche isolante.

**C** Aucune intervention sur les balcons n'est nécessaire du point de vue énergétique. Selon le cadre légal la balustrade devrait éventuellement être rehaussée. Un nouveau seuil isolé et une isolation sous une partie du plancher atténuent le pont thermique de la dalle en ciment du balcon. L'embrasure intérieure en bois est déposée, ajustée puis remontée avec un remplissage d'isolation en fibres de chanvre. Une isolation de 50 mm entre la maçonnerie et le cadre permet d'éviter une température de surface trop faible au raccord du cadre et de l'embrasure. La ventilation est assurée par une grille de ventilation hygroréglable posée dans la partie battante supérieure du cadre de la fenêtre.

**D** Une isolation plus faible est mise en place au niveau de l'encastrement des poutres. Elle évite d'abaisser trop fortement la température autour de la poutre. Ceci est une «piste de réflexion» et le détail nécessite une étude physique plus approfondie de cas en cas. Pour une réalisation correcte, le plancher doit être découpé afin d'éviter de conserver un point faible dans l'isolation.

**E** Le peu d'installations au plafond du sous-sol permet de mettre en oeuvre une isolation en laine minérale sous la dalle du rez-de-chaussée. Elle nécessite le démontage des cloisons de caves. L'épais mur porteur du sous-sol crée un pont thermique. Le pont thermique du raccord de la dalle à la façade en moellons apparent ne cause pas de problème de température de surface.



### Raccord façade / dalle des combles

- . Carrelage ~10 mm
- . Chape ciment 50 mm
- . Planchéage 20 mm
- . Poutraison en bois 150 / 210 mm
- . Isolation laine minérale  
 $\lambda = 0.038 \text{ W/mK}$ , 210 mm
- . Pare-vapeur à diffusion variable
- . Lattage, isolation laine minérale,  
 $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Panneau de plâtre fibré 12.5 mm
- . Lissage plâtre

### Contre-coeur attique

- . Tuiles
- . Lattage
- . Planchéage en bois 22 mm
- . Poutraison en bois
- . Crépi isolant minéral  
 $\lambda = 0.054 \text{ W/mK}$ , 20 mm
- . Brique T.C. ~200 mm
- . Mortier léger 8 à 10 mm
- . Panneau isolant minéral,  
 $\lambda = 0.042 \text{ W/mK}$ , 60 mm
- . Enduit ~4 mm
- . Lattage 30 mm
- . Menuiserie en bois

### Balcon

- . Dalle en ciment 160 mm sur consoles en pierre naturelle encastrées dans le mur
- . Balustrade en fer forgé
- . Seuil isolé en ciment moulé
- . Isolation sous le plancher, fibres de chanvre,  $\lambda = 0.039 \text{ W/mK}$ , 30 mm

### Raccord mur de façade / poutraison

- . Crépi isolant,  $\lambda = 0.054 \text{ W/mK}$ , 20 mm
- . Maçonnerie de moellons 500 à 600 mm
- . Mortier léger 8 à 10 mm
- . Panneau isolant minéral,  $\lambda = 0.042 \text{ W/mK}$ , 60 mm
- . Enduit ~4 mm
- . Isolation entre poutres en fibres de chanvre,  $\lambda = 0.039 \text{ W/mK}$ , 40 mm

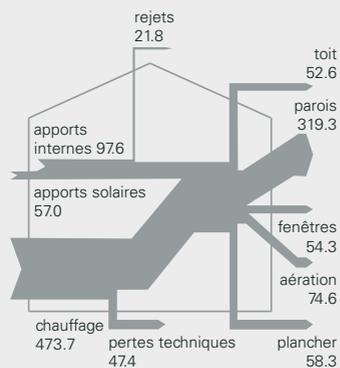
### Mur de façade socle

- . Maçonnerie de moellons apparents 600 mm
- . Mortier léger 8 à 10 mm
- . Panneau isolant minéral,  $\lambda = 0.042 \text{ W/mK}$ , 60 mm
- . Enduit ~4 mm

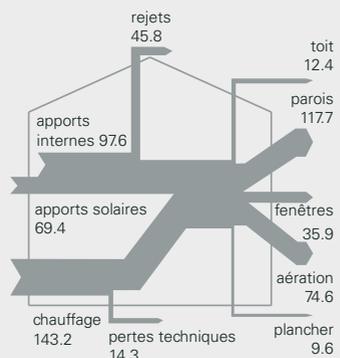
### Dalle sur sous-sol

- . Plancher en bois 22 mm
- . Lattage 30 mm
- . Dalle en ciment 200 mm
- . Laine minérale,  $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$ , 160 mm
- . Enduit ~6 mm

Extrait de la coupe façade rue du scénario 2.

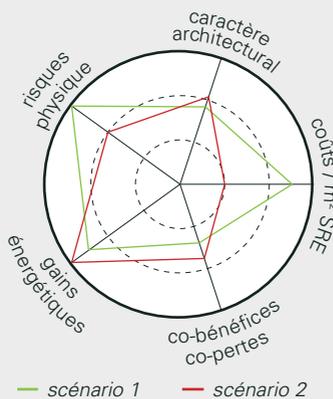


**EXISTANT** Diagramme de Sankey en [MJ/m²]. La valeur limite SIA 380/1 est de 138.3 MJ/m² et les besoins de chaleur de chauffage sont de 426.3 MJ/m².



**SCÉNARIO 2** Diagramme de Sankey en [MJ/m²]. La valeur limite SIA 380/1 est de 139 MJ/m² et les besoins de chaleur de chauffage sont de 128.9 MJ/m².

Part des pertes par les ponts thermiques: 15.4 % (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



**ÉVALUATIONS des scénarios.** Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

**Coût total (T.T.C.):**  
Scénario 1: 1'005'000 CHF  
Scénario 2: 1'715'000 CHF

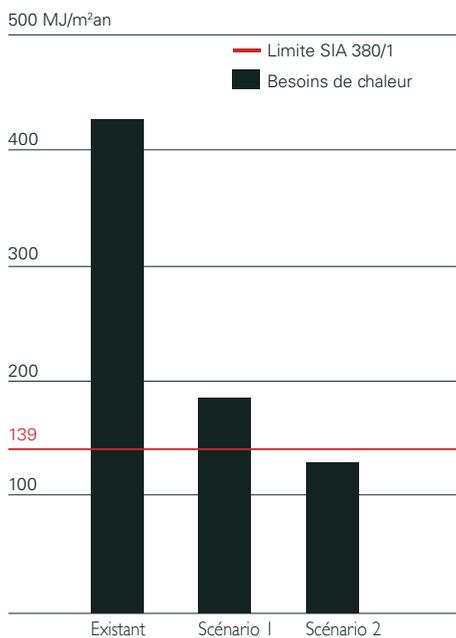
**Coût / m² de SRE (T.T.C.):**  
Scénario 1: 645 CHF  
Scénario 2: 1'100 CHF

**Coût / m² d'éléments (T.T.C.):**  
Toiture / plancher combles: 370 CHF  
Façades:  
Scénario 1: 575 CHF  
Scénario 2: 1'060 CHF  
Plancher sur espace non-chauffé: 320 CHF

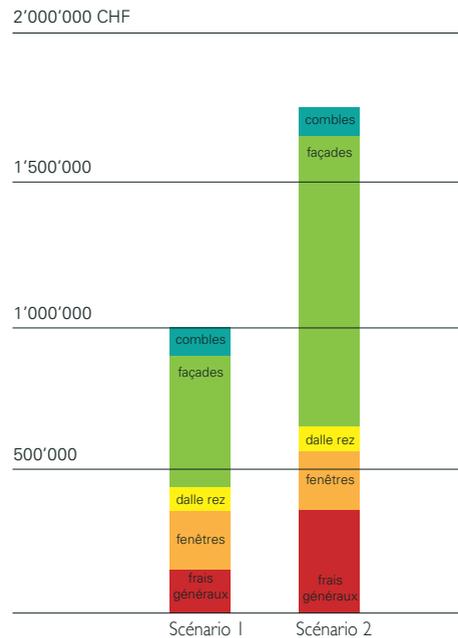
## LES SCÉNARIOS

**Scénario 1:** l'intervention propose de remplacer le crépi extérieur existant par un crépi isolant minéral de 40 mm. Le scénario prévoit une isolation de la dalle des combles et de la dalle sur sous-sol ainsi que le remplacement des fenêtres. Il apporte un gain énergétique de 242 MJ/m², soit 57%, pour un investissement de 58% des coûts totaux du scénario 2.

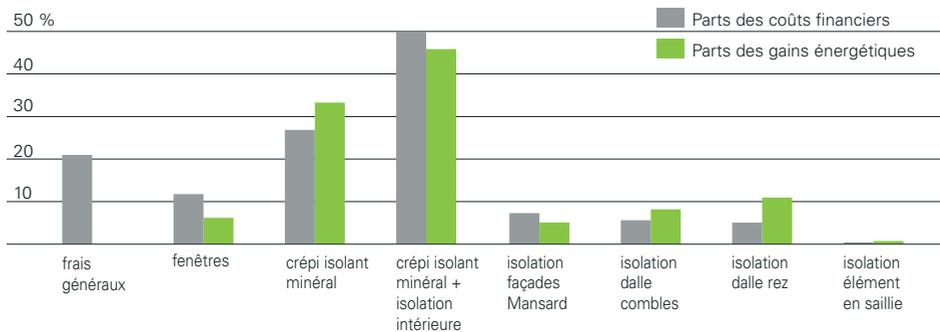
**Scénario 2:** il intègre les éléments du scénario 1 avec quelques modifications. Le crépi isolant minéral extérieur est de 20 mm uniquement afin de conserver les embrasures en pierre naturelle. Une isolation en panneau minéral de 60 mm est ajoutée à l'intérieur afin d'atteindre la valeur-limite. Le scénario apporte un gain énergétique de 297 MJ/m², soit 70%.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des scénarios.



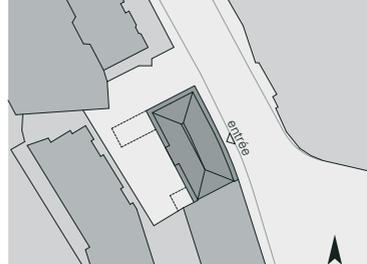
Graphique des coûts financiers de chaque scénario répartis par éléments.



Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention.

## CONCLUSION

Les deux scénarios conservent les caractéristiques architecturales du bâtiment. Le scénario 1 intervient uniquement à l'extérieur des façades des étages types et n'engendre aucune difficulté au niveau de la physique du bâtiment. Avec des coûts financiers réduits, il apporte 85% des gains énergétiques nécessaires pour atteindre la valeur-limite de la norme SIA 380/1. Dans le scénario 2, l'intervention à l'intérieur et à l'extérieur des façades engendre d'une part un coût élevé et d'autre part des détails complexes au niveau des poutres en bois des planchers existants. L'isolation intérieure nécessite des interventions dans les salles de bain, les cuisines et des peintures supplémentaires ce qui fait augmenter les coûts du scénario. Le scénario 2 atteint la limite de la SIA 380/1 malgré des pertes par les ponts thermiques représentant 15% des pertes énergétiques de l'enveloppe du bâtiment.



Situation 1: 2'000

0 5 120

## CARACTÉRISTIQUES

L'immeuble, érigé à la fin d'un îlot de bâtiments, est situé au centre-ville de Lausanne. Il se développe sur six étages et un attique, en retrait de la façade. Les façades monolithiques d'environ 35 cm d'épaisseur sont constituées de briques creuses crépies à l'extérieur. Sous la toiture en pente recouverte de tuiles, se situe un espace de combles non chauffé. La façade du rez-de-chaussée est recouverte d'un placage en ciment. Les planchers sont réalisés avec des poutrelles et des hourdis de terre cuite. Les fenêtres ont été remplacées et seules les huisseries à guillotine des locaux commerciaux du rez-de-chaussée sont d'origine. Elles possèdent des embrasures et des tablettes en simili-pierre. Les loggias ouvertes, légèrement saillantes dans la partie centrale et les saillies fermées rythment la façade. Les loggias sont réalisées avec une plateforme en béton et des garde-corps en maçonnerie crépie surmontée d'une main courante en ferronnerie. Dans les angles, l'expression dynamique des balcons arrondis en porte-à-faux renforce la continuité entre les façades gouttereaux et la façade pignon. Le vocabulaire architectural moderniste se veut sans ornementation. Le bâtiment est sobre, seuls des bandeaux horizontaux et une corniche en ciment parcourent de manière continue les trois façades. Ils accentuent la continuité entre elles et renforcent le caractère horizontal du bâtiment.



<b>Année de construction</b>	1939
<b>Surface bâtie [m<sup>2</sup>]</b>	380
<b>Nombre de commerces</b>	2
<b>Nombre de logements</b>	25
<b>Surface référence énergétique (SRE) [m<sup>2</sup>]</b>	2'445
<b>Surface d'enveloppe développée [m<sup>2</sup>]</b>	2'339
<b>Facteur de forme</b>	0.9
<b>Consommation moyenne d'énergie [kWh/an]</b>	436'383

**Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]** 445

**Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]** 339

**Production de chaleur**  
Chaudière à mazout

**Production de chaleur**  
Radiateurs avec vannes thermostatiques

### toiture

en pente

### attique

en retrait de la façade

### corniche

élément en ciment

### espace extérieur

loggias en saillie, dalle béton, garde-corps en maçonnerie crépie avec main courante en ferronnerie

### embrasure

simili-pierre

### protection solaire

volets à rouleau avec caisson intérieur

### dalle d'étage

hourdis de terre cuite

### mur de façade

maçonnerie monolithique de briques creuses crépies d'environ 35 cm d'épaisseur

### bandeau d'appui

élément en ciment

### revêtement de socle

plaque de ciment

### dalle sur sous-sol

hourdis de terre cuite

*Extrait de la façade nord-est sur la rue.*

### Mur de façade

U<sub>mes</sub>: 1.17 W/m<sup>2</sup>K (±15%)  
 Ucal existant: 1.22 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové minéral: 0.65 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové aerogel: 0.46 W/m<sup>2</sup>K



- . Crépi isolant 40 mm
- . Plots de ciment creux 340 mm
- . Enduit plâtre 7 mm

### Mur de façade socle

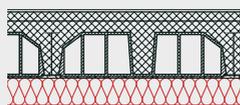
Ucal existant: 1.19 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.26 W/m<sup>2</sup>K



- . Plaque de ciment 40 mm
- . Plots de ciment creux 340 mm
- . Isolation 60 mm+30 mm
- . Pare-vapeur

### Dalle sur sous-sol

Ucal existant: 0,98 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.22 W/m<sup>2</sup>K



- . Carrelage ~12 mm
- . Dalle à hourdis T.C.210 mm
- . Enduit plâtre 7 mm
- . Isolation 120 mm

### Toiture, dalle des combles

Ucal existant: 1.01 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.14 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 120 + 80 mm
- . Pare-vapeur
- . Dalle à hourdis T.C. 160 mm
- . Enduit plâtre 7 mm

### Fenêtres

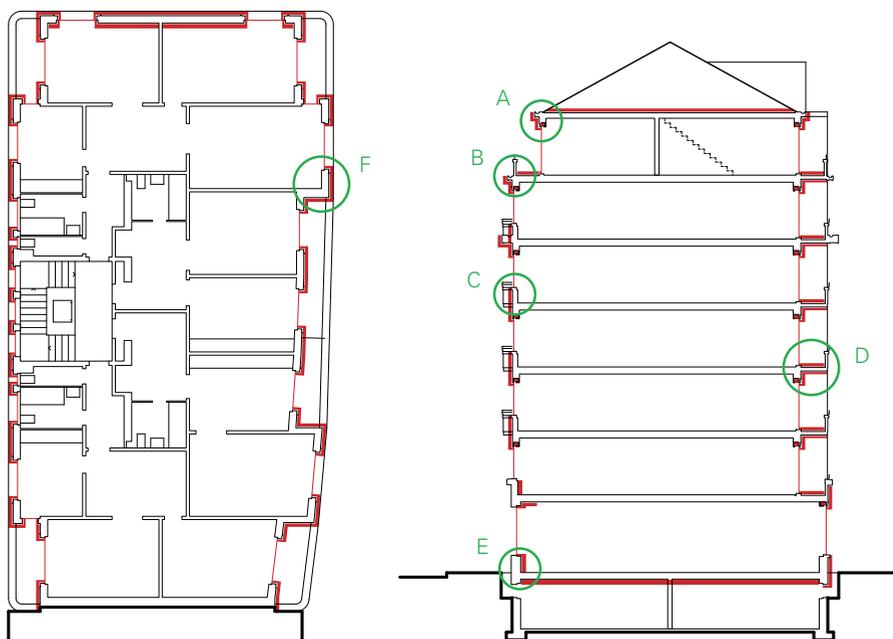
U<sub>g</sub> existant: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
 U<sub>f</sub> existant: 2.0 W/m<sup>2</sup>K  
 g existant: 0.55

U<sub>g</sub> rénové: 0.6 W/m<sup>2</sup>K  
 U<sub>f</sub> rénové: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
 g rénové: 0.67

- . Cadre rénové en PVC
- . Verre isolant double rénové
- . Cadre en bois
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION

Les caractéristiques architecturales du bâtiment; ses loggias, ses ouvertures dans les angles, ses nombreuses corniches affirmant son horizontalité et la continuité de ses façades ainsi que son attique en retrait rendent complexe la simple application d'une isolation extérieure sans perte architecturale. La stratégie adoptée est de mettre en œuvre un crépi isolant permettant de conserver ses caractéristiques et d'agir de manière plus importante sur la dalle des combles, celle du rez-de-chaussée et les fenêtres. Des interventions ciblées sur des éléments comme les caissons de store, les embrasures et la terrasse de l'attique complètent l'intervention.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°2. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Murs:** le crépi existant de 15 mm est remplacé par un crépi isolant minéral de 40 mm ( $\lambda = 0.054$ ). Un scénario 3 propose un crépi isolant aérogel ( $\lambda = 0.029$ ). Afin de conserver l'expression architecturale du socle plaqué en ciment, l'isolation se fait par l'intérieur. Les grands espaces des locaux commerciaux facilitent cette intervention. Une isolation minérale intérieure de 90 mm d'épaisseur de la façade pignon complète l'intervention.

**Dalle sur sous-sol et combles:** malgré les complications des installations techniques et des cloisonnements de caves, l'isolation de la dalle à hourdis sur sous-sol est réalisée par-dessous. Elle évite une surélévation d'une marche à l'entrée des locaux commerciaux. L'intervention propose une isolation sur la dalle à hourdis des combles. Elle tient compte de la difficulté d'isoler la cage d'escalier permettant d'y accéder.

**Espaces extérieurs:** les loggias caractéristiques du bâtiment sont conservées ouvertes. Elles sont isolées par-dessus et par-dessous la dalle en ciment. La main courante en ferronnerie est surélevée. L'intervention est identique pour les terrasses de l'attique. Une isolation extérieure en polystyrène expansé de 120 mm isole les façades des loggias.



Façade sud-ouest sur la cour



Sous-sol et caves



Loggia côté cour

## DÉTAILS – SCÉNARIO 2

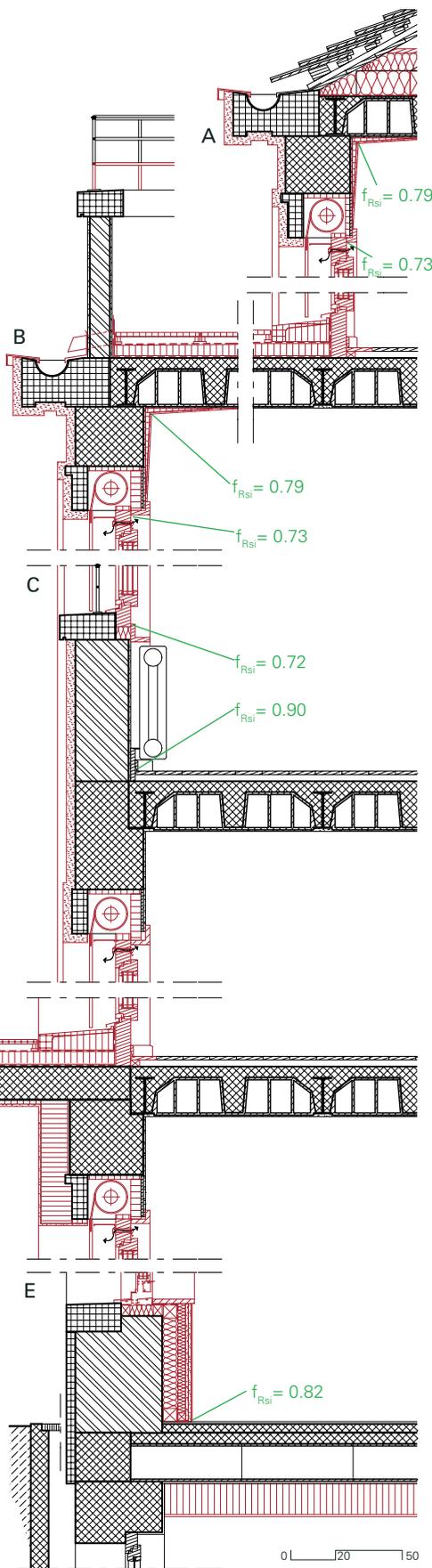
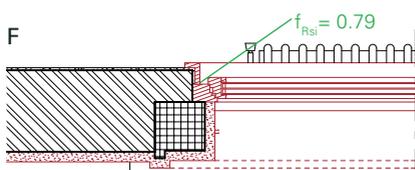
A L'isolation des combles nécessite le démontage des cloisons du grenier. Un soin particulier est nécessaire au raccord du pare-vapeur et de l'isolation avec les chevrons. Les parois de l'escalier menant aux combles, situé entre deux appartements de l'attique, doivent également être isolées. Afin d'éviter une température de surface trop faible dans l'angle intérieur, une isolation taillée en biais est mise en place.

B L'épaisseur de l'isolation sur la dalle de terrasse influence la hauteur du seuil et la hauteur du passage de la porte-fenêtre. Dans ce cas, la surélévation de la balustrade est nécessaire. L'évacuation des eaux et la remontée de l'étanchéité doivent être soigneusement réalisées. Une isolation en fond de caisson de store est mise en place en veillant à garantir une hauteur de niche suffisante.

C Les tablettes en simili-pierre sont maintenues et l'épaisseur du crépi isolant ne doit pas dépasser la saillie de la tablette. Une isolation entre le cadre de la fenêtre et la maçonnerie évite une température de surface trop basse au raccord.

D La dalle de balcon en béton armé posée sur les murs porteurs est isolée par-dessus et par-dessous afin de diminuer le pont thermique. La façade arrière des loggias est isolée avec une isolation extérieure supplémentaire. La balustrade est surélevée comme pour l'attique.

E Lors de la mise en œuvre, l'étanchéité des raccords du pare-vapeur sur la dalle et aux embrasures de fenêtres n'est pas aisée à garantir. L'isolation sous la dalle sur le sous-sol crée un pont thermique au raccord à la façade, mais il reste acceptable du point de vue de la physique du bâtiment. Une isolation sur la dalle compliquerait l'accès aux commerces en créant une marche.



F Les embrasures sont recouvertes avec un crépi isolant pour diminuer le pont thermique. La finition différente du crépi permet de conserver une lecture des embrasures existantes. Le crépissage des embrasures réduit la largeur du vide de maçonnerie et nécessite la modification des stores.

### Raccord façade / dalle des combles

- . Panneau d'aggloméré 20 mm
- . Ossature, isolation laine minérale,  $\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$ , 120 + 80 mm
- . Pare-vapeur
- . Dalle à hourdis T.C. 200 mm
- . Enduit plâtre 7 mm
- . Isolation d'angle en polyuréthane rigide, doublée d'un pare-vapeur,  $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$ , 30 x 100 cm, 20 à 3 mm

### Dalle de terrasse

- . Dalles en ciment
- . Couche de support
- . Étanchéité
- . Isolation polyuréthane en pente,  $\lambda = 0.029 \text{ W/mK}$ , 25 à 50 mm
- . Barrière-vapeur
- . Dalle à hourdis T.C. 250 mm
- . Enduit plâtre 7 mm

### Mur de façade

- . Crépi isolant minéral,  $\lambda = 0.054 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Maçonnerie de plots de ciment creux 340 mm
- . Enduit plâtre 7 mm
- . Papier peint

### Dalle de balcon

- . Dalles en ciment
- . Couche de support
- . Étanchéité
- . Isolation polyuréthane en pente,  $\lambda = 0.029 \text{ W/mK}$ , 20 à 50 mm
- . Carrelage existant ~12 mm
- . Dalle béton armé 160 mm
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$ , 20 mm
- . Crépi extérieur

### Mur de façade de loggia

- . Crépi extérieur
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.031 \text{ W/mK}$ , 120 mm
- . Maçonnerie de plots de ciment creux 340 mm
- . Enduit plâtre 7 mm
- . Papier peint

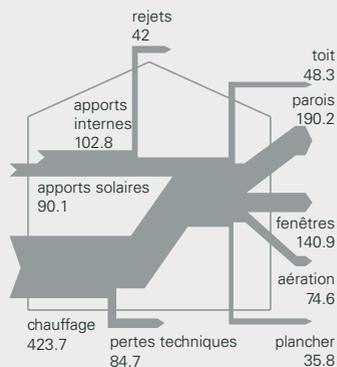
### Mur socle côté rue

- . Plaque de ciment 40 mm
- . Maçonnerie de plots de ciment creux 340 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 60 mm
- . Pare-vapeur à diffusion variable
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 30 mm
- . Panneau de plâtre, 2 x 12,5 mm
- . Lissage au plâtre 3 mm
- . Peinture

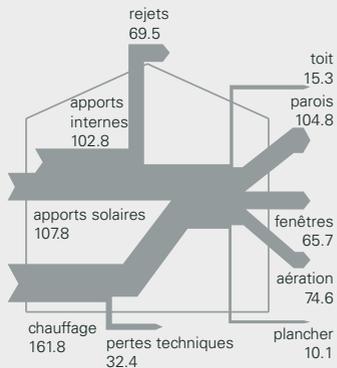
### Dalle sur sous-sol

- . Revêtement de sol
- . Dalle à hourdis T.C. 250 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$ , 120 mm
- . Enduit 7 mm

Extrait du plan du 2<sup>e</sup> étage et de la coupe façade rue du scénario 2.

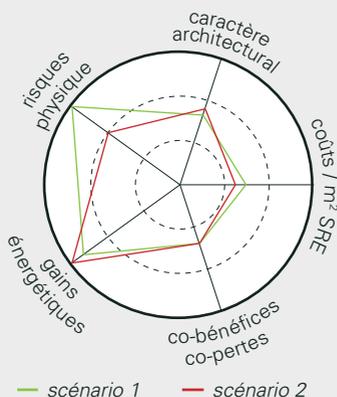


**EXISTANT** Diagramme de Sankey en [MJ/m<sup>2</sup>]. La valeur limite SIA 380/1 est de 130 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins chaleur de chauffage sont de 338.9 MJ/m<sup>2</sup>.



**SCÉNARIO 2** Diagramme de Sankey en [MJ/m<sup>2</sup>]. La valeur limite SIA 380/1 est de 130 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chaleur de chauffage sont de 129.4 MJ/m<sup>2</sup>.

Part des pertes par les ponts thermiques : 23 % (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



**ÉVALUATIONS** des scénarios. Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

**Coût total (T.T.C.):**

- Scénario 1: 2'085'000 CHF
- Scénario 2: 2'225'000 CHF
- Scénario 3: 2'665'000 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> de SRE (T.T.C.):**

- Scénario 1: 960 CHF
- Scénario 2: 1'030 CHF
- Scénario 3: 1'230 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments (T.T.C.):**

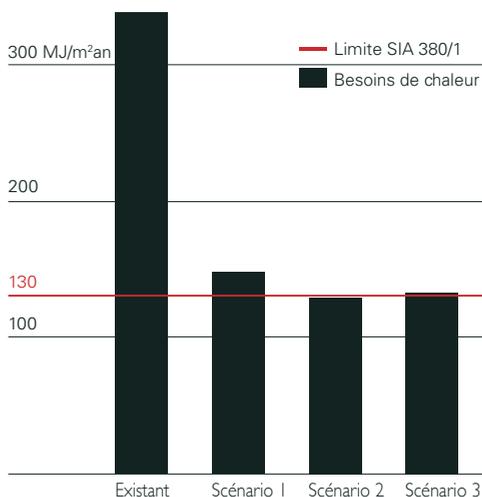
- Toiture / plancher combles: 465 CHF
- Façades:
  - Scénario 1: 1'010 CHF
  - Scénario 2: 1'105 CHF
  - Scénario 3: 1'470 CHF
- Plancher sur espace non-chauffé: 300 CHF

**LES SCÉNARIOS**

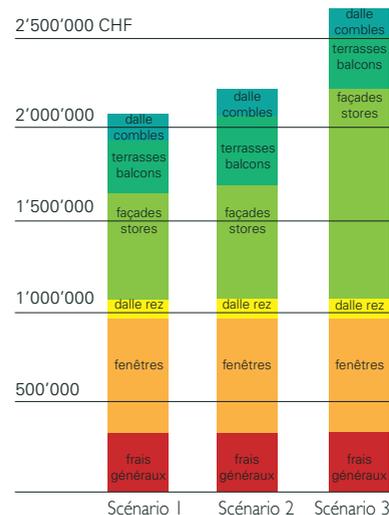
**Scénario 1:** il intègre le changement des fenêtres, un crépi isolant minéral, l'isolation par l'intérieur du rez-de-chaussée, l'isolation des balcons, des caissons de store, de la dalle des combles et de la dalle sur sous-sol. Il apporte un gain énergétique de 190 MJ/m<sup>2</sup>, soit 56%, pour un investissement de 94% des coûts du scénario 2.

**Scénario 2:** une isolation extérieure de 120 mm des murs arrière des balcons et une isolation intérieure de 90 mm de la façade pignon complètent le scénario 1. Le scénario atteint la valeur-limite SIA 380/1 avec un gain énergétique de 209 MJ/m<sup>2</sup>, soit 62%.

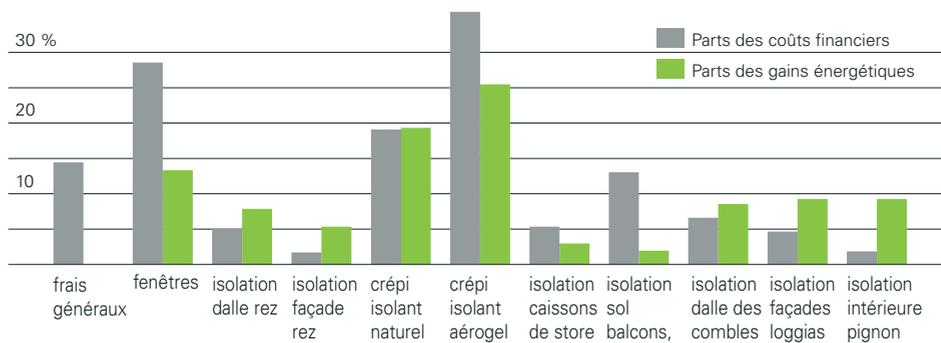
**Scénario 3:** il reprend les mesures du scénario 1 en changeant le crépi isolant minéral par un crépi isolant aérogel. Il approche la valeur-limite SIA 380/1 avec un besoin de chaleur de chauffage de 133 MJ/m<sup>2</sup>, soit un gain énergétique de 61%, mais pour un investissement supérieur de 20% au scénario 2.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des différents scénarios.



Graphique des coûts financiers de chaque scénario répartis par éléments.



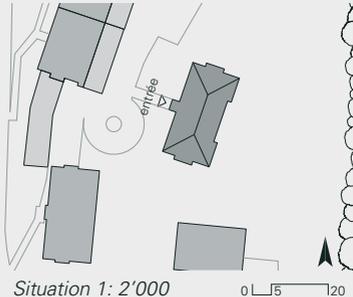
Graphique représentant la part des coûts et la part des gains énergétiques par mesure d'intervention.

**CONCLUSION**

Les trois scénarios conservent les caractéristiques architecturales du bâtiment, mais des différences notables ressortent. Le scénario 1 utilise un crépi isolant minéral et améliore significativement les pertes énergétiques (91% des gains énergétiques nécessaires pour atteindre la limite SIA 380/1). Une augmentation des épaisseurs d'isolation sur la dalle des combles ou au plafond du sous-sol ne permettrait pas d'atteindre la valeur-limite. Le scénario 2 atteint la valeur-limite, en mettant en place deux mesures ciblées. D'une part, une isolation extérieure des façades à l'arrière des balcons, mais elle réduit leur surface et leur usage. D'autre part, une isolation intérieure de la façade pignon qui réduit aussi légèrement les surfaces utiles. Le scénario 3, en utilisant un crépi isolant à base d'aérogel ayant un coût élevé et sur lequel il existe peu de recul quant à son comportement dans le temps, permettrait d'atteindre la limite sans ces mesures. Si l'isolation des surfaces horizontales des balcons et des caissons de store apporte peu d'améliorations énergétiques par rapport à l'investissement financier, elle est nécessaire dans la résolution des ponts thermiques qui représentent près d'un quart des pertes énergétiques du bâtiment.

## CARACTÉRISTIQUES

L'immeuble, non-contigu, est implanté en périphérie de la ville de Lausanne. Un grand espace vert sert de cadre naturel à un ensemble d'habitations accueillant des logements économiques. Le bâtiment se développe sur cinq étages et s'oriente principalement vers le sud-ouest. Son organisation exploite la pente du terrain en plaçant deux appartements au rez-de-chaussée inférieur et les locaux techniques dans la partie enterrée. L'architecture simple et rationnelle en maçonnerie crépie, n'exclut cependant pas le soin des détails et un certain confort. La façade sud-ouest, élaborée sur un axe de symétrie centrale se caractérise par une trouée verticale de loggias légèrement saillantes entourée par des pans de murs pleins. Le long garde-corps massif couronné d'une tablette en simili-pierre et la liaison des ouvertures de la partie pleine par un encadrement en simili-pierre donnent une certaine horizontalité au bâtiment. Les ouvertures de la façade nord-est sont organisées de part et d'autre de la baie vitrée verticale de la cage d'escalier, composée d'un châssis métallique et de verres simples. Des espaces de combles non-chauffés et inexploités sont situés sous la toiture. Les avant-toits et la faible pente de la toiture rendent celle-ci peu perceptible. Les murs de façade crépis d'environ 30 centimètres d'épaisseur sont composés d'une brique porteuse à l'extérieur d'une lame d'air et d'un doublage en brique à l'intérieur. Les dalles à poutrelles et hourdis de terre cuite reposent sur les murs de façades et des murs de refend. La dalle en béton des loggias porte sur les murs de façade. Une partie des fenêtres possède encore un châssis en bois et deux verre simple. Des volets à rouleau, montés dans un caisson intérieur, permettent d'obscurcir les ouvertures.



Année de construction	1960
Surface bâtie [m <sup>2</sup> ]	324
Nombre de logements	18
Surface référence énergétique (SRE) [m <sup>2</sup> ]	1'475
Surface d'enveloppe développée [m <sup>2</sup> ]	1'870
Facteur de forme	1.1
Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]	220'230
Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	355
Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	325
Production de chaleur	Chaudière à mazout
Distribution de chaleur	Radiateurs sans vannes thermostatiques

### toiture

en pente couverte de tuiles, avant-toit en filigrane

### dalle des combles

poutrelle et hourdis de terre cuite

### encadrement

simili-pierre

### dalle d'étage

poutrelle et hourdis de terre cuite

### fenêtre

cadre bois, verre double

### protection solaire

volets à rouleau avec caisson intérieur

### mur de façade

maçonnerie de brique terre cuite crépie avec un vide d'air et un doublage intérieur (environ 30 cm d'épaisseur)

### espace extérieur

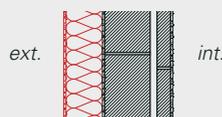
loggias légèrement en saillie, dalle béton, garde-corps en maçonnerie crépie

### dalle sur vide sanitaire

poutrelle et hourdis de terre cuite  
*Extrait de la façade sud-est.*

### Mur de façade

Umes: non disponible  
Ucal existant: 0.65 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.16 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 160 mm
- . Enduit existant 10 mm
- . Briques T.C. creuses 200 mm
- . Vide d'air 30 mm
- . Briques T.C. creuses 60 mm
- . Enduit plâtre ~7 mm

### Mur de façade loggia

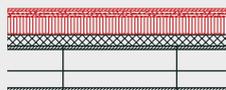
Ucal existant: 0.65 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.24 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 100 mm
- . Enduit existant 10 mm
- . Briques T.C. creuses 200 mm
- . Vide d'air 30 mm
- . Briques T.C. creuses 60 mm
- . Enduit plâtre ~7 mm

### Dalle sur sous-sol

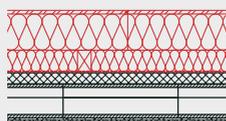
Ucal existant: 1.06 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.31 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 80 mm
- . Dalle à hourdis T.C. et poutrelles en béton 250 mm

### Toiture, dalle des combles

Ucal existant: 0.30 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.11 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 160 + 100 mm
- . Pare-vapeur
- . Isolation 100 mm (démontée)
- . Dalle à hourdis T.C. et poutrelles en béton 210 mm
- . Enduit plâtre ~7 mm

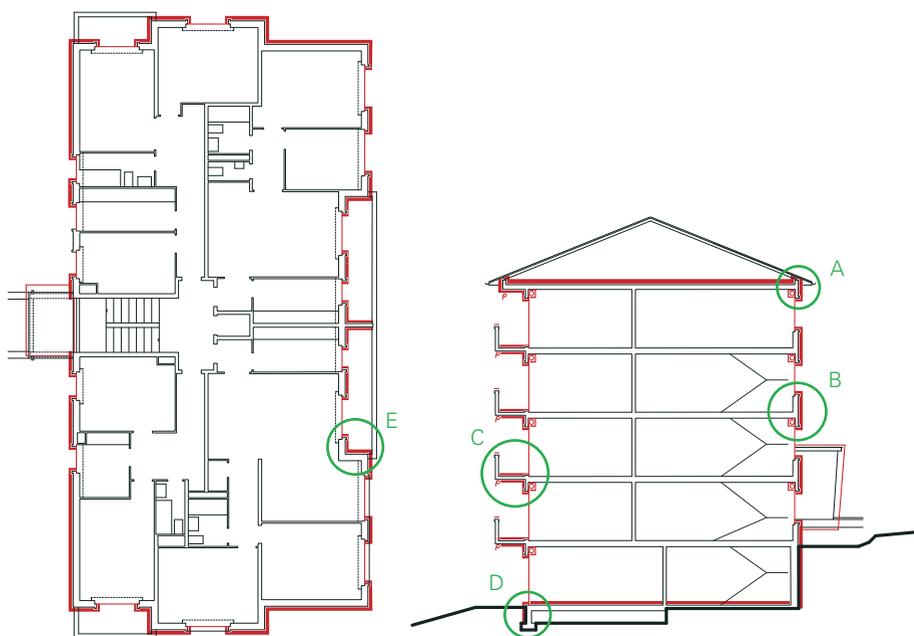
### Fenêtres

Ug existant: 1.1 ou 3.0 W/m<sup>2</sup>K  
Uf existant: 1.9 W/m<sup>2</sup>K  
g existant: 0.75  
Ug rénové: 1.00 W/m<sup>2</sup>K  
Uf rénové: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
g rénové: 0.6

- . Cadre rénové en PVC ou d'origine en bois
- . Verre isolant double rénové ou deux verres simples sans isolation d'origine
- . Cadre en bois
- . Verre isolant double

## STRATÉGIE D'INTERVENTION

La simplicité de la volumétrie permet une isolation extérieure des façades qui conserve les éléments caractéristiques du bâtiment. Pour des raisons d'exécution et d'économie, l'ensemble des espaces techniques a été intégré au volume isolé. L'intervention conserve l'expression des encadrements existants en simili-pierre regroupant parfois deux ouvertures. Ils sont remplacés par des encadrements isolés en composite ciment-verre. Bien que réduite à cause de l'épaisseur d'isolation, la saillie des balcons demeure perceptible.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°2. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Murs:** une isolation minérale crépée de 160 mm d'épaisseur est posée à l'extérieur. Un encadrement préfabriqué en composite permet de réduire au minimum le vide de lumière tout en conservant l'expression des encadrements existants. Les murs des locaux enterrés sont isolés par l'extérieur.

**Dalle sur sous-sol et combles:** l'isolation de la dalle des combles est remplacée par une isolation de 260 mm d'épaisseur. Une isolation de 80 mm d'épaisseur est posée sur la dalle du rez-de-chaussé inférieur.

**Espaces extérieurs:** Les murs des balcons sont isolés avec une épaisseur de 100 mm. La conservation des balcons nécessite une atténuation du pont thermique. Une isolation dessus et dessous la dalle est nécessaire.



Entrée nord-ouest



Caves



Loggias sud-est

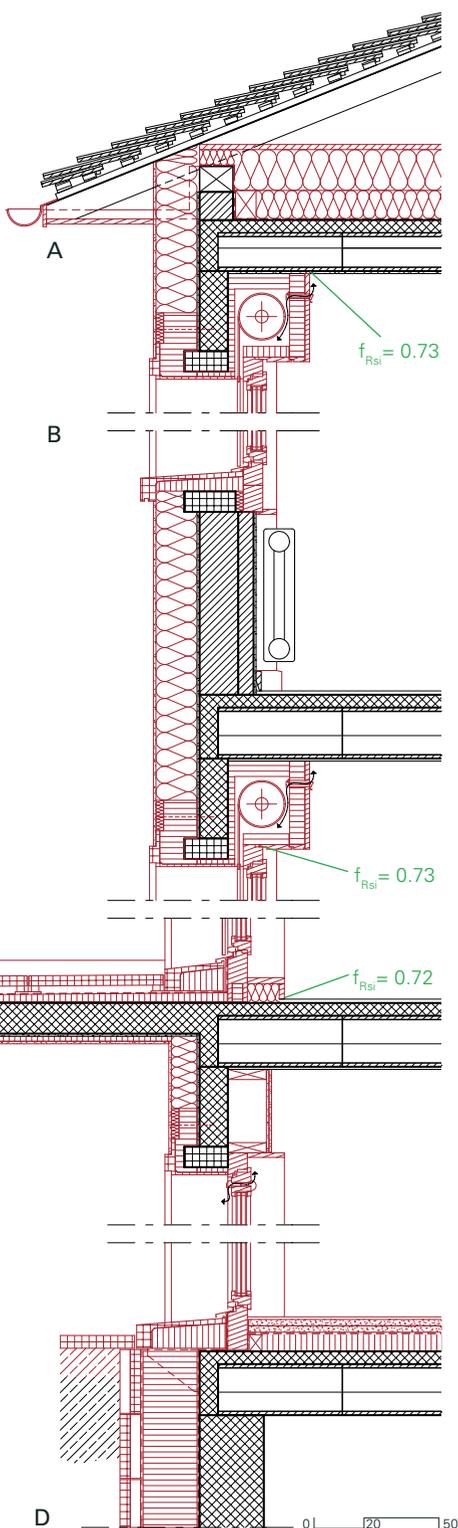
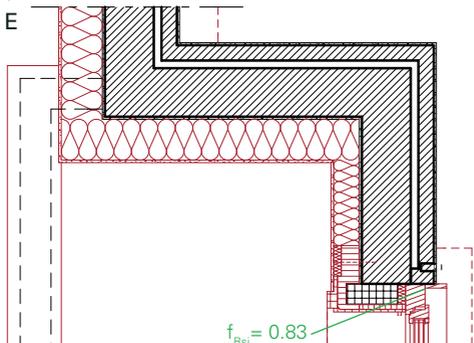
## DÉTAILS – SCÉNARIO 2

**A** Les combles inexploités facilitent l'intervention. Il est préférable de retirer la faible isolation existante afin de réaliser de nouveaux raccords corrects à la sablière. La mise en œuvre du pare-vapeur et de l'isolation aux raccords des chevrons doit être réalisée soigneusement. L'importante épaisseur d'isolation nécessite la modification de l'escalier escamotable d'accès. Les fermetures d'avant-toit sont démontées afin de réaliser une remontée de l'isolation extérieure jusque sous la sous-couverture.

**B** Les nouveaux encadrements en composite de ciment-verre recouvrent les encadrements en simili-pierre existants avec une épaisseur réduite au minimum afin de conserver les proportions des ouvertures et un maximum de vide pour l'apport de lumière. La réduction du vide de maçonnerie nécessite le remplacement des stores. Les caissons intérieurs sont remplacés par des caissons isolés intégrant une grille hygroréglable. Elle permet de gérer le renouvellement d'air réduit par la nouvelle enveloppe plus étanche.

**C** Afin d'atténuer le pont thermique créé par la continuité de la dalle en ciment, une isolation est posée dessus et dessous. La pente intégrée à l'isolation permet d'évacuer l'eau vers l'écoulement. Un élément préfabriqué rehausse le garde-corps afin de respecter la hauteur minimale de 100 cm (90 cm si largeur > 20 cm). Un seuil intérieur isolé de 80 mm de haut, inséré dans la profondeur de l'embrasure, permet d'éviter une température de surface trop faible au raccord entre le cadre de la fenêtre et le plancher.

**D** Le vide d'étage de 260 cm permet une isolation sur la dalle située sur le vide sanitaire. Celle-ci nécessite la modification des portes, armoires, cuisines et sanitaires des deux appartements du rez-de-chaussée inférieur.



**E** L'isolation extérieure des murs du balcon est de 100 mm afin de conserver une largeur utile suffisante. La faible hauteur du vide de passage a nécessité d'intégrer la grille de ventilation dans la partie battante supérieure du cadre de fenêtre.

### Raccord façade / dalle des combles

- . Panneau d'aggloméré 16 mm
- . Ossature, isolation laine minérale,  $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$ , 160 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$ , 100 mm
- . Pare-vapeur
- . Dalle à hourdis T.C. avec poutrelles en ciment 210 mm
- . Enduit plâtre 7 mm

### Linéaire / caisson de store

- . Élément d'encadrement en composite ciment-verre avec isolation polystyrène / laine minérale 160 mm
- . Enduit ~10 mm
- . Linéaire en béton 110 mm
- . Caisson intérieur de volet à rouleau isolation polystyrène 25 mm / vide / isolation polystyrène 60 mm / panneau de bois peint
- . Grille de ventilation hygroréglable

### Mur de façade

- . Crépi extérieur 10 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$ , 160 mm
- . Crépi existant ~10 mm
- . Briques T.C. creuses 200 mm
- . Vide d'air 30 mm
- . Briques T.C. creuses 60 mm
- . Enduit plâtre ~ 7 mm

### Dalle de balcon

- . Dallage 40 mm
- . Support
- . Étanchéité
- . Isolation polyuréthane en pente,  $\lambda = 0.02 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Dalle en ciment 120 mm
- . Isolation polystyrène,  $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$ , 20 mm
- . Crépi extérieur

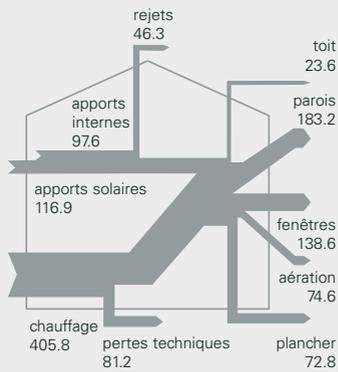
### Dalle sur vide sanitaire

- . Revêtement sol ~10 mm
- . Panneau de plâtre fibré 2 x 10 mm
- . Isolation polystyrène,  $\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$ , 80 mm
- . Dalle à hourdis T.C. avec poutrelles en ciment 250 mm

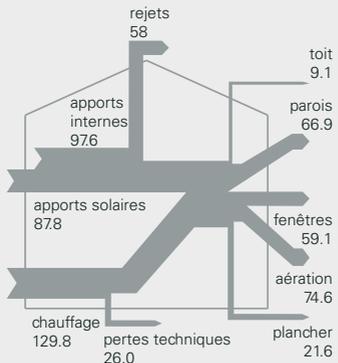
### Mur de balcon

- . Crépi extérieur 10 mm
- . Ossature, isolation laine minérale,  $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$ , 100 mm
- . Crépi existant ~10 mm
- . Briques T.C. creuses 200 mm
- . Vide d'air 30 mm
- . Briques T.C. creuses 60 mm
- . Enduit plâtre ~ 7 mm

Extrait du plan du 2<sup>e</sup> étage et de la coupe façade jardin du scénario 2.

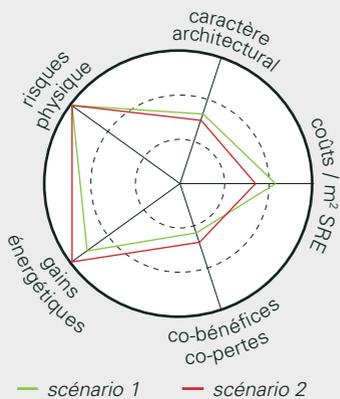


**EXISTANT Diagramme de Sankey.** La valeur limite SIA 380/1 est de 117.0 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chaleur de chauffage sont de 324.6 MJ/m<sup>2</sup>.



**SCÉNARIO 2 Diagramme de Sankey en [MJ/m<sup>2</sup>].** La valeur limite SIA 380/1 est de 119 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chaleur de chauffage sont de 103.9 MJ/m<sup>2</sup>.

Part des pertes par les ponts thermiques: 18.1% (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



**ÉVALUATIONS des scénarios.** Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

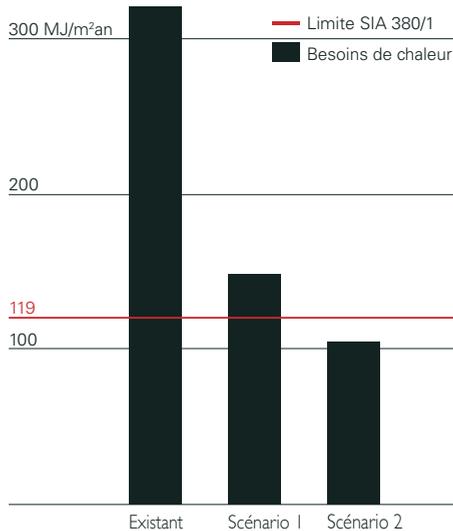
**Coût total (T.T.C.):**  
Scénario 1: 1'160'000 CHF  
Scénario 2: 1'375'000 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> de SRE (T.T.C.):**  
Scénario 1: 760 CHF  
Scénario 2: 895 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments (T.T.C.):**  
Toiture: 280 CHF  
Façades: 720 CHF  
Dalle contre terrain: 610 CHF

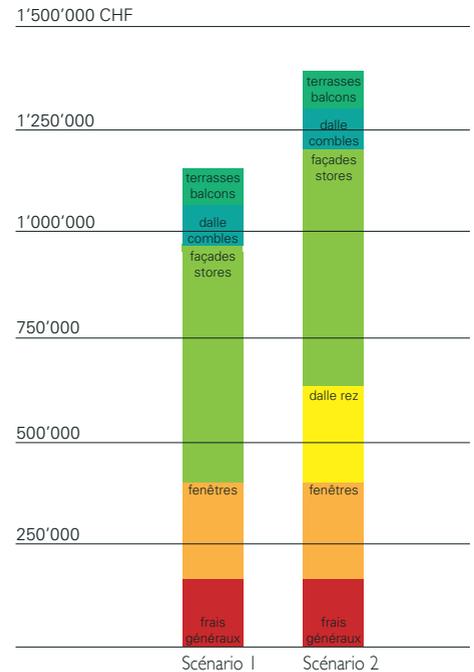
## LES SCÉNARIOS

**Scénario 1:** il intègre le remplacement des fenêtres, l'isolation extérieure des murs, l'isolation extérieure des murs enterrés, l'isolation de la dalle des combles, l'isolation extérieure du volume d'entrée, l'isolation des caissons de stores et l'isolation des dalles de balcons. Avec un besoin de chaleur de 147 MJ/m<sup>2</sup>, le scénario n'atteint pas la valeur-limite de la SIA 380/1. Il apporte un gain énergétique de 179 MJ/m<sup>2</sup>, soit 55 %, avec 84 % de l'investissement financier du scénario 2.

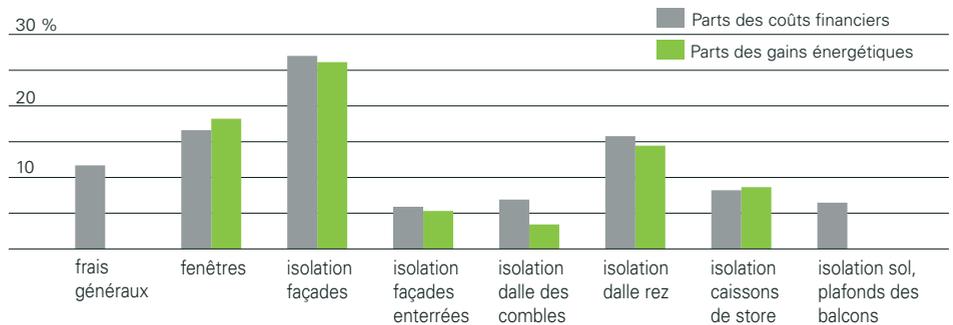


Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des scénarios.

**Scénario 2:** il reprend le scénario 1 auquel il ajoute l'isolation de la dalle du rez-de-chaussée inférieur. Le scénario atteint la limite SIA 380/1 de 119 MJ/m<sup>2</sup>. Il apporte un gain énergétique de 220 MJ/m<sup>2</sup>, soit une amélioration de 68 %.



Graphique des coûts financiers de chaque scénario répartis par éléments.



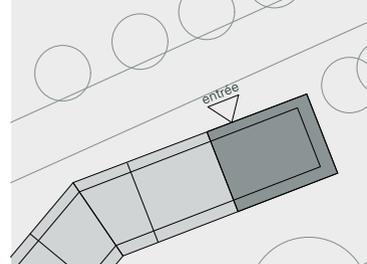
Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention.

## CONCLUSION

L'intervention permet de conserver les caractéristiques architecturales du bâtiment. Une épaisseur d'isolation extérieure adéquate en façade permet de maintenir l'expression des balcons et leur usage. Une épaisseur d'isolation supérieure de 40 mm n'apporterait qu'une amélioration énergétique de 1%. L'isolation de la dalle contre terrain est nécessaire pour atteindre la limite SIA 380/1. Cependant, elle représente une part importante des coûts financiers (15,3%) car elle nécessite de nombreuses modifications dans les deux appartements du rez-de-chaussée inférieur. L'isolation des combles apporte peu de gains énergétiques, car l'état existant comprend 100 mm d'isolation posée lors de transformations précédentes. Si l'isolation des surfaces horizontales des balcons apporte peu d'améliorations énergétiques par rapport à l'investissement financier, elle est nécessaire dans la résolution des ponts thermiques qui représentent près d'un cinquième des pertes énergétiques du bâtiment.

## CARACTÉRISTIQUES

Le bâtiment se situe dans une cité nouvelle, en périphérie de Genève. Il fait partie d'une grande barre dont la longueur totale est d'environ 200 mètres. Il compte huit étages sur rez-de-chaussée et deux niveaux d'attiques en duplex qui se développent en retrait de la façade. La structure, typique de cette époque est faite de murs de refends et dalles en béton armé stabilisés par un noyau de circulations verticales. Les trois façades sont marquées par la présence de balcons en coursive qui entourent le bâtiment à tous les étages, le rythmant de leurs lignes horizontales. Les façades en retrait des balcons sont largement vitrées. A l'attique, la façade alterne entre fenêtres et éléments en béton préfabriqué avec une apparence simili pierre. Le rez-de-chaussée est revêtu de plaques de béton préfabriquées peintes, mais il est surtout marqué par son hall d'entrée généreux qui lie la rue au parc. Des fenêtres en PVC avec un verre isolant triple ont remplacé en 2010–2011 les fenêtres d'origine en bois-métal avec un verre isolant double sur les étages 1 à 8. Dans le cadre de cette étude, il a été fait abstraction de ce remplacement lors de l'établissement du bilan de l'existant.



Situation 1: 2'000

0 5 120

<b>Année de construction</b>	1970
<b>Surface bâtie [m<sup>2</sup>]</b>	308
<b>Nombre de logements</b>	27
<b>Surface référence énergétique (SRE) [m<sup>2</sup>]</b>	2'811
<b>Surface d'enveloppe développée [m<sup>2</sup>]</b>	1'934
<b>Facteur de forme</b>	0.77
<b>Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]</b>	369'702
<b>Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	351
<b>Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	335
<b>Production de chaleur</b>	
Chaudière à distance (cadiom)	
<b>Distribution de chaleur</b>	
Radiateurs avec vannes thermostatiques	



- toiture**  
plate
- attique**  
en retrait de la façade, façades béton préfabriqué
- mur de refend**  
en béton armé, partiellement isolé
- espaces extérieurs**  
balcons linéaires, dalle béton, garde-corps en béton préfabriqué peint et verre
- linteau**  
béton armé
- fenêtres**  
cadres bois-métal, verre isolant double (avant 2011)
- dalle d'étage**  
béton armé
- volets à rouleau**  
avec caisson intérieur
- garde-corps**  
simili-pierre / verre
- façade rez-de-chaussée**  
panneaux de béton préfabriqué peints
- dalle sur sous-sol**  
béton armé

Extrait de la façade nord.

### Mur de façade

U<sub>mes</sub>: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal existant: 1.53 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové v1: 0.17 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 200 mm
- . Muret béton
- . Vide d'air
- . Plaques de plâtre enduites

### Mur de façade pignon

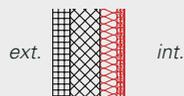
U<sub>mes</sub>: 0.49 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal existant: 0.55 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.18 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 220 mm
- . Mur béton armé

### Mur de façade attique

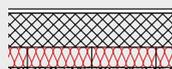
U<sub>mes</sub>: 1.85 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal existant: 2.12 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.41 W/m<sup>2</sup>K



- . Panneau de béton préfabriqué
- . Muret en béton coulé
- . Isolation 80 mm
- . Pare-vapeur
- . Double plaques de plâtre enduites

### Dalle sur rez-de-chaussée

Ucal existant: 2.14 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.29 W/m<sup>2</sup>K



- . Parquet collé
- . Dalle béton armé
- . Isolation 100 mm
- . Faux-plafond suspendu

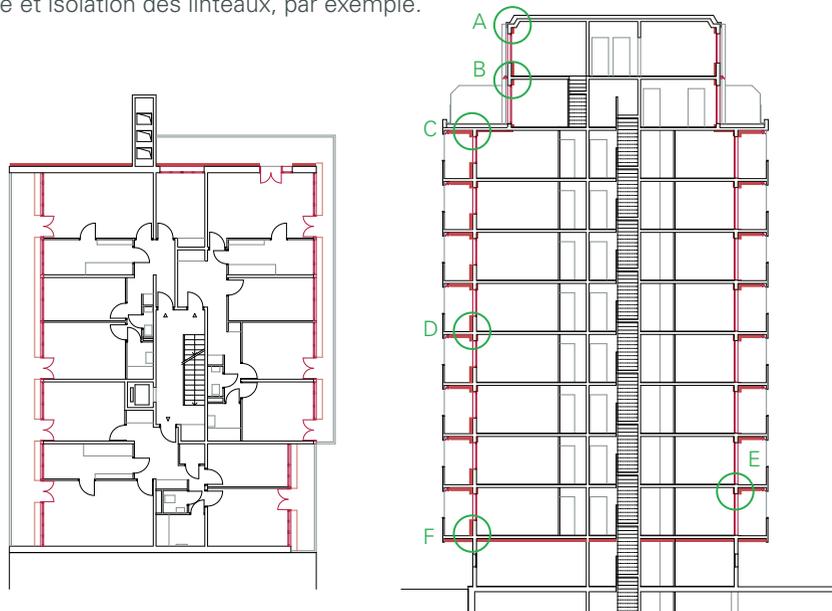
### Fenêtres

U<sub>verre</sub> existant: 3.0 W/m<sup>2</sup>K  
 U<sub>cadre</sub> existant: 1.9 W/m<sup>2</sup>K  
 g existant: 0.75  
 U<sub>verre</sub> rénové: 0.4 W/m<sup>2</sup>K  
 U<sub>cadre</sub> rénové: 1.2 W/m<sup>2</sup>K  
 g rénové: 0.37

- . Cadres bois-métal
- . Double verres isolants
- . Cadres bois-métal
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION - SCÉNARIO 2

La typologie architecturale des étages 1 à 8 divergeant fortement de celle des niveaux de l'attique, des stratégies d'intervention différentes sont proposées. Ainsi, aux étages 1 à 8, la présence des balcons-coursives permet d'isoler le bâtiment par l'extérieur des contrecœurs, sans en modifier l'apparence générale. En attique, une intervention par l'intérieur est privilégiée afin de conserver le caractère et la durabilité de la façade existante en béton préfabriqué coloré. Au rez-de-chaussée, une isolation insérée dans la cavité du faux-plafond existant permet d'isoler ce niveau du volume chauffé. Certaines interventions ciblées complètent l'intervention: isolation des caissons de stores, seuils isolés de fenêtre et isolation des linteaux, par exemple.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°2. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Façade principale:** l'espace des balcons permet la pose d'une isolation extérieure au niveau du plafond (sous les dalles) et des contrecœurs. Un seuil isolant réduit l'incidence du pont thermique lié à la continuité de la dalle. Les fenêtres sont changées (verre isolant triple) et des retours d'isolation sont prévus dans leurs embrasures. Le caisson de store est supprimé. La protection solaire est assurée par des stores en toile extérieurs et l'obscurcissement par des rideaux intérieurs.



Balcon, façade nord

**Façade de l'attique:** l'intervention consiste à mettre en place une isolation de type laine minérale à l'intérieur du bâtiment avec un pare-vapeur protégé par un double panneau de plâtre gypse. Cette intervention implique le déplacement des radiateurs existants (diminution minimale de la surface de l'appartement). Les stores sont supprimés et leurs caissons remplis d'isolant. Les fenêtres PVC avec un verre isolant double sont changées pour des cadre bois-métal et des verres isolants triples.



Attique, façade nord

**Dalle sur rez-de-chaussée et combles:** aucune intervention particulière n'est prévue en toiture ainsi que sur les terrasses des attiques (rénovation récente). Au rez-de-chaussée, l'espace entre la dalle et le faux-plafond est exploité pour mettre en place une isolation de type laine minérale. Les halls d'entrée ne seront plus chauffés et par conséquent exclus du volume chauffé. L'enveloppe énergétique du bâtiment est ramenée au niveau de la dalle sur rez.



Hall d'entrée

## DÉTAILS - SCÉNARIO 2

A L'attique bénéficie d'une intervention propre à son mode de construction. Les fenêtres en PVC sont remplacées par de nouvelles fenêtres avec un verre isolant triple et des cadres bois-métal. En façade nord-ouest, le store existant est démonté pour permettre le remplissage du caisson par de la laine minérale. En façade sud-est, un nouveau store à rouleau isolé est mis en place pour éviter le risque de surchauffe estivale.

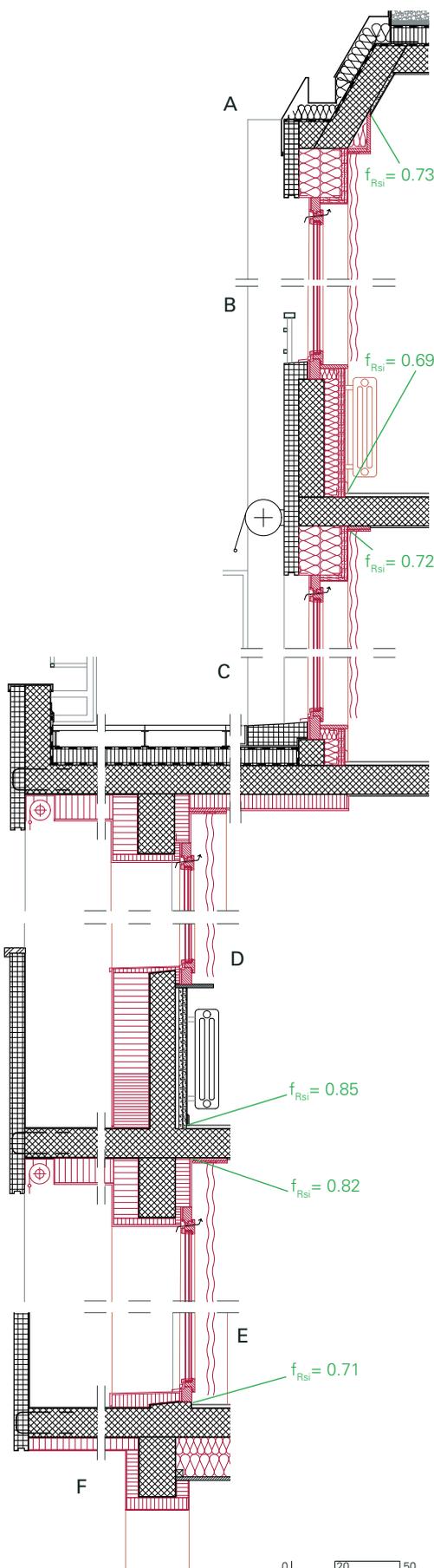
B Les contrecœurs des niveaux de l'attique sont isolés par l'intérieur avec de la laine minérale. La mise en œuvre du pare-vapeur doit faire l'objet d'une attention particulière. La finition se fait grâce à deux plaques de plâtre enduites et le radiateur est déplacé de 50 mm. La jonction entre le mur et la dalle doit faire l'objet d'une étude complémentaire afin de définitivement exclure les risques de condensation ( $f_{Rsi}$  inférieur à 0.72).

C Les terrasses des attiques sont maintenues en l'état. Le plafond des balcons est isolé et crépi. Aux étages 1 à 8, les caissons de store existants sont supprimés pour permettre la mise en place à l'intérieur d'une isolation de type EPS. L'obscurcissement des pièces est assuré par l'installation d'une nouvelle galerie à rideaux. Le store toile à projection existant (vé-tuste) est remplacé par un nouveau store-toile vertical.

D Le contrecœur des balcons est isolé à l'extérieur par une isolation de type EPS crépie. Des retours d'isolation sont prévus dans l'embrasure des fenêtres. Le pied de mur en contact avec la dalle est traité en isolation type XPS.

E Les nouvelles portes-fenêtres en cadre bois-métal avec un verre isolant triple permettant l'accès aux balcons bénéficient d'un seuil en aluminium isolé, ceci limite les effets de pont thermique de la dalle.

F Le rez-de-chaussée étant exclu du volume chauffé du bâtiment, une isolation en laine minérale est mise en place dans le faux-plafond existant. A l'intérieur des locaux de service, une attention particulière est portée dans l'exécution de retours d'isolation verticaux, permettant de limiter les ponts thermiques de la structure.



### Caisson de store attique

- .Élément en béton préfabriqué 80 mm
- .Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04$  W/mK, 240 mm
- .Pare-vapeur
- .Plaques de plâtre 2x15 mm
- .Enduit intérieur 5 mm

### Contrecœur attique

- .Panneau en béton préfabriqué 80 mm
- .Muret en béton coulé 140 mm
- .Crépi de finition
- .Isolation laine minérale  $\lambda = 0.04$  W/mK, 80 mm
- .Pare-vapeur
- .Plaques de plâtre 2x15 mm
- .Enduit de finition 5 mm

### Dalle attique

- .Dallettes en béton 30 mm
- .Taquets de pose 90 mm
- .Étanchéité bitumineuse
- .Isolation polystyrène expansé  $\lambda = 0.036$  W/mK
- .Pare-vapeur
- .Dalle béton armé 160 mm
- .Plafond gypse 5 mm
- .Isolation polystyrène expansé  $\lambda = 0.036$  W/mK, 80 et 140 mm
- .Crépi de finition 10 mm

### Linteau étage courant

- .Crépi 10 mm
- .Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036$  W/mK, 140 mm
- .Linteau béton 200 mm
- .Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036$  W/mK, 80 mm
- .Crépi 10 mm

### Contrecœur étage courant

- .Crépi 10 mm
- .Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036$  W/mK, 200 mm
- .Muret béton armé 200 mm
- .Vide d'air 20 mm
- .Plaques de plâtre enduites 2x20 mm

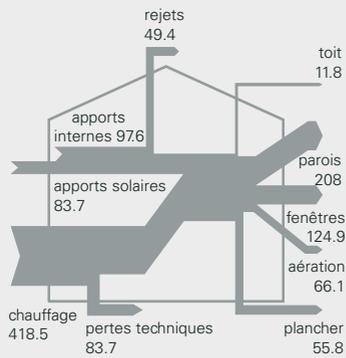
### Mur pignon

- .Crépi 10 mm
- .Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036$  W/mK, 220 mm
- .Mur béton armé 430 mm
- .Crépi 10 mm

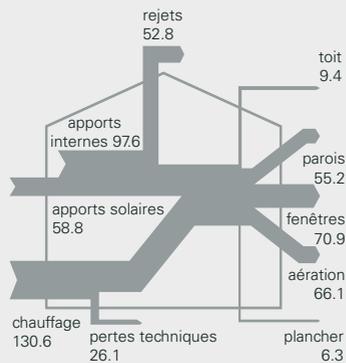
### Dalle sur rez-de-chaussée

- .Parquet collé, 20 mm
- .Dalle béton armé, 160 mm
- .Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04$  W/mK, 100 mm
- .Faux-plafond suspendu plaques de plâtre gypsées 25 mm

Extrait de la coupe façade rue présentant les propositions d'intervention du scénario 2.

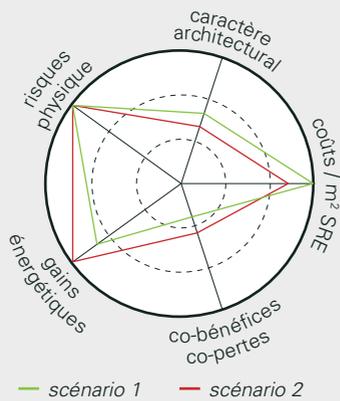


EXISTANT Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 108.3 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 334.8 MJ/m<sup>2</sup>.



SCÉNARIO 2 Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 108.3 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 104.4 MJ/m<sup>2</sup>.

Part des pertes par les ponts thermiques: 25.8 % (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



ÉVALUATIONS des scénarios. Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

**Coûts totaux (T.T.C.):**  
Scénario 1: 1'400'500 CHF  
Scénario 2: 1'895'500 CHF

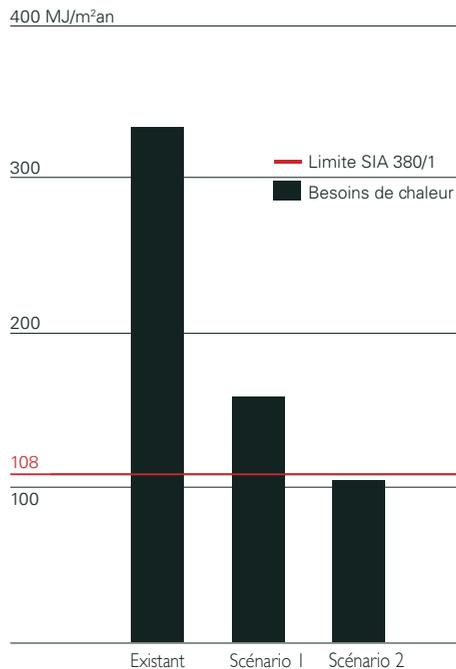
**Coût / m<sup>2</sup> de SRE (T.T.C.):**  
Scénario 1: 500 CHF  
Scénario 2: 675 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments (T.T.C.):**  
Toiture: -  
Façades et fenêtres:  
Scénario 1: 625 CHF  
Scénario 2: 930 CHF  
Dalle sur espace non-chauffé:  
355 CHF

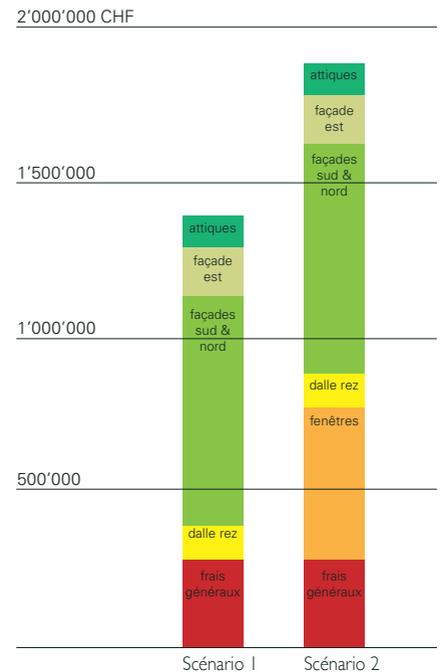
## LES SCÉNARIOS

**Scénario 1:** il intègre l'isolation des trois façades, des plafonds de balcons, de la dalle sur rez le remplissage des caissons de stores et l'isolation intérieure de l'attique. Les fenêtres des étages 1 à 8 sont conservées. Il apporte un gain énergétique de 176 MJ/m<sup>2</sup>, soit 76%, pour un investissement de 74% des coûts totaux du scénario 2. Il ne permet pas de satisfaire aux exigences de la norme SIA 380/1.

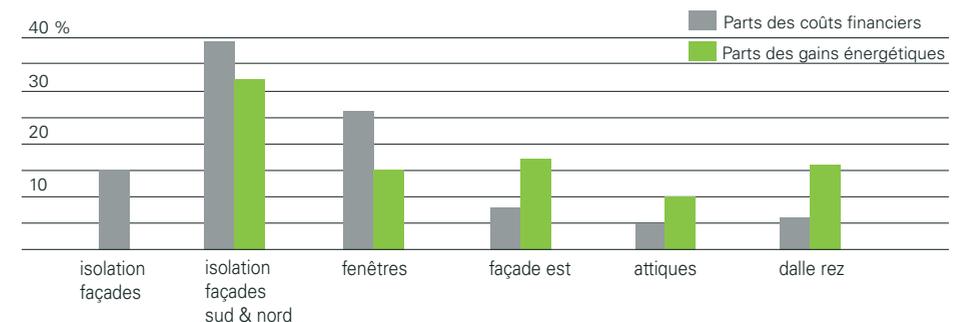
**Scénario 2:** il reprend les mesures prévues du scénario 1 en y ajoutant le remplacement des fenêtres par des cadres bois-métal avec verre isolant triple pour permettre d'atteindre la valeur-limite. Il apporte un gain énergétique de 230.4 MJ/m<sup>2</sup>, soit 69%.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des scénarios.



Graphique des coûts financiers de chaque scénario répartis par éléments.



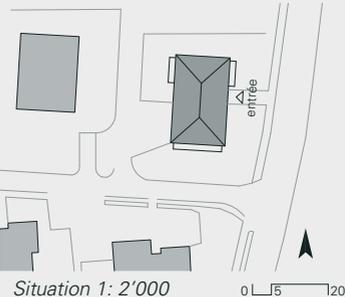
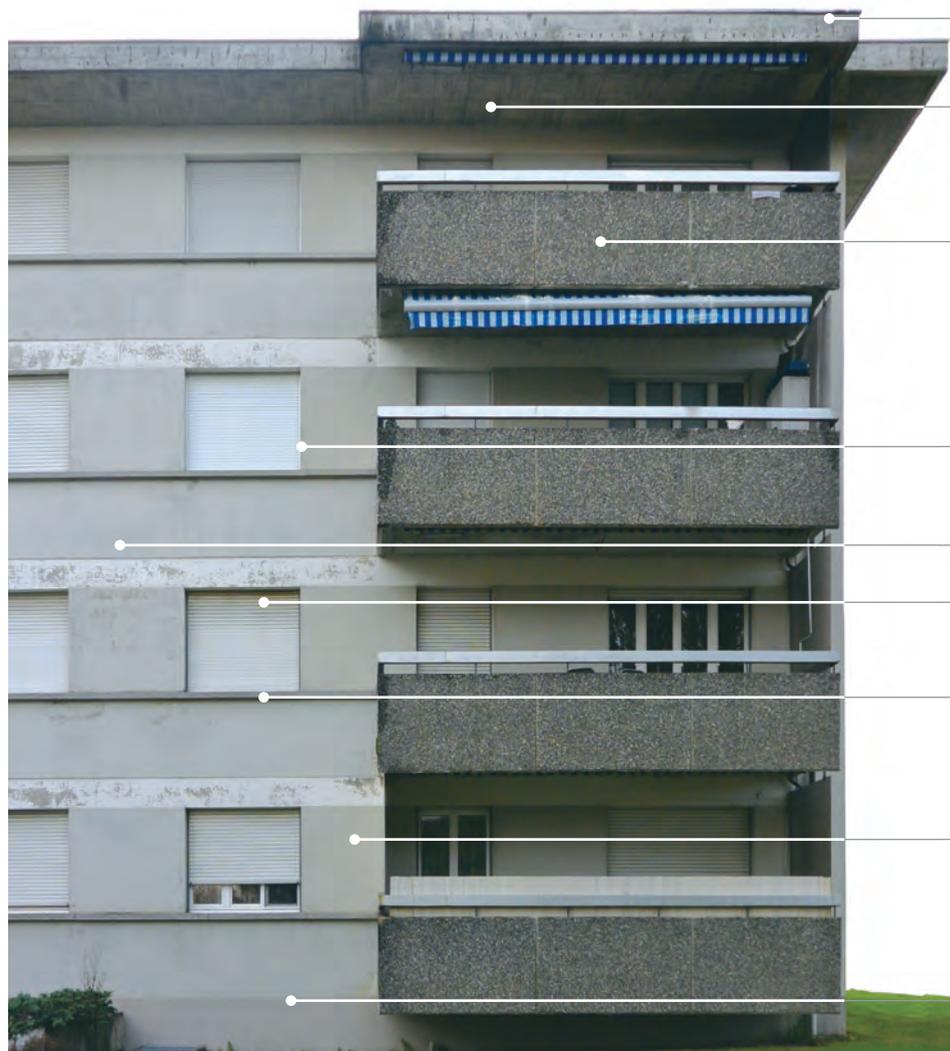
Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention pour le scénario 2.

## CONCLUSION

Les scénarios proposés permettent de conserver les principales caractéristiques architecturales du bâtiment. La façade se développant en retrait par rapport au premier plan des balcons, elle offre la possibilité d'intervenir de manière plus «classique» sur ce bâtiment, à savoir en isolant par l'extérieur, sans toutefois supprimer les ponts thermiques liés à la continuité des dalles entre les balcons et l'intérieur des appartements, mais en diminuant les risques de condensation ainsi que les pertes thermiques. Le premier scénario est le plus cohérent sur le plan économique mais ne permet pas de répondre aux exigences de la norme SIA 380/1. Le deuxième scénario le permet, mais au prix d'investissements financiers plus conséquents.

## CARACTÉRISTIQUES

Situé dans une commune à l'ouest de Lausanne, l'immeuble non-contigu, est implanté sur une grande parcelle entourée de plusieurs bâtiments d'habitation hétéroclites. Les quatre étages de trois appartements, reposent sur un rez-de-chaussée partiellement enterré dans lequel s'organisent les locaux techniques, les garages et un espace commercial. La construction est simple et économique. Tous les appartements possèdent des balcons en saillie réalisés avec une dalle en béton en porte-à-faux. Un garde-corps métallique surmonte les parapets en béton lavé préfabriqués. Les tablettes continues en ciment et les linteaux en béton peint lient les fenêtres et soulignent l'horizontalité du volume. Les murs de façade crépis d'une trentaine de centimètres d'épaisseur sont composés d'un mur porteur extérieur en brique et d'un doublage intérieur. Quelques centimètres de laine de verre entre les deux servent d'isolation thermique. Les porte-à-faux de la dalle des combles en béton armé servent d'isolant-toit. Ils permettent d'intégrer un chéneau encaissé et atténuent la visibilité d'une toiture en pente couverte de tuiles. Seule la partie de la dalle contre le terrain du local commercial est « isolée » avec deux centimètres de liège. Les fenêtres ont été remplacées récemment par des châssis en PVC avec un double verre isolant. Les ouvertures sont obscurcies par des volets à rouleau montés dans un caisson intérieur.



<b>Année de construction</b>	1972
<b>Surface bâtie [m<sup>2</sup>]</b>	358
<b>Nombre de logements</b>	15
<b>Nombre de commerces</b>	1
<b>Surface référence énergétique (SRE) [m<sup>2</sup>]</b>	1'446
<b>Surface d'enveloppe développée [m<sup>2</sup>]</b>	1'625
<b>Facteur de forme</b>	1.02
<b>Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]</b>	204'648
<b>Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	334
<b>Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	328
<b>Production de chaleur</b>	Chaudière à mazout
<b>Distribution de chaleur</b>	Radiateurs avec vannes thermostatiques

- toiture**  
à faible pente couverte de tuiles
- dalle des combles**  
en béton armé, isolation ultérieure par-dessus, porte-à-faux pour l'avant-toit
- espace extérieur**  
balcon en porte-à-faux avec dalle en béton armé et garde-corps en béton lavé
- embrasure**  
crépie
- dalle d'étage**  
béton armé
- protection solaire**  
volets à rouleau avec caisson intérieur
- bandeau**  
tablette en ciment
- mur de façade**  
maçonnerie crépie avec une faible isolation (2 à 6 cm) et doublage intérieur
- dalle sur sous-sol**  
béton armé sans isolation  
*Extrait de la façade ouest.*

### Mur de façade

U<sub>mes</sub> existant: 0.52 W/m<sup>2</sup>K (±14%)

Ucal existant: 0.56 W/m<sup>2</sup>K

Ucal rénové: 0.15 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 35 + 180 mm
- . Enduit 8 mm
- . Briques T.C. creuses 180 mm
- . Isolation laine minérale 40 mm
- . Pare-vapeur, feuille alu
- . Briques T.C. creuses 60 mm
- . Enduit plâtre ~6 mm

### Mur de façade socle

Ucal existant: 0.70 W/m<sup>2</sup>K

Ucal rénové: 0.30 W/m<sup>2</sup>K

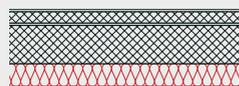


- . Enduit 8 mm
- . Béton armé 250 mm
- . Laine minérale (démontée)
- . Pare-vapeur (démonté)
- . Briques T.C. creuses (démontées)
- . Enduit plâtre ~6 mm (démonté)
- . Isolation 120 mm
- . Pare-vapeur

### Dalle sur locaux non-chauffés

Ucal existant: 1.52 W/m<sup>2</sup>K

Ucal rénové: 0.28 W/m<sup>2</sup>K



- . Revêtement sol ~10 mm
- . Chape ciment 60 mm
- . Sous-couche séparation
- . Béton armé 170 mm
- . Isolation 100 mm

### Dalle sur terrain (commerces)

Ucal existant: 1.40 W/m<sup>2</sup>K



- . Revêtement sol ~10 mm
- . Liège 20 mm
- . Etanchéité
- . Béton armé 80 mm
- . Empierrement 150 mm

### Toiture, dalle des combles

Ucal existant: 0.49 W/m<sup>2</sup>K

Ucal rénové: 0.15 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 120 + 80 mm
- . Pare-vapeur
- . Isolation 60 mm (démontée)
- . Dalle béton armé 170 mm
- . Enduit plâtre ~6 mm

### Fenêtres

U<sub>g</sub> existant: 1.1 W/m<sup>2</sup>K

U<sub>f</sub> existant: 2.0 W/m<sup>2</sup>K

g existant: 0.55

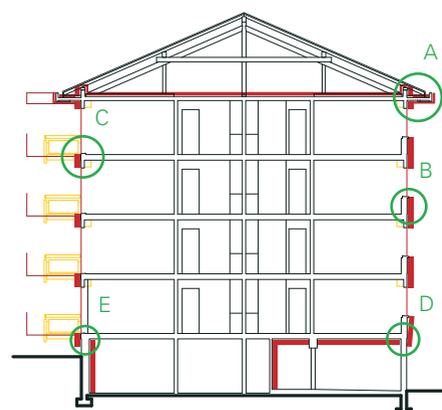
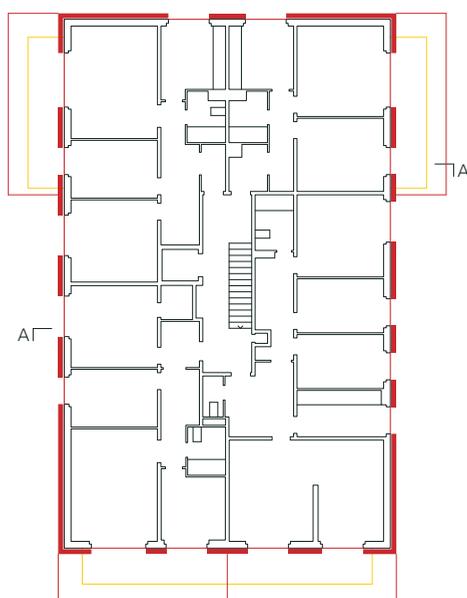
U<sub>g</sub> rénové: 0.7 W/m<sup>2</sup>K

U<sub>f</sub> rénové: 1.1 W/m<sup>2</sup>K

g rénové: 0.6

## STRATÉGIE D'INTERVENTION

Le contexte bâti et les caractéristiques architecturales peu marquantes du bâtiment ont conduit à proposer une nouvelle enveloppe pour le bâtiment. Elle modifie entièrement l'aspect du bâtiment et améliore ses performances énergétiques. Elle enveloppe les quatre étages supérieurs du bâtiment. Les locaux non-chauffés du rez-inférieur ne sont pas isolés. Seuls les murs du local commercial sont isolés à l'intérieur. Les balcons sont remplacés par de nouveaux éléments indépendants de la construction. Ils offrent un espace extérieur plus généreux à chaque appartement et permettent la résolution des ponts thermiques des dalles en béton armé.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°1. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Murs:** une isolation en fibres de bois de 180 mm + 35 mm est posée à l'extérieur des 4 étages supérieurs. Elle est revêtue d'un bardage en bois ventilé. Une isolation en verre cellulaire est posée à l'intérieur des murs du local commercial. Les murs contre les espaces non-chauffés du rez-de-chaussée sont isolés avec 120 mm de laine minérale.

**Dalle sur sous-sol et combles:** une isolation de 120 + 80 mm en laine minérale remplace l'isolation existante de 60 mm posée sur la dalle des combles. Une isolation de 100 mm en laine minérale est posée sous la dalle sur rez-de-chaussée dans les locaux non-chauffés. L'isolation de la dalle inférieure du local commercial n'est pas renforcée.

**Espaces extérieurs:** les dalles continues en béton armé des balcons existants sont sciées. Les balcons sont démontés et remplacés par de nouveaux éléments dissociés de la façade et structurellement indépendants.



Façade sud



Combles



Balcons sud

## DÉTAILS – SCÉNARIO 1

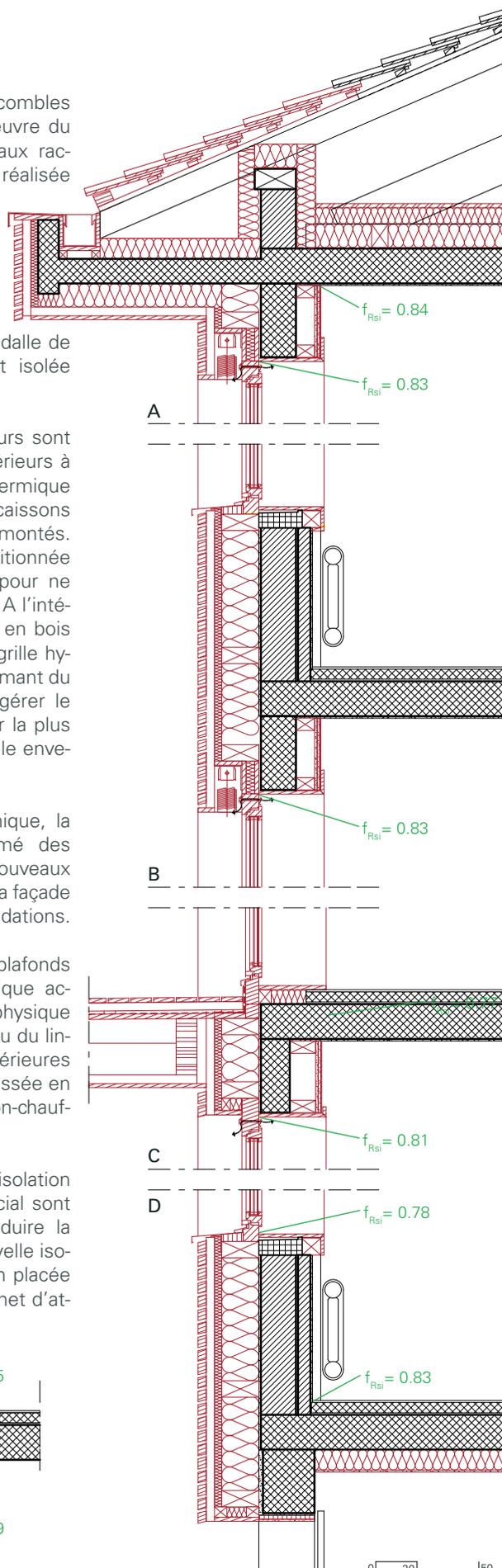
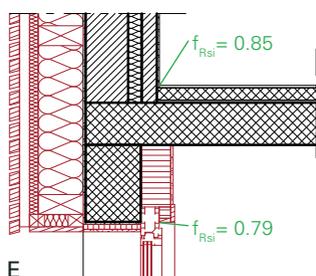
A L'isolation existante des combles est démontée. La mise en oeuvre du pare-vapeur et de l'isolation aux raccords de la sablière doit être réalisée soigneusement. L'importante épaisseur d'isolation nécessite la modification de l'escalier escamotable d'accès. Afin d'éviter une température de surface trop faible dans l'angle intérieur, la dalle de l'acrotère en béton armé est isolée par-dessus et par-dessous.

B Les volets à rouleau intérieurs sont remplacés par des stores extérieurs à lamelles pour éviter le pont thermique des caissons de store. Les caissons de store intérieurs sont démontés. La nouvelle fenêtre est positionnée à l'extérieur du mur porteur pour ne pas réduire le vide de lumière. A l'intérieur, une nouvelle embrasure en bois reprend les irrégularités. Une grille hygro-réglable insérée dans le dormant du cadre de fenêtre permet de gérer le renouvellement d'air réduit par la plus grande étanchéité de la nouvelle enveloppe.

C Pour réduire le pont thermique, la dalle continue en béton armé des balcons est sciée. Les nouveaux balcons sont indépendants de la façade et portent sur leurs propres fondations.

D Une isolation est posée aux plafonds des garages. Un pont thermique acceptable du point de vue de la physique du bâtiment demeure au niveau du linteau en béton. Les parois intérieures du hall d'entrée du rez-de-chaussée en contact avec des espaces non-chauffés sont isolées.

E Le doublage intérieur et l'isolation des façades du local commercial sont démontés afin de ne pas réduire la surface avec la pose de la nouvelle isolation. Une isolation de 20 mm placée sous le linteau de fenêtre permet d'atténuer le pont thermique.



### Raccord façade / dalle des combles

- . Panneau d'aggloméré, 22 mm
- . Ossature, isolation laine minérale,  $\lambda = 0.034$  W/mK, 80 mm
- . Ossature, isolation laine minérale,  $\lambda = 0.035$  W/mK, 120 mm
- . Pare-vapeur
- . Isolation 60 mm et panneaux agglomérés (démontés)
- . Dalle en béton armé 170 mm
- . Enduit plâtre 6 mm

### Caisson de store

- . Bardage bois 40 mm
- . Lattage bois 40 mm
- . Store à lamelles extérieur
- . Cadre de fenêtre bois isolé 75 mm
- . Linteau en béton armé 170 mm
- . Caisson store intérieur (démonté)
- . Lattage bois 90 mm
- . Panneau de plâtre fibré 2x10 mm
- . Lissage plâtre

### Contre-coeur façade

- . Bardage bois 40 mm
- . Lattage bois 40 mm
- . Isolation coupe-vent en fibres de bois,  $\lambda = 0.047$  W/mK, 35 mm
- . Ossature, isolation fibres de bois  $\lambda = 0.038$  W/mK, 180 mm
- . Enduit extérieur 8 mm
- . Briques T.C. creuses 180 mm
- . Briques T.C. creuses 60 mm
- . Enduit plâtre 6 mm

### Façade

- . Bardage bois 40 mm
- . Lattage bois 40 mm
- . Isolation coupe-vent en fibres de bois,  $\lambda = 0.047$  W/mK, 35 mm
- . Ossature, isolation fibres de bois  $\lambda = 0.038$  W/mK, 180 mm
- . Enduit extérieur 8 mm
- . Briques T.C. creuses 180 mm
- . Isolation laine de verre 40 mm
- . Pare-vapeur feuille alu
- . Briques T.C. creuses 60 mm
- . Enduit plâtre 6 mm

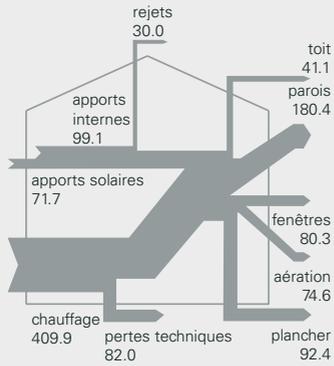
### Façade local commercial (E)

- . Enduit extérieur 8 mm
- . Béton armé 250 mm
- . Isolation laine de verre 40 mm (démontée)
- . Pare-vapeur feuille alu (démonté)
- . Briques T.C. creuses 60 mm (démontées)
- . Enduit plâtre 6 mm (démonté)
- . Isolation verre cellulaire  $\lambda = 0.040$  W/mK, 120 mm
- . Crépi 7 mm

### Dalle sur locaux non-chauffés

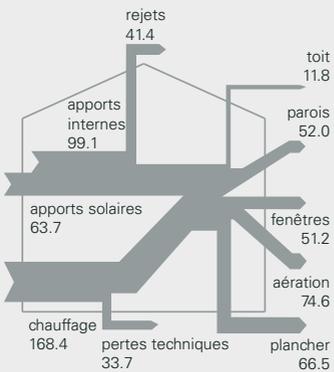
- . Parquet collé 10 mm
- . Chape ciment 60 mm
- . Couche de séparation
- . Dalle en béton armé 170 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.035$  W/mK, 100 mm
- . Crépi 7 mm

Coupe de la façade ouest et extrait coupe de la façade sud du scénario 1.



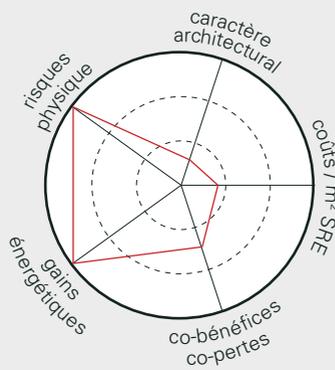
**EXISTANT** Diagramme de Sankey en [MJ/m<sup>2</sup>]. La valeur limite SIA 380/1 est de 140 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chaleur de chauffage sont de 3279 MJ/m<sup>2</sup>.

Part des pertes par les ponts thermiques: 15.1% (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



**SCÉNARIO 1** Diagramme de Sankey en [MJ/m<sup>2</sup>]. La valeur limite SIA 380/1 est de 141.3 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chaleur de chauffage sont de 134.7 MJ/m<sup>2</sup>.

Part des pertes par les ponts thermiques: 11.4% (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



**ÉVALUATIONS des scénarios.** Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

**Coût total (T.T.C.):**  
Scénario 1: 1'715'000 CHF

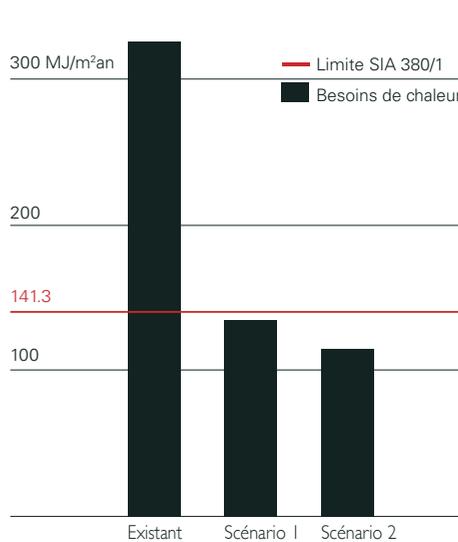
**Coût / m<sup>2</sup> de SRE (T.T.C.):**  
Scénario 1: 1'155 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments (T.T.C.):**  
Toiture: 340 CHF  
Façades:  
avec les balcons 1'515 CHF  
sans les balcons 1'165 CHF

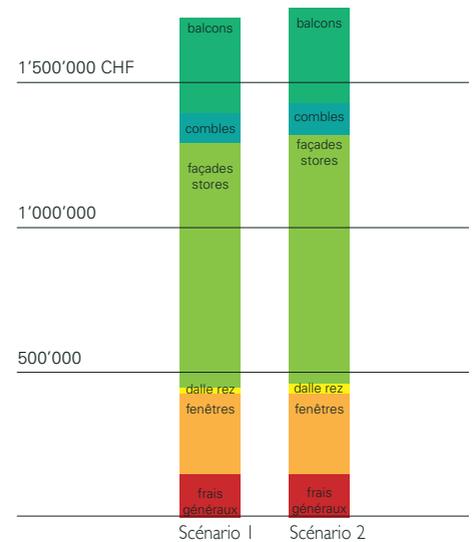
## LES SCÉNARIOS

**Scénario 1:** il intègre le remplacement des fenêtres, l'isolation extérieure des murs, l'isolation intérieure des murs du rez-de-chaussée, l'isolation de la dalle des combles, l'isolation de la dalle et des murs contre les espaces non-chauffés. Le scénario atteint la valeur-limite SIA 380/1. Il apporte un gain énergétique de 193.2 MJ/m<sup>2</sup>, soit une amélioration de 59 %.

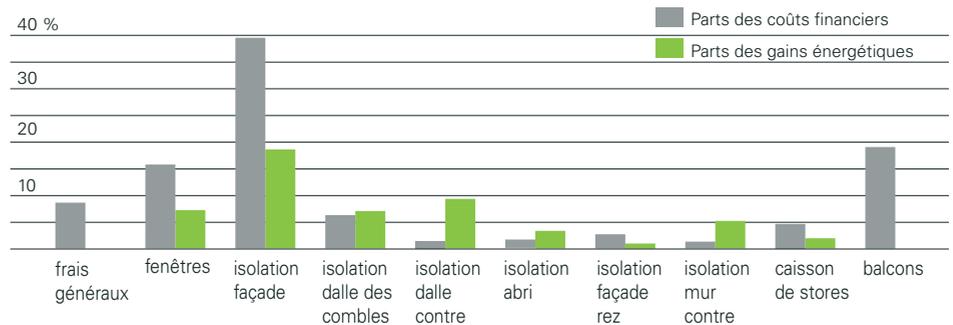
**Scénario 2:** il reprend le scénario 1 et intègre l'isolation des murs et du plafond de l'abri. Ce scénario n'a pas été retenu car cette isolation ne s'avère pas nécessaire pour atteindre la valeur-limite SIA 380/1. De plus l'isolation de l'abri doit être démontable. Avec un besoin de chaleur pour le chauffage de 115,5 MJ/m<sup>2</sup>, il apporterait une amélioration énergétique de 65 %.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des différents scénarios.



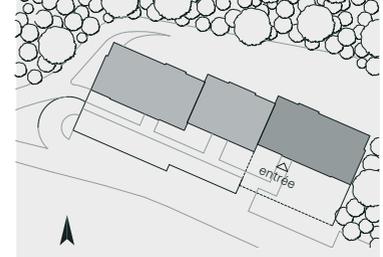
Graphique des coûts financiers de chaque scénario répartis par éléments.



Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention.

## CONCLUSION

L'architecture du bâtiment est intégralement modifiée. Une importante amélioration énergétique est mise en oeuvre avec une nouvelle enveloppe extérieure. Le scénario atteint ainsi aisément la limite de la norme SIA 380/1. Une isolation deux fois plus épaisse a été jugée inappropriée car elle n'apportait qu'un gain énergétique supplémentaire de 2,8%. L'option de ne pas intégrer l'ensemble des locaux au volume isolé nécessite une isolation des murs intérieurs et des plafonds du rez-de-chaussée situés contre des espaces non-chauffés. Les ponts thermiques sont fortement réduits en remplaçant les balcons et les stores existants, ce qui représente une part importante des coûts, près de 24%, pour un gain énergétique d'environ 2%. Cependant les balcons plus généreux offrent une plus-value aux appartements. Les coûts de l'isolation des planchers sont faibles, ils se limitent à l'investissement de l'isolation des plafonds des garages. Les planchers du rez-de-chaussée ne sont pas isolés. Cette approche qui modifie le caractère du bâtiment est retenue dans la plupart des projets actuels. Nous l'avons intégrée à notre étude pour que cette dernière ne fasse pas l'impasse sur un choix actuellement en vogue mais les critères de définition actuels de la qualité architecturale sont susceptibles de changer.



Situation 1: 2'000

0 5 20

<b>Année de construction</b>	1975
<b>Surface bâtie [m<sup>2</sup>]</b>	379
<b>Nombre de logements</b>	65
<b>Surface référence énergétique (SRE) [m<sup>2</sup>]</b>	5'065
<b>Surface d'enveloppe développée [m<sup>2</sup>]</b>	4'206
<b>Facteur de forme</b>	0.73
<b>Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]</b>	862'021
<b>Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	468
<b>Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	330
<b>Production de chaleur</b>	Chaudière à mazout
<b>Distribution de chaleur</b>	Radiateurs avec ou sans vannes thermostatiques

**toiture**

plate, dalle en béton armé sans isolation (isolation ultérieure posée par-dessus)

**mur de façade**

béton armé apparent avec une faible isolation (2 à 4 cm) et un doublage intérieur

**dalle d'étage**

béton armé avec tête de dalle apparente

**protection solaire**

volets à rouleau avec caisson intérieur

**espace extérieur**

balcons en saillie, dalle de béton armé en porte-à-faux, garde-corps métallique

**protection solaire**

stores à lamelles

Extrait de la façade sud-ouest.

**CARACTÉRISTIQUES**

L'immeuble est implanté en périphérie de la ville de Fribourg, sur un terrain en forte déclivité à la lisière d'une forêt. Il termine un ensemble de trois unités de hauteur variable qui s'assemblent avec un léger glissement en plan pour former une barre. Il comprend douze étages d'appartements, quatre étages partiellement enterrés dont trois accueillent des appartements et un sous-sol. Les 65 appartements s'organisent autour d'un noyau de circulation verticale en façade nord. Les façades nord et sud contrastent par leur langage architectural. Au nord, la façade apparaît austère avec ses multiples alignements de percements, sans balcons ni espaces de vie. Au sud, l'expression massive des façades construites en béton structuré est animée par les généreux balcons en porte-à-faux. Les garde-corps sont en aluminium avec un remplissage en verre coloré. L'expression des dalles en béton souligne les étages en façade. Elles reposent sur les murs porteurs extérieurs en béton apparent, doublés d'une isolation en laine de verre de quelques centimètres et d'un galandage de plâtre. Les stores à rouleau obscurcissent les fenêtres, tandis que des stores à lamelles sont installés aux portes-fenêtres. Une isolation a été posée il y a quelques années sur la toiture plate recouverte de gravier. La dalle de toiture en saillie est réalisée en béton et se termine par un acrotère. Les fenêtres, composées d'un châssis en bois et de deux verres non isolés, ont été partiellement remplacées.

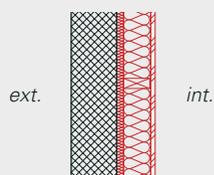


### Mur de façade

U<sub>mes</sub>: 0.46 W/m<sup>2</sup>K (±13%)

Ucal existant: 0.45 W/m<sup>2</sup>K

Ucal rénové: 0.19 W/m<sup>2</sup>K

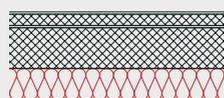


- . Béton apparent 200 mm
- . Isolation 60 mm (démontée)
- . Pare-vapeur aluminium (démonté)
- . Doublage plâtre 60 mm (démonté)
- . Enduit plâtre ~3 mm (démonté)
- . Isolation 30 + 120 mm
- . Pare-vapeur

### Dalle sur sous-sol

Ucal existant: 2.57 W/m<sup>2</sup>K

Ucal rénové: 0.20 W/m<sup>2</sup>K



- . Parquet
- . Chape ciment ~60 mm
- . Couche séparation
- . Dalle béton armé 180 mm
- . Isolation 140 mm

### Toiture, dalle des combles

Ucal existant: 1.0 W/m<sup>2</sup>K

Ucal rénové: 0.15 W/m<sup>2</sup>K



- . Etanchéité
- . Isolation 160 mm
- . Barrière-vapeur
- . Chape ciment 60 mm
- . Etanchéité
- . Couche séparation liège ~20 mm
- . Dalle béton armé 180 mm
- . Enduit plâtre ~6 mm

### Fenêtres

U<sub>g</sub> existant: 3.2 W/m<sup>2</sup>K

U<sub>f</sub> existant: 2.1 W/m<sup>2</sup>K

g existant: 0.75

U<sub>g</sub> rénové: 0.6 W/m<sup>2</sup>K

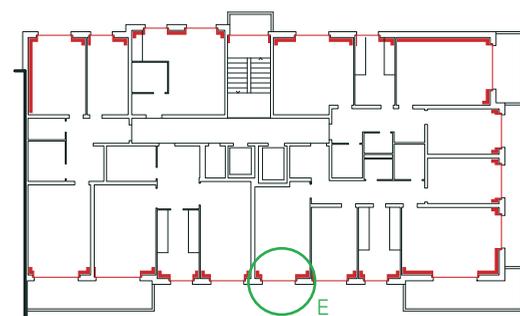
U<sub>f</sub> rénové: 1.1 W/m<sup>2</sup>K

g rénové: 0.67

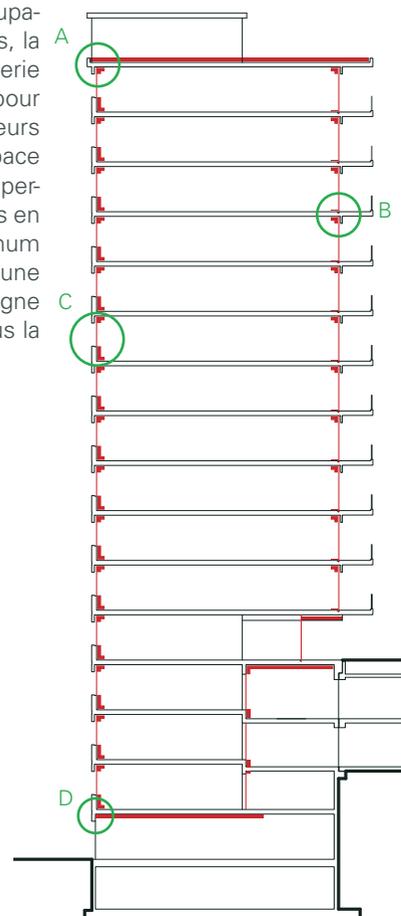
- . Cadre rénové en PVC ou bois
- . Verre isolant double rénové ou deux verres sans isolation d'origine
- . Cadre en bois
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION

Afin de conserver l'enveloppe en béton apparent structuré présentant des qualités de résistance et de durabilité intéressante, la stratégie d'intervention propose la mise en place d'éléments intérieurs en bois isolés. L'intervention intérieure permet une flexibilité des travaux selon les appartements et selon leur occupation. Les éléments intègrent les prises électriques, la fenêtre, le store, la ventilation, le chauffage, la galerie à rideau. Leur profondeur de 40 cm, nécessaire pour atténuer les ponts thermiques inférieurs et supérieurs au raccord de la dalle, permet d'accueillir un espace de rangement. Le grand nombre de logements permet d'envisager une préfabrication de ces modules en série afin d'obtenir une qualité de réalisation optimum du point de vue de la physique du bâtiment et une réduction des coûts. Cette intervention s'accompagne d'une isolation sur la toiture plate existante et sous la dalle des logements en contact avec les garages.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.



## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Murs:** le doublage en plâtre et la faible isolation intérieure existante sont démontés afin de ne pas perdre trop de surface. Ils sont remplacés par des éléments en bois isolés avec 30 + 120 mm d'épaisseur de laine minérale. Dans les étages partiellement enterrés, une isolation de 160 mm de laine minérale est posée contre les murs des garages en contact avec les espaces chauffés.



Façade nord-est

**Dalle sur sous-sol et combles:** La mise en œuvre de 160 mm d'isolation polystyrène extrudé sur la toiture existante est possible sans devoir rehausser les acrotères. La hauteur des garages permet de mettre en place 140 mm de laine minérale sous les dalles situées contre les logements.



Toiture

**Espaces extérieurs:** aucune intervention sur les balcons n'est réalisée. Les murs et le plafond de l'espace d'entrée sont doublés avec une isolation de 160 mm de laine minérale recouverte d'un bardage en bois ventilé.



Balcons sud-ouest

## DÉTAILS – SCÉNARIO 2

A L'épaisseur d'isolation sur la toiture de 160 mm respecte les 25 mm de hauteur de retenue d'eau au sommet de l'acrotère. L'étanchéité sur l'acrotère doit être fermée et résister au UV.

B Aucune intervention extérieure n'étant prévue, la mise aux normes de la hauteur de la balustrade dépend du cadre légal local.

La continuité de la dalle en béton du balcon crée une interruption de l'isolation intérieure. Des retours d'isolation de 400 mm de profondeur et 60 mm d'épaisseur au-dessus et au-dessous de la dalle sont nécessaires pour atténuer le pont thermique. Une grille de ventilation hygro-réglable est insérée dans la surhauteur du cadre de la fenêtre.

C-E Les façades exposées à la pluie battante doivent être protégées contre les infiltrations d'eau par capillarité. Si nécessaire, un traitement hydrofuge, incolore non filmogène, est possible. Un pare-vapeur hygrovariable est recommandé afin de permettre à l'humidité éventuellement accumulée de s'évacuer. L'étanchéité à l'air doit être soigneusement exécutée. Une liste de finition, posée ultérieurement, permet de réaliser un collage et un raccord étanche du pare-vapeur aux dalles et murs existants. Afin d'éviter une convection d'air possible entre le mur en béton et l'isolation lors de la mise en place de l'élément; une isolation de 30 mm de laine minérale est préalablement mise en œuvre contre les murs et la dalle. Les passages de conduites de chauffage à travers le pare-vapeur restent un point délicat. L'isolation du caisson de store doit recouvrir le haut du cadre de fenêtre afin d'éviter une température de surface trop basse à l'angle du cadre et du panneau de fermeture du caisson de store.

D Une isolation résistante au feu est placée au plafond des garages.



### Raccord façade / dalle toiture

- . Gravier 50 mm
- . Étanchéité
- . Isolation polystyrène extrudé,  $\lambda = 0.029 \text{ W/mK}$ , 160 mm
- . Barrière-vapeur 3 mm
- . Chape ciment, 60 mm
- . Liège, 20-30 mm
- . Béton armé, 180 mm
- . Enduit plâtre, 7 mm
- . Isolation d'angle en polyuréthane rigide, doublée d'un pare-vapeur,  $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$ , 30 x 100 cm, 20 à 3 mm

### Dalle de terrasse

- . Carrelage 10 mm
- . Chape de pente en ciment., 60 mm
- . Béton armé apparent 180 mm

### Raccord mur / dalle

- . Béton armé 180 mm
- . Isolation laine minérale sur 400 mm de profondeur,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 60 mm
- . Pare-vapeur à diffusion d'humidité variable permettant l'assèchement
- . Panneau multiplis, 21 mm
- . Grille de ventilation hygro-réglable dans la surhauteur de cadre

### Caisson de store

- . Béton armé apparent 150 mm
- . Vide pour store
- . Panneau fibres tendres 20 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 60 mm
- . Pare-vapeur à diffusion d'humidité variable permettant l'assèchement
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Panneau multiplis, 21 mm
- . Grille de ventilation hygro-réglable dans la partie du caisson de store

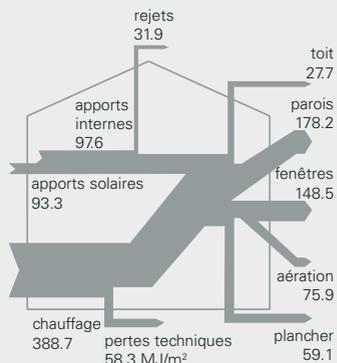
### Dalle sur espace non-chauffé

- . Parquet collé ~10 mm
- . Chape ciment 60 mm
- . Couche séparation
- . Béton armé apparent 180 mm
- . Isolation laine minérale incombustible avec couche de laine de bois liée au ciment de 1 mm,  $\lambda = 0.034 \text{ W/mK}$ , 140 mm

### Mur de façade

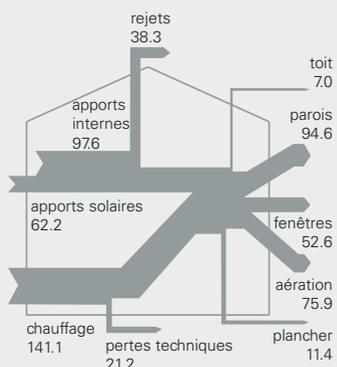
- . Béton armé apparent 200 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 30 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 120 mm
- . Pare-vapeur à diffusion d'humidité variable permettant l'assèchement
- . Panneau multiplis, 21 mm

Extrait de plan du 2<sup>e</sup> étage et extrait de coupe de la façade sud-ouest du scénario 2.



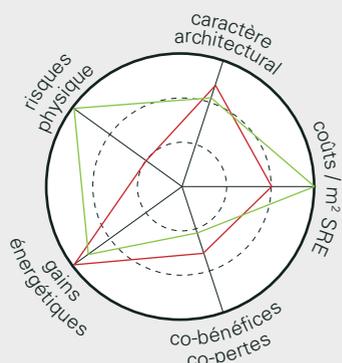
**EXISTANT** Diagramme de Sankey en [MJ/m²]. La valeur limite SIA 380/1 est de 121.0 MJ/m² et les besoins de chaleur de chauffage sont de 330.4 MJ/m².

Part des pertes par les ponts thermiques: 15.3% (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



**SCÉNARIO 2** Diagramme de Sankey en [MJ/m²]. La valeur limite SIA 380/1 est de 121 MJ/m² et les besoins de chaleur de chauffage sont de 119.9 MJ/m².

Part des pertes par les ponts thermiques: 38.3% (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



— scénario 1 — scénario 2  
**ÉVALUATIONS des scénarios.** Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

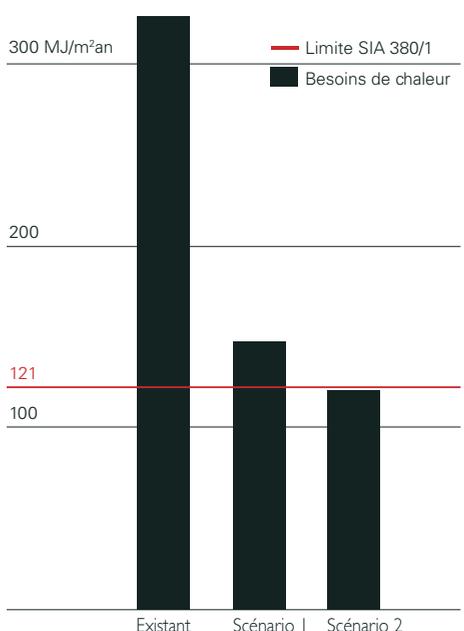
**Coût total (T.T.C.):**  
 Scénario 1: 1'725'000 CHF  
 Scénario 2: 4'055'000 CHF

**Coût / m² de SRE (T.T.C.):**  
 Scénario 1: 340 CHF  
 Scénario 2: 800 CHF

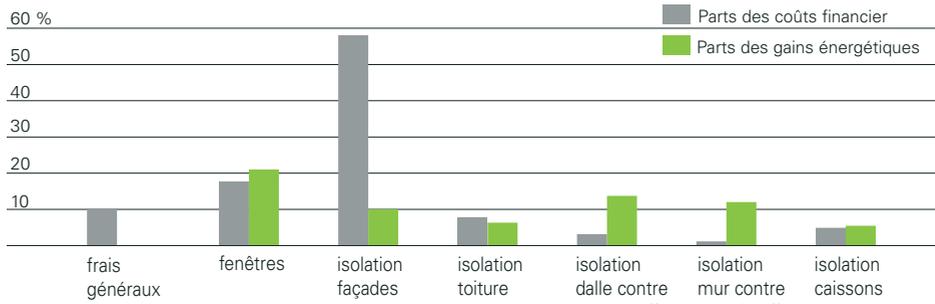
**Coût / m² d'éléments (T.T.C.):**  
 Toiture: 760 CHF  
 Façades:  
 scénario 2: 1'130 CHF  
 Dalle sur espace non-chauffé:  
 330 CHF

## LE SCÉNARIO

**Le scénario 1:** intègre la mise en place de vannes thermostatiques, le remplacement des fenêtres, l'isolation de la toiture et des dalles contre les espaces non-chauffés, l'isolation des murs intérieurs contre les espaces non-chauffés et l'isolation du volume d'accès à la toiture. Le scénario n'atteint pas la valeur-limite SIA 380/1. Il apporte un gain énergétique de 183 MJ/m², soit une amélioration de 55 %, avec un investissement financier de 42 % du scénario 2.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des scénarios.

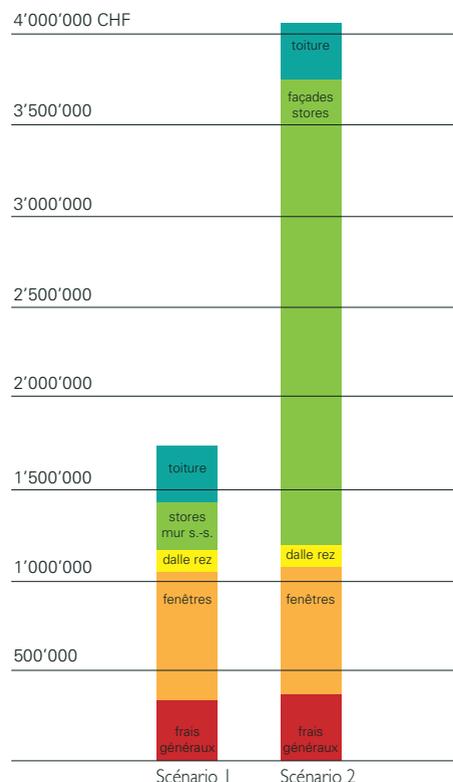


Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention.

## CONCLUSION

Les éléments d'isolation intérieurs de façade intégrant plusieurs fonctions engendrent un investissement financier important (57%) par rapport aux gains énergétiques (10%). Cependant ils offrent une plus-value fonctionnelle aux appartements, ils évitent toute intervention à l'extérieur. Sans cette mesure, le scénario 1 apporterait tout de même 86% des gains énergétiques nécessaires, avec 42% de l'investissement financier. L'importante épaisseur d'isolation intérieure en façade nécessaire pour atteindre la limite de la norme SIA 380/1 implique une étude physique approfondie et une mise en œuvre soignée des détails constructifs. Une grande part des pertes (plus de 38%) est due aux ponts thermiques des dalles en béton continues et de certains murs porteurs intérieurs. Ils sont tout de même réduits par un retour d'isolation intégré dans l'élément préfabriqué.

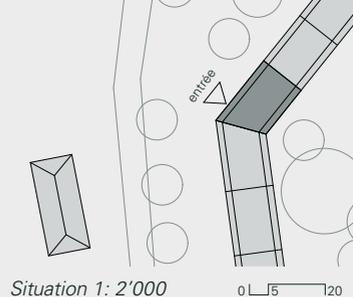
**Scénario 2:** il intègre les mesures du scénario et ajoute l'isolation intérieure des murs par des éléments multifonctionnels préfabriqués et l'isolation extérieure du volume d'entrée. Le scénario atteint juste la valeur-limite SIA 380/1 de 121.6 MJ/m². Il apporte un gain énergétique de 210 MJ/m², soit une amélioration de 64 %.



Graphique des coûts financiers répartis par éléments pour chaque scénario.

## CARACTÉRISTIQUES

Le bâtiment analysé se situe en périphérie de Genève. Il fait partie intégrante d'une grande barre pliée dont la longueur totale excède 200 mètres. Il se développe sur 9 étages et un niveau d'attique en retrait. La structure est constituée de dalles et de murs de refends en béton armé, stabilisés par un noyau de circulations verticales. Les façades, très régulières, sont composées d'éléments préfabriqués en béton (en bon état) ancrés en tête de dalle. Ces éléments biseautés (épaisseur diminuant vers l'intérieur) confèrent à la façade une structure et une épaisseur propices aux jeux d'ombre et de lumière. La façade est rythmée par de petites loggias-balcons au droit des cuisines dont les garde-corps sont en béton préfabriqué et verre. Au rez-de-chaussée, des colonnes en béton aux formes sculpturales portent le bâtiment, la façade du rez se situant en retrait de l'alignement des colonnes. Le rez-de-chaussée n'est pas habité. La toiture en pente abrite un espace de combles non-chauffés. Ce bâtiment est caractérisé par la répétition des éléments préfabriqués en série : on ne compte que deux dimensions différentes d'éléments de façade. Les caractéristiques plastiques du béton sont partout mises à l'honneur, que ce soit dans le traitement des façades, des colonnes au rez-de-chaussée ou encore des garde-corps.

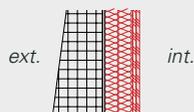


<b>Année de construction</b>	1971
<b>Surface bâtie [m<sup>2</sup>]</b>	370
<b>Nombre de logements</b>	40
<b>Surface référence énergétique (SRE) [m<sup>2</sup>]</b>	3'539
<b>Surface d'enveloppe développée [m<sup>2</sup>]</b>	2'216
<b>Facteur de forme</b>	0.65
<b>Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]</b>	503'294
<b>Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	335
<b>Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m<sup>2</sup>an)]</b>	325
<b>Production de chaleur</b>	Chaudière à distance (cadiom)
<b>Distribution de chaleur</b>	Radiateurs avec vannes thermostatiques
<b>attique</b>	en retrait de la façade, façade béton coulé
<b>cheminée</b>	béton préfabriqué
<b>espace extérieur</b>	balcons-loggia, dalle béton, garde-corps en béton préfabriqué et verre
<b>façades</b>	panneaux de béton préfabriqué
<b>dalle d'étage</b>	béton préfabriqué
<b>volet à rouleau</b>	avec caisson intérieur
<b>fenêtres</b>	d'origine, cadres bois-métal, verre isolant double
<b>colonnes champignon</b>	béton armé
<b>dalle sur sous-sol</b>	béton armé

*Extrait de la façade nord-ouest.*

### Contrecœur de façade

U<sub>mes</sub>: 1.66 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal existant: 3.59 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové v1: 0.23 W/m<sup>2</sup>K



- . Panneau de béton
- . Isolation 120 mm
- . Pare-vapeur

### Contrecœur de façade attique

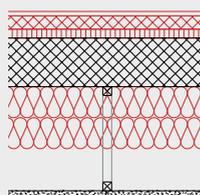
Ucal existant: 3.23 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.20 W/m<sup>2</sup>K



- . Muret en béton
- . Isolation 120 mm
- . Pare-vapeur

### Dalle sur rez-de-chaussée

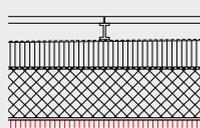
Ucal existant: 0.30 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.09 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 40 mm
- . Dalle béton
- . Isolation 280 mm
- . Panneau en laine de bois

### Terrasse de l'attique

U<sub>mes</sub>: 0.56 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal existant: 0.22 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucal rénové: 0.17 W/m<sup>2</sup>K



- . Dallettes béton sur taquets
- . Etanchéité
- . Isolation
- . Etanchéité
- . Dalle béton
- . Isolation 40 mm

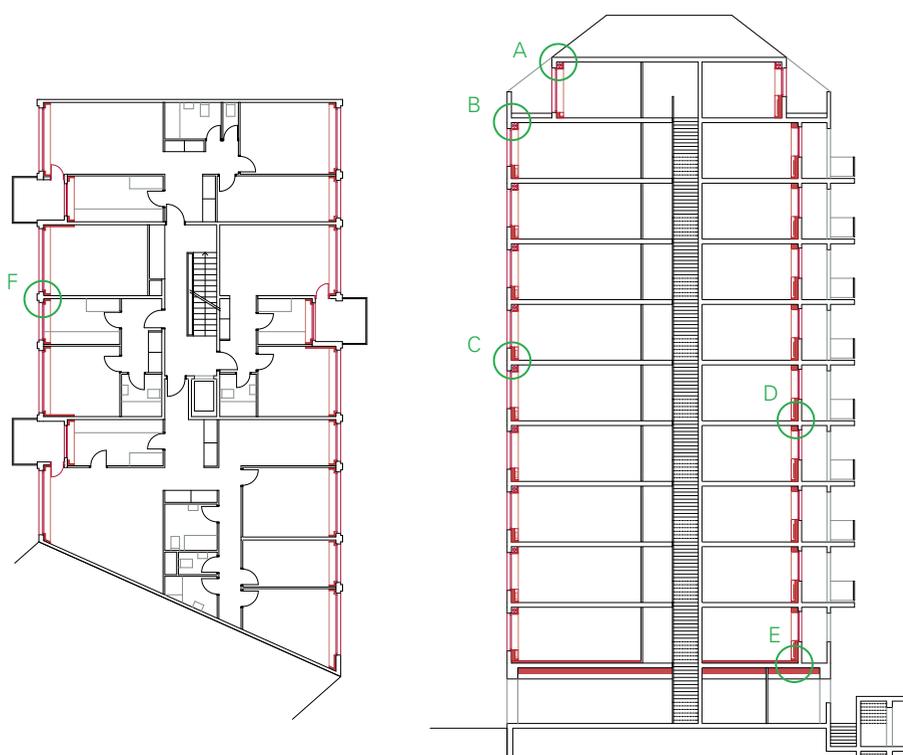
### Fenêtres

U<sub>verre</sub> existant: 3.0 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucadre existant: 1.9 W/m<sup>2</sup>K  
 g existant: 0.70  
 U<sub>verre</sub> rénové: 0.6 W/m<sup>2</sup>K  
 Ucadre rénové: 1.2 W/m<sup>2</sup>K  
 g rénové: 0.70

- . Cadres en bois-métal
- . Verre isolant double
- . Cadres en bois-métal
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION

Les caractéristiques architecturales du bâtiment (loggias, embrasures en biseaux, ouvertures dans les angles sur les loggias, corniches, attique en retrait), sa forte expressivité et la durabilité de ses éléments de façade en béton préfabriqué plaident en faveur d'une isolation par l'intérieur. La stratégie adoptée consiste à installer des éléments préfabriqués (caissons en bois isolés) sur la face intérieure de l'enveloppe et à remplacer les fenêtres d'origine par des cadres bois-métal avec des verres isolants triples. L'effet de série et la préfabrication des caissons permettent un gain de temps, d'argent et une meilleure qualité d'exécution. Cette intervention conserve intégralement l'apparence externe du bâtiment.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°1. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Façade:** des caissons en bois préfabriqués contenant une isolation de type laine minérale viennent prendre place à l'intérieur des appartements, contre la façade. Ces éléments accueillent les radiateurs et servent de supports aux nouvelles fenêtres tout en garantissant la continuité de l'isolation avec celles-ci.



Façade sud

**Dalle sur rez et combles:** la dalle des combles étant encombrée d'installations techniques, son isolation n'est pas privilégiée, d'autant que la toiture a été isolée récemment. La face inférieure de la dalle sur le rez-de-chaussée présente, quant à elle, un potentiel intéressant en terme d'isolation (faux-plafond existant).



Rez-de-chaussée

**Espaces extérieurs:** aucune intervention particulière n'est prévue tant pour les loggias que pour les terrasses de l'attique qui ont été isolées récemment. Aucun rehaussement des garde-corps n'est donc requis.



Attique

## DÉTAILS

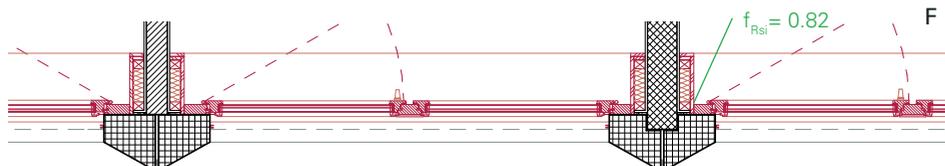
**A** En attique les caissons préfabriqués en bois prennent place en contrecœur. Les fenêtres d'origine sont remplacées par de nouvelles fenêtres bois-métal avec verre isolant triple. Le store est remplacé et isolé. L'angle entre la dalle des combles et la toiture est comblé d'isolation de type EPS.

**B** Les terrasses de l'attique ayant été rénovées récemment, il n'est pas prévu d'intervenir à cet endroit. Un retour d'isolation de type XPS est exécuté en sous face de la dalle, au niveau des plafonds des appartements afin de réduire les risques de condensation superficielle.

**C-F** Des caissons préfabriqués en bois sont montés en applique à l'intérieur des appartements. Ils sont composés d'une double couche d'isolation de type laine minérale entre ossature et leur finition est assurée par deux panneaux de bois contreplaqués. Un retour d'isolation au raccord dalle-façade et en tête de murs permet de limiter les ponts thermiques. Les stores sont remplacés et leurs caissons sont isolés. Un soin particulier devra être porté à la réalisation des raccords par couvre-joints entre les caissons préfabriqués et les structures existantes, ainsi qu'à la pose du pare-vapeur du côté chaud de l'isolation. Une variante avec un isolant en verre cellulaire pourrait être envisagée afin de diminuer les risques liés aux difficultés de mise en œuvre du pare-vapeur. Par contre, ce type d'isolant est plus cher, moins bon thermiquement et nécessite d'être posé in situ.

**D** Au niveau des balcons-loggias, l'intervention est en tous points identique. L'absence de caisson de store permet une meilleure isolation derrière le sommier.

**E** Une isolation de laine minérale de 280 mm est mise en œuvre en sous-face de la dalle sur rez, dans le faux-plafond existant. La hauteur sous plafond le permettant, une isolation type polyuréthane, une chape ciment et un nouveau parquet collé sont mis en œuvre sur la dalle du premier étage. Ce complexe permet de supprimer le risque de condensation lié au pont thermique au-dessus du sommier en béton.



### Dalle des combles

- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 100 mm
- . Dalle en béton armé 220 mm
- . Crépi de finition 10 mm
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Crépi de finition 10 mm

### Dalle de terrasse

- . Dallettes béton posées sur taquets 30 mm
- . Étanchéité bitumineuse
- . Isolation type polyuréthane,  $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$ , 100-130 mm
- . Barrière-vapeur
- . Dalle béton armé 220 mm
- . Plafond gypse 10 mm
- . Isolation polystyrène extrudé,  $\lambda = 0.03 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Crépi de finition 10 mm

### Caisson de store

- . Linteau en béton armé coulé 140 mm
- . Nouveau volet roulant
- . Panneau de bois 15 mm
- . Isolant laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 30 mm
- . Pare-vapeur
- . Isolant type laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 30 mm
- . Panneau de bois contreplaqué 15 mm

### Mur de façade

- . Panneau en béton préfabriqué 60-200 mm
- . Crépi de finition
- . Double couche d'isolant laine minérale entre construction en bois,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 2x60 mm
- . Pare-vapeur
- . Double panneau de bois contreplaqué

### Linteau sous balcon

- . Linteau en béton coulé 140 mm
- . Isolant laine minérale,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 310 mm
- . Pare-vapeur
- . Panneau de finition 15 mm

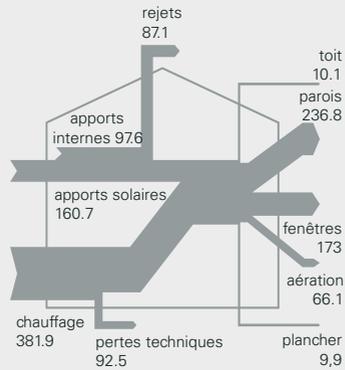
### Contrecœur sur balcon

- . Muret en béton coulé 140 mm
- . Crépi de finition
- . Double couche d'isolant laine minérale entre construction en bois,  $\lambda = 0.032 \text{ W/mK}$ , 2x60 mm
- . Pare-vapeur
- . Double panneau de bois contreplaqué

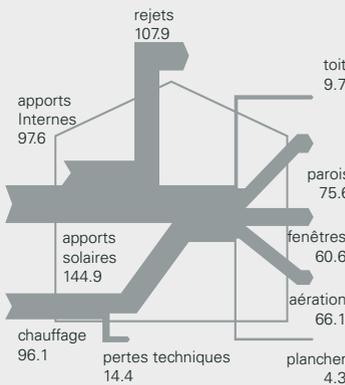
### Dalle sur rez-de-chaussée

- . Parquet collé 20 mm
- . Chape ciment flottante 60 mm
- . Isolation type polyuréthane,  $\lambda = 0.022 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Dalle béton armé
- . Isolation laine minérale entre sous-construction en bois,  $\lambda = 0.031 \text{ W/mK}$ , 2x140 mm
- . Panneau en laine de bois 30 mm

Extrait de la coupe et du plan de la façade nord présentant les propositions d'intervention

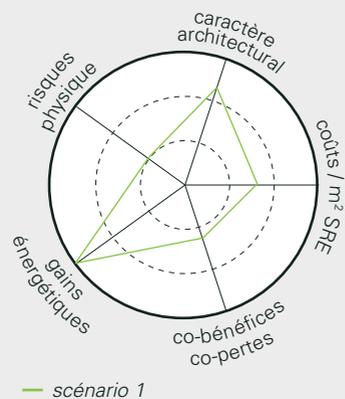


EXISTANT Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 100.0 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 324.6 MJ/m<sup>2</sup>.



SCÉNARIO 1 Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 100.0 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 81.7 MJ/m<sup>2</sup>.

Part des pertes par les ponts thermiques: 38.6 % (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



ÉVALUATIONS du scénario 1. Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

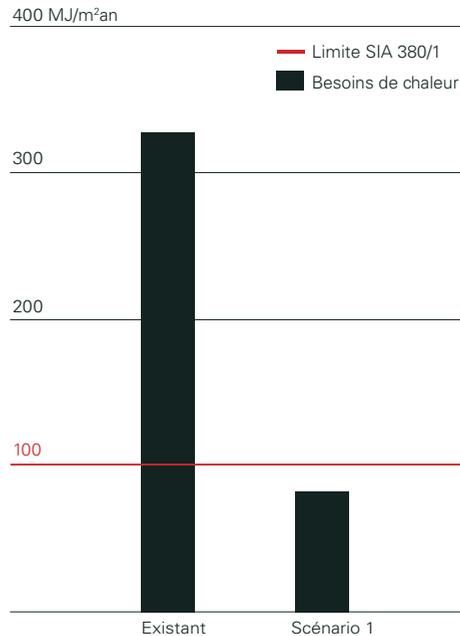
**Coûts totaux (T.T.C):**  
Scénario 1: 3'266'000 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> de SRE (T.T.C):**  
Scénario 1: 925 CHF

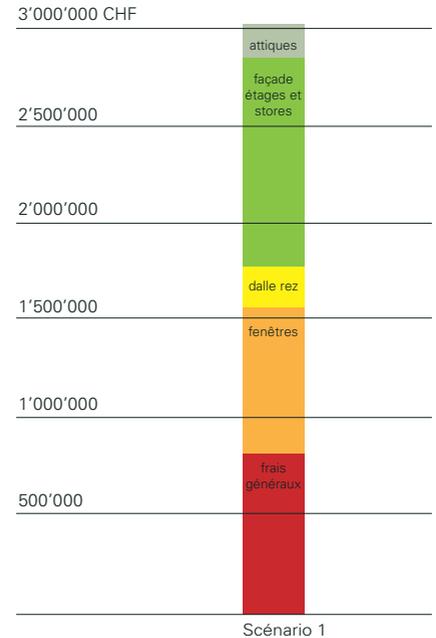
**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments (T.T.C):**  
Toiture: -  
Façades et fenêtres: 1'430 CHF  
Dalle sur espace non-chauffé: 570 CHF

## LE SCÉNARIO

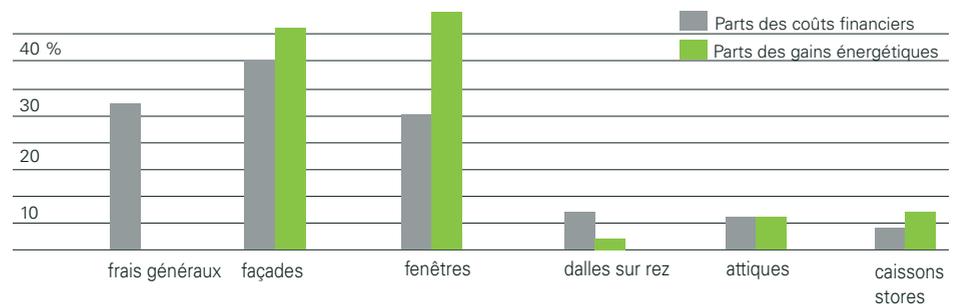
Scénario 1: il intègre l'isolation par l'intérieur des deux façades par les caissons en bois préfabriqués, l'isolation sous la dalle du premier étage, le remplacement des fenêtres d'origine, l'isolation des plafonds de l'étage sous la terrasse de l'attique, ainsi que les différents retours d'isolation pour permettre d'atteindre la valeur-limite. Il apporte un gain énergétique de 242.9 MJ/m<sup>2</sup>, soit 75%.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des scénarios.



Graphique des coûts financiers répartis par éléments.



Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention pour le scénario 1.

## CONCLUSION

L'intervention par l'intérieur est imposée par les formes complexes qu'affichent les façades. Ceci implique des coûts de réhabilitation élevés. La mise en place des caissons préfabriqués représente un coût égal à celui du remplacement des fenêtres. Le rapport entre le coût et le gain énergétique réalisé par ces deux mesures reste comparable et aucun des deux, pris individuellement, ne suffit pour atteindre les valeurs imposées par la norme SIA 380/1. Cette intervention majoritairement depuis l'intérieur nécessitera une planification fine et un soin particulier car il semble exclu de vider le bâtiment de ses occupants le temps du chantier. Le travail de préfabrication en atelier des caissons qui permet de réduire la durée d'intervention sur place prend là tout son sens. Dès lors, une attention particulière doit être portée à la conception de ce système et à son perfectionnement au travers d'un prototype avant travaux.

## CARACTÉRISTIQUES

Le bâtiment se situe au centre-ville de Genève. De plan rectangulaire (12x18m), il est mi-toyen entre un hôtel et un immeuble de logement. Les façades sur rue (nord) et sur cour (sud) présentent exactement le même aspect. L'immeuble se développe sur 6 étages et un niveau d'attique en retrait. Les deux murs mitoyens complétés par un mur intérieur de refend ainsi qu'un noyau de circulation armé supportent les dalles, le tout est en béton armé. Les façades non porteuses sont composées de cadres bois-métal à remplissage en verre vision ou émaillé (parties opaques, avec sandwich isolant de quelques centimètres). Des garde-corps en verre structuré permettent l'ouverture sur toute la hauteur d'une porte-fenêtre dans certaines chambres. Au premier plan, un quadrillage régulier de tôles laquées structure la façade. Elles accueillent des stores à lamelles orientables et cachent la tête de dalle (en horizontal) ainsi que les descentes d'eau de pluie (en vertical). L'attique et la toiture sont construits en béton armé. Le rez-de-chaussée accueille quelques espaces communs ainsi qu'un restaurant. Les parties opaques partiellement arrondies de la façade sont en béton cannelé, coulé sur place et présentent un certain intérêt. Le bâtiment n'a jamais connu d'assainissement ou de rénovation depuis sa construction. Ses façades légères sont caractéristiques d'une certaine architecture des années 1960-80.



Situation 1: 2'000

0 5 120

Année de construction	1980
Surface bâtie [m <sup>2</sup> ]	306
Nombre de logements	14
Surface référence énergétique (SRE) [m <sup>2</sup> ]	1'421
Surface d'enveloppe développée [m <sup>2</sup> ]	896
Facteur de forme	0.78
Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]	341'507
Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	595
Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	402
Production de chaleur	Chaudière à gaz
Distribution de chaleur	Radiateurs avec vannes thermostatiques

**toiture**  
plate

**attique**  
en retrait de la façade, façades béton

**mur de refend**  
en béton armé  
**store à lamelles extérieur**

**façade**  
tôle aluminium laquée

**façades**  
aluminium, verre émaillé

**fenêtres**  
cadres bois-métal, double vitrage

**dalle d'étage**  
béton armé

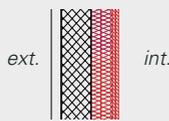
**façade rez-de-chaussée**  
béton cannelé

**dalle sur sous-sol**  
béton armé

Extrait de la façade nord.

### Mur de façade rez-de-chaussée

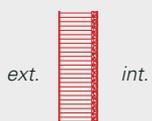
Ucal existant: 1.69 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.16 W/m<sup>2</sup>K



- . Mur béton
- . Lattage et isolation 80 mm
- . Pare-vapeur
- . Panneau bois

### Contrecoeur de façade

Umes: 0.59 W/m<sup>2</sup>K (±15%)  
Ucal existant: 0.64 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.35 W/m<sup>2</sup>K



- . Verre émaillé
- . Isolation 16 cm
- . Pare-vapeur
- . Panneau de plâtre gypse

### Terrasses attique

Ucal existant: 0.89 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.5 W/m<sup>2</sup>K



- . Revêtement de sol
- . Étanchéité
- . Isolation 110 mm
- . Pare-vapeur sur chape ciment
- . Dalle béton

### Toiture

Umes: 0.33 W/m<sup>2</sup>K (±15%)  
Ucal existant: 0.89 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.1 W/m<sup>2</sup>K



- . Étanchéité
- . Isolation 200 mm
- . Pare-vapeur
- . Dalle béton armé

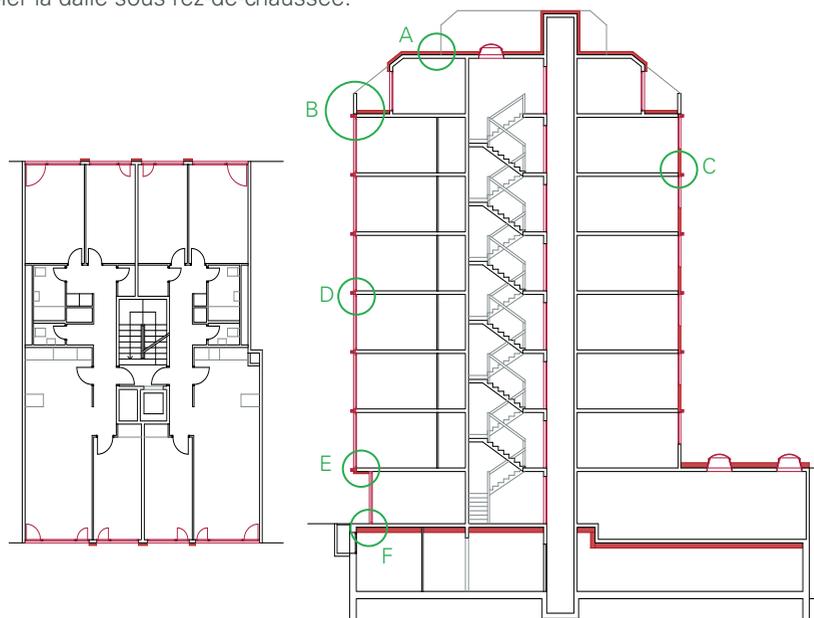
### Fenêtres

Uverre existant: 3 W/m<sup>2</sup>K  
Ucadre existant: 1.9 W/m<sup>2</sup>K  
g existant: 0.75  
Uverre rénové: 0.6 W/m<sup>2</sup>K  
Ucadre rénové: 1.2 W/m<sup>2</sup>K  
g rénové: 0.45

- . Cadres bois-métal
- . Verre isolant double
- . Cadres bois-métal
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION - SCÉNARIO 2

Les caractéristiques constructives de la façade légère rendent pratiquement impossible leur assainissement. En effet, la façade est composée d'éléments préfabriqués légers qui associent fenêtre et contrecoeur, excluant la possibilité d'intervenir de manière spécifique sur l'un d'eux. Si dans l'ensemble l'aspect de la façade mérite d'être conservé, ses qualités ne justifient toutefois pas qu'une restauration soit entreprise. La stratégie d'intervention prévoit le remplacement intégral de l'enveloppe. Planifiée correctement, cette intervention peut être exécutée en relativement peu de temps et sans devoir reloger les habitants. Le nu des toles structurant la façade est déplacé vers l'extérieur pour permettre la mise en place d'une isolation coupant le pont thermique de la tête de dalle. Il est prévu d'isoler de manière plus conséquente les terrasses d'attique et les toitures, ces éléments n'ayant jamais subi aucun assainissement. Finalement, l'intervention prévoit d'isoler la dalle sous rez-de-chaussée.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°2. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Façade principale:** les façades principales du bâtiment sont démontées et remplacées par de nouveaux cadres aluminium à rupture de pont thermique fixés entre dalles. On reprend en tous points l'expression des façades existantes, à l'exception d'une épaisseur d'isolation supérieure en contrecoeur. Cette intervention est combinée à un changement complet des fenêtres (verre isolant triple).

**Toiture et terrasses:** le scénario d'intervention privilégié prévoit d'assainir complètement les terrasses des attiques, ainsi que les toitures du bâtiment. Une nouvelle isolation sera posée afin d'augmenter les performances thermiques. Toutes les coupoles en places seront également changées afin de privilégier des modèles récents, thermiquement plus performants.

**Dalle du rez-de-chaussée:** la face inférieure de la dalle du rez, majoritairement occupée par le restaurant est isolée. Les parois verticales sont isolées depuis l'intérieur (laine minérale et pare-vapeur), ce qui permet de maintenir apparent le béton cannelé. Les vitrines et portes sont également remplacées par de nouveaux éléments en cadre bois-métal, avec un verre isolant triple.



Intérieur d'un appartement



Toiture



Entrée

## DÉTAILS - SCÉNARIO 2

**A** La toiture du bâtiment, ainsi que la toiture de la cour sur le restaurant font l'objet d'un assainissement complet, en raison de leur faible isolation thermique et leur vétusté. Un nouveau complexe d'isolation et d'étanchéité est posé sur l'étanchéité provisoire (qui fait office de barrière vapeur) du bâtiment. Le gravier existant est conservé et réutilisé pour protéger la nouvelle toiture.

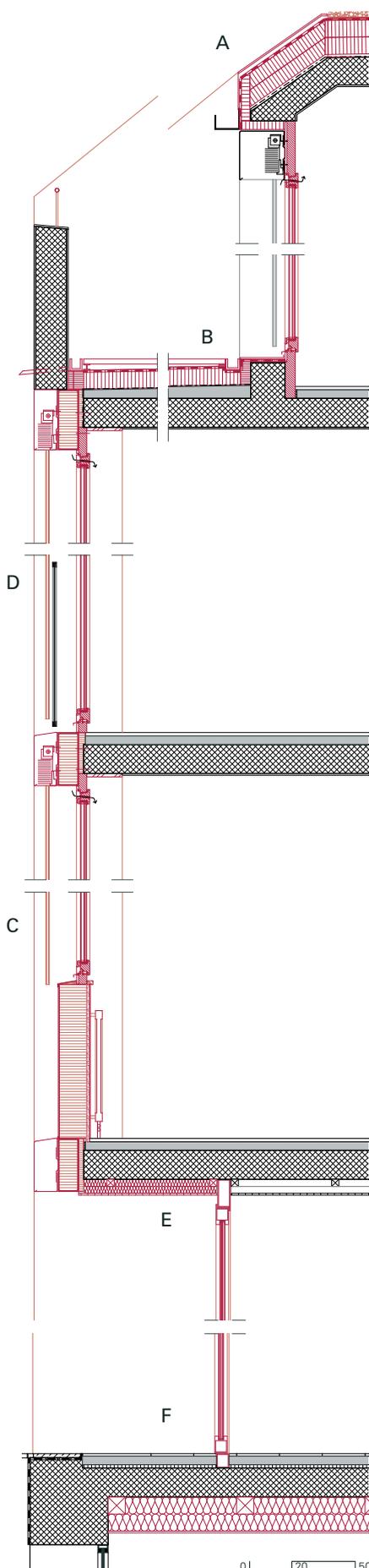
**B** Les terrasses des attiques font également l'objet d'un assainissement conséquent. Un nouveau complexe d'isolation et d'étanchéité est mis en place. Les dalles béton sont nettoyées et reposées sur les taquets.

**C** Les façades nord et sud, parfaitement identiques, font l'objet d'une même intervention. Elle consiste en la dépose complète des anciennes façades (éléments opaques et vitrés) pour mettre en place une façade complètement nouvelle. La proportion de surfaces vitrées et opaques reste identique. Les parties vitrées sont composées de fenêtres bois-métal avec un verre isolant triple alors que les éléments de contre-coeur sont faits de panneaux sandwich comprenant un verre émaillé de finition extérieure, un noyau d'isolation, une cassette aluminium et enfin un panneau de plâtre gypsé en guise de finition intérieure. La continuité thermique entre étages est assurée par la présence d'une couche isolante en tête de dalle, protégée par une tôle aluminium thermolaquée formant le nouveau caisson de store à lamelles orientables.

**D** Les porte-fenêtres battantes sont également changées, suivant le même principe qu'évoqué ci-dessous. Les garde-corps en verre peuvent être conservés.

**E** Au rez-de-chaussée, les éléments vitrés tels que vitrines et portes-fenêtres sont changés pour privilégier des cadres bois-métal, verre isolant triple. Les parties opaques (mur en béton cannelé) seront isolées de l'intérieur. Une isolation est appliquée au plafond des parties en retrait du rez-de-chaussée (entrées) afin de garantir la continuité thermique dans ces zones.

**F** La dalle sur sous-sol est isolée par le dessous pour permettre d'extraire les locaux de services et les caves du volume chauffé du bâtiment.



### Toiture

- . Gravier 30 mm
- . Sable 20 mm
- . Etanchéité multicouche
- . Isolation type polystyrène extrudé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 200 mm
- . Barrière vapeur
- . Dalle béton 170 mm
- . Plafond suspendu plaques de plâtre gypsées 25 mm

### Terrasses attiques

- . Dallettes béton sur taquets 30 mm
- . Etanchéité multicouche
- . Isolation type polystyrène extrudé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 110 mm
- . Barrière-vapeur
- . Chape ciment de pente 50-80 mm
- . Dalle béton armé 170 mm
- . Plafond enduit 10 mm

### Tête de dalle

- . Caisson de store à lamelles 130 mm
- . Isolation type laine minérale en fond de caisson de store,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 90 mm
- . Isolation type laine minérale entre équerres de support des façades,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 60 mm
- . Dalle béton armé

### Contrecoeur façade rideau

- . Verre émaillé 5 mm
- . Isolation type laine de verre dans cassette métallique,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 160 mm
- . Panneau de plâtre gypsé 20 mm
- . Radiateur

### Toiture commerce

- . Gravier 30 mm
- . Sable 20 mm
- . Etanchéité multicouche
- . Isolation type polystyrène extrudé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 250 mm
- . Barrière-vapeur
- . Dalle béton armé 170 mm
- . Faux-plafond plaques de plâtre 100 mm

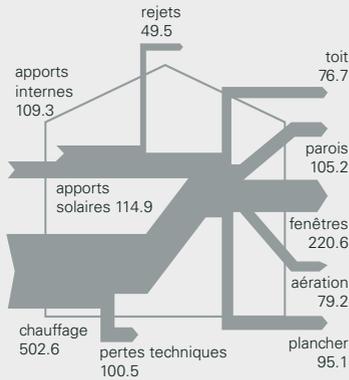
### Façade rez-de-chaussée

- . Mur béton cannelé coulé sur place 200 mm
- . Lattage horizontal et isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Lattage vertical et isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Pare-vapeur
- . Panneau de bois triplés 30 mm

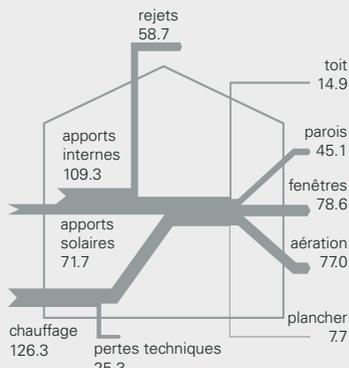
### Dalle sur sous-sol

- . Carrelage collé, 20 mm
- . Chape ciment, 50 mm
- . Isolation phonique, 30 mm
- . Dalle béton armé 170 mm
- . Panneau isolant laine de bois 50 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 200 mm
- . Crépi 10 mm

Extrait de la coupe façade rue présentant les propositions d'intervention du scénario 2.

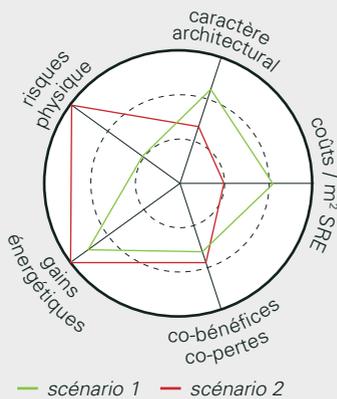


**EXISTANT** Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 121.7 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 402.1 MJ/m<sup>2</sup>.



**SCÉNARIO 2** Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 121.7 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 101.1 MJ/m<sup>2</sup>

Part des pertes par les ponts thermiques: 9.7% (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération)



**ÉVALUATIONS des scénarios.** Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

**Coûts totaux (T.T.C.):**  
Scénario 1: 1'070'500 CHF  
Scénario 2: 1'593'500 CHF

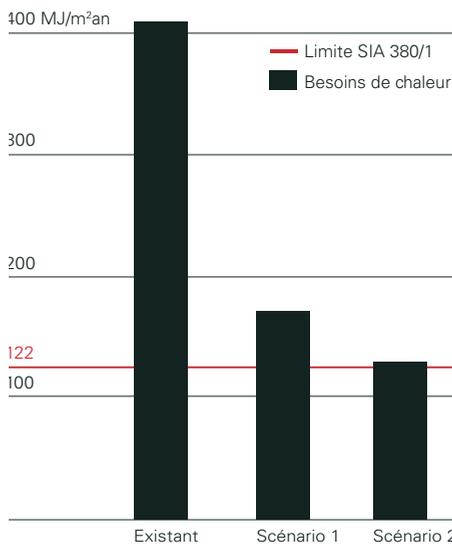
**Coût / m<sup>2</sup> de SRE (T.T.C.):**  
Scénario 1: 755 CHF  
Scénario 2: 1'085 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments (T.T.C.):**  
Toiture: 955 CHF  
Façades et fenêtres:  
Scénario 1: 725 CHF  
Scénario 2: 1'560 CHF  
Dalle sur espace non-chauffé:  
380 CHF

## LES SCÉNARIOS

**Scénario 1:** il prévoit l'isolation des deux façades principales par l'intérieur, le changement des verres de fenêtre, l'isolation des terrasses et de la toiture du bâtiment, l'isolation des façades du rez-de-chaussée par l'intérieur, l'isolation sous dalle du rez-de-chaussée. Il apporte un gain énergétique de 234 MJ/m<sup>2</sup>, soit 58%, pour un investissement de 67% des coût totaux du scénario 2.

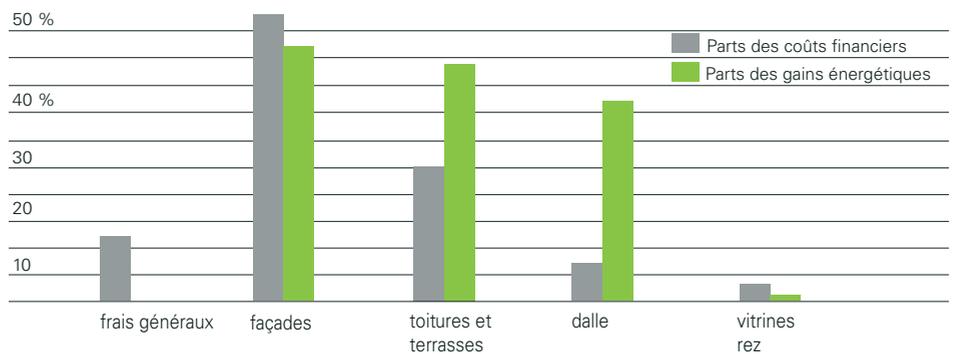
**Scénario 2:** il reprend les mesures du scénario 1 pour ce qui est de l'isolation des terrasses d'attique, de la toiture et du rez-de-chaussée. Par contre le remplacement intégral des éléments de façade est prévu. Ce scénario permet d'atteindre la valeur-limite. Il apporte un gain énergétique de 301 MJ/m<sup>2</sup>, soit 74%.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des scénarios.



Graphique des coûts financiers de chaque scénario répartis par éléments.



Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention pour le scénario 2.

## CONCLUSION

Le bilan énergétique existant de ce type d'enveloppe est mauvais: épaisseurs minimes, inertie nulle, probables infiltrations d'air. La solution consistant à remplacer intégralement l'ensemble des éléments de l'enveloppe semble la plus logique et la plus raisonnable car plus efficace et facile à mettre en œuvre. Elle permet de respecter l'expression originelle du bâtiment en proposant une nouvelle façade qui reprend presque tous ses points caractéristiques (composition, matériaux, détails architecturaux). Seule l'épaisseur du contre-cœur augmente, ce qui a pour effet de modifier légèrement le relief de la façade. Le faible poids des éléments de façade permet de limiter l'impact de leur remplacement sur les occupants. L'intervention sur la dalle sur sous-sol est la plus intéressante du point de vue du rapport investissement financier/gain énergétique, alors que l'assainissement des toitures et terrasses l'est moins. À noter encore que ce bâtiment engage une réflexion plus globale quant à la rénovation thermique d'un parc de bâtiment majeur à Genève: celui des immeubles de bureaux à façades rideau de la même époque qui sont légion.

## CARACTÉRISTIQUES

Le bâtiment étudié se situe dans un quartier résidentiel en limite du centre de Genève, à proximité d'un cordon boisé et d'une rivière. Il se présente comme un volume unique de 45 mètres de long pour une largeur de 17 mètres, caractérisé par de nombreux éléments en saillie (balcons, oriels). Les six niveaux sont construits sur un parking enterré. On compte encore un niveau d'attique en retrait, dont l'expression se détache fortement du reste du bâtiment. Au sud, à l'est et à l'ouest, de grands balcons de forme complexe, largement appropriés par les locataires animent la façade. Des murs de refend transversaux disposés entre allées, les noyaux de circulation verticale ainsi que les façades portent les dalles d'étage en béton armé. Le bâtiment, vieux de 27 ans, n'affiche que peu de signes de détérioration ou de vétusté. Les façades isolées sont protégées par des panneaux de béton préfabriqués, la toiture est entièrement couverte d'un placage en cuivre, les fenêtres et garde-corps sont en aluminium thermolaqué. L'expression architecturale et les matériaux choisis ancrent ce bâtiment dans son époque et dans son contexte : les quartiers résidentiels des années 1980.



Situation 1: 2'000

0 5 120

Année de construction	1988
Surface bâtie [m <sup>2</sup> ]	890
Nombre de logements	58
Surface référence énergétique (SRE) [m <sup>2</sup> ]	5'215
Surface d'enveloppe développée [m <sup>2</sup> ]	3'600
Facteur de forme	0.84
Consommation moyenne d'énergie [KWh/an]	752'312
Besoins de chauffage «relevé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	341
Besoins de chauffage «calculé» [MJ/(m <sup>2</sup> an)]	317
Production de chaleur	Chaudière à gaz
Distribution de chaleur	Radiateurs avec vannes thermostatiques

### toiture

en pente, en cuivre

### attique

en retrait de la façade principale, façade en cuivre

### espaces extérieurs

balcons, dalle béton, garde-corps en verre et acier peint

### façade

béton préfabriqué

### volet à rouleau

avec caisson intérieur

### fenêtres

cadres bois-métal, double vitrage

### dalle d'étage

béton armé

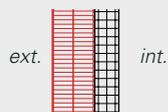
### dalle sur sous-sol

béton armé

Extrait de la façade ouest.

### Contrecoeur loggias sud

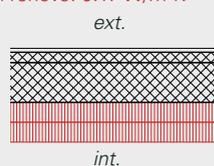
Ucal existant: - W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.17 W/m<sup>2</sup>K



- . Isolation 200 mm
- . Pare-vapeur
- . Élément béton préfabriqué 120 mm

### Dalle rez-de-chaussée

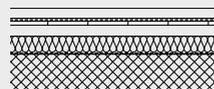
Ucal existant: 2.18 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal rénové: 0.17 W/m<sup>2</sup>K



- . Carrelage sur chape
- . Dalle béton
- . Isolation 200 mm

### Toiture

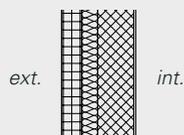
Umes: 0.41 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal existant: 0.39 W/m<sup>2</sup>K



- . Couverture cuivre
- . Lambrissage sur lattage
- . Isolation
- . Dalle béton

### Mur de façade

Umes: 0.43 W/m<sup>2</sup>K  
Ucal existant: 0.43 W/m<sup>2</sup>K



- . Panneau de béton préfabriqué
- . Isolation
- . Mur béton armé

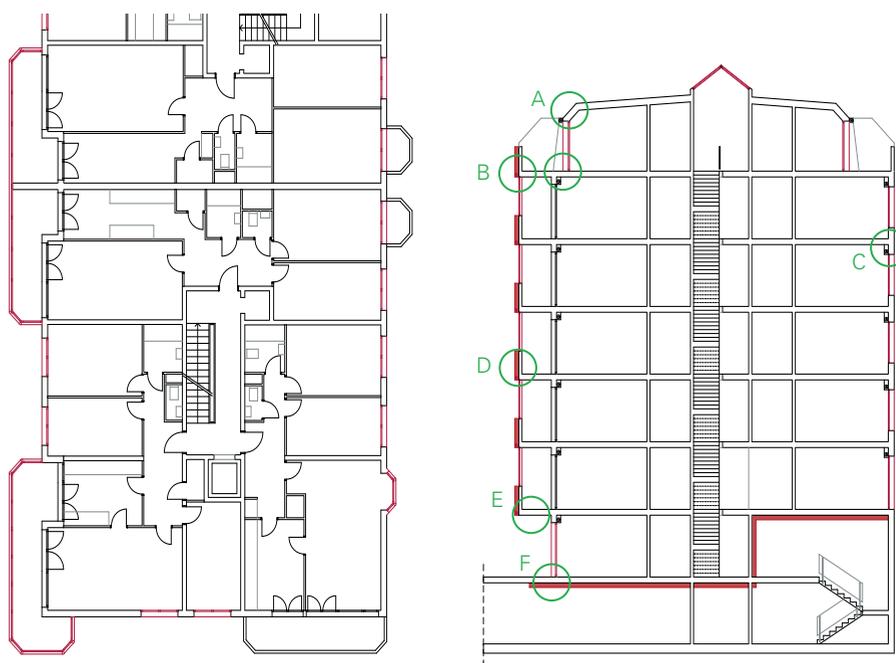
### Fenêtres

Uverre existant: 3 W/m<sup>2</sup>K  
Ucadre existant: 1.9 W/m<sup>2</sup>K  
g existant: 0.75  
Uverre rénové: 0.6 W/m<sup>2</sup>K  
Ucadre rénové: 1.1 W/m<sup>2</sup>K  
g rénové: 0.45

- . Cadres bois-métal
- . Verre isolant double
- . Cadres bois-métal
- . Verre isolant triple

## STRATÉGIE D'INTERVENTION - SCÉNARIO 2

La stratégie d'intervention consiste à fermer les grands balcons en façade sud par de larges baies vitrées. Ce qui a aussi comme conséquence d'augmenter la SRE du bâtiment. Les fenêtres qui ne sont pas en lien avec un balcon, ou celles qui le sont mais dont le balcon n'est pas en façade sud, seront remplacées. Il est prévu d'isoler le sous-sol du volume chauffé des logements (dalle du rez avec éventuel déplacement des réseaux et murs du premier sous-sol). La toiture, relativement récente et de construction durable, n'est pas sujette à assainissement. Seuls les coupoles et verrières sont changées pour privilégier des éléments plus performants.



Plan et coupe schématiques. En rouge, les éléments de l'enveloppe isolés dans le scénario d'intervention n°2. En vert, les raccords caractéristiques du bâtiment.

## INTERVENTIONS PAR ÉLÉMENTS

**Façade principale:** la fermeture des balcons en façade sud a été retenue. Elle permet de régler des questions assez complexes liées à la géométrie des balcons et de la façade. Les balcons sont fermés par des baies vitrées coulissantes et les parties pleines des garde-corps sont isolées de l'extérieur ce qui permet de couper le pont thermique de la dalle.

**Sous-sol:** le sous-sol est à demi enterré. Il comprend des logements en partie sud du premier sous-sol et des locaux non chauffés au nord et au deuxième sous-sol. Il est prévu de séparer distinctement ces deux zones par une isolation thermique autant horizontalement que verticalement, afin de garantir une continuité thermique autour du volume chauffé.

**Attiq ue et toiture:** en attique, la seule intervention préconisée consiste en un remplacement des fenêtres existantes par des modèles plus performants, à cadres bois-métal, verre isolant triple. La toiture est conservée en l'état, car déjà isolée et ne présentant que peu de signes de vétusté. Les verrières seront changées pour privilégier des éléments plus performants.



Balcon, façade sud



Sous-sol



Toiture

## DÉTAILS - SCÉNARIO 2

**A** La toiture et les terrasses du bâtiment sont conservées en l'état (bon état et caractère durable de leur construction). Ce choix s'inscrit également dans la cohérence économique du projet: l'assainissement de ces parties du bâtiment engagerait des moyens hors de proportion en regard du gain énergétique réalisé.

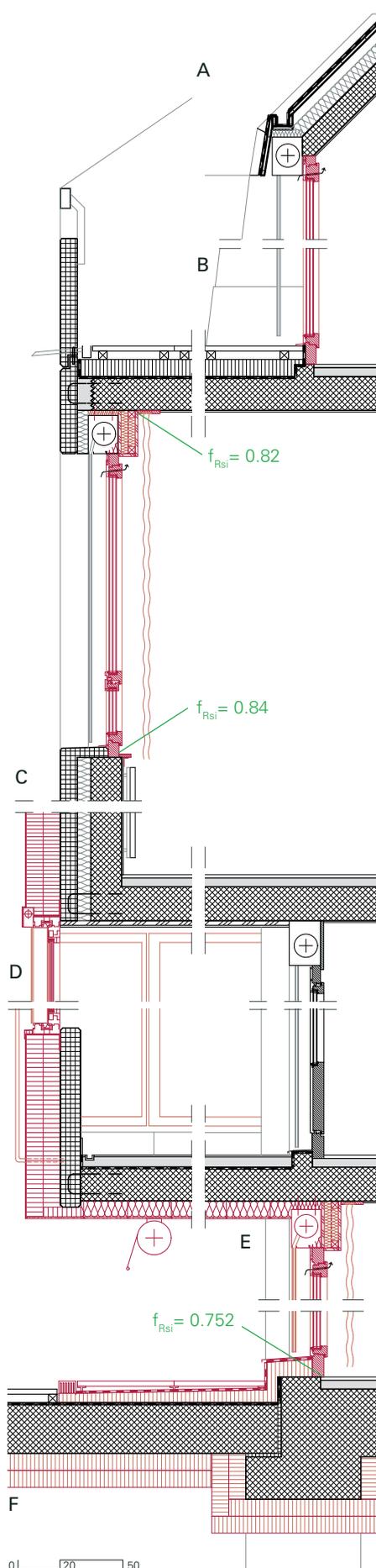
**B** En attique, l'intervention se fait comme aux étages: les fenêtres existantes sont changées au profit de nouvelles fenêtres à cadres bois-métal, verre isolant triple.

**C** Aux étages courants, toutes les fenêtres des façades est, nord et ouest ainsi que les fenêtres en façade sud qui ne donnent pas sur un balcon sont remplacées par de nouvelles fenêtres à cadre bois-métal, verre isolant triple. Les caissons de stores sont maintenus et isolés. La finition se fait grâce à un panneau de bois. Une grille hygro-réglable permet de gérer le renouvellement d'air réduit par la nouvelle enveloppe étanche.

**D** En façade sud, la surface habitable des appartements est étendue aux balcons de par la fermeture de ces derniers pour en faire des loggias fermées. Les murets en béton préfabriqués sont isolés par l'extérieur, dans la continuité des fenêtres. Les fenêtres d'origine qui séparent cette loggia de l'appartement peuvent être conservées en l'état, créant ainsi une zone tampon augmentant la capacité d'isolation du bâtiment. Les stores toiles à projection existants sont remplacés par des stores toiles verticaux qui prennent place en façade, dans un caisson au-dessus des menuiseries métalliques.

**E** Au niveau des jardins, les fenêtres de rez-de-chaussée sont remplacées par des fenêtres à cadres bois-métal, verre isolant triple. Les plafonds des balcons sont isolés par de la laine minérale protégée par un faux-plafond en plâtre hydrofuge.

**F** Les locaux de service et les caves sont extraits du volume chauffé par une isolation au plafond de la dalle sur sous-sol. Cette opération est rendue possible de par le fait que les réseaux sont positionnés de manière rationnelle et sont souvent suspendus sous la dalle sans interférence avec le nouvel isolant, permettant une mise en oeuvre facilitée de ce dernier.



### Toiture

- . Couverture cuivre
- . Lambrissage de support 20 mm
- . Lattage (ventilation) 60 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.055 \text{ W/mK}$ , 80 mm
- . Barrière-vapeur
- . Dalle béton armé 180 mm
- . Plafond gypse 10 mm

### Terrasses

- . Dalles béton 30 mm
- . Taquets de support 40 mm
- . Isolation polyuréthane,  $\lambda = 0.029 \text{ W/mK}$ , 100 mm
- . Etanchéité bitumineuse
- . Dalle béton armé 200 mm
- . Plafond crépi 10 mm

### Caisson de store

- . Façade béton préfabriqué 100 mm
- . Isolation type laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 80 mm
- . Volant roulant 180 mm
- . Panneau de bois, 20 mm
- . Isolation type laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Pare-vapeur
- . Isolation type laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 40 mm
- . Panneau de bois de finition 20 mm

### Contre-cœur étage courant

- . Façade béton préfabriqué 100 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 80 mm
- . Muret béton armé 180 mm
- . Enduit de finition 10 mm
- . Radiateur

### Contre-cœur loggias sud

- . Crépi minéral
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 20 mm
- . Pare-vapeur
- . Parapet en béton préfabriqué 100 mm

### Dalle balcon premier étage

- . Carrelage collé 10 mm
- . Chape ciment 60 mm
- . Etancité
- . Dalle béton armé 200 mm
- . Isolation laine minérale,  $\lambda = 0.04 \text{ W/mK}$ , 100 mm
- . Revêtement placo-plâtre hydrofuge gypse 10 mm

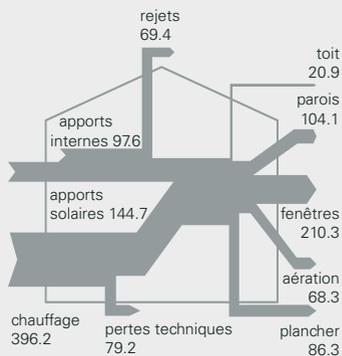
### Dalle rez-inférieur, pied de façade

- . Carrelage collé 10 mm
- . Chape ciment 60 mm
- . Dalle béton armé 200 mm
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 200 mm

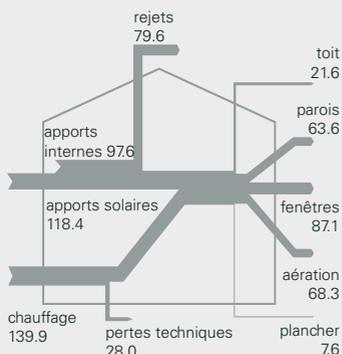
### Dalle rez-inférieur, pied de façade

- . Dalles béton 30 mm
- . Taquets de pose 40 mm
- . Isolation polyuréthane,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 70-50 mm
- . Etanchéité bitumineuse (barrière vapeur)
- . Dalle béton armé 200 mm
- . Isolation polystyrène expansé,  $\lambda = 0.036 \text{ W/mK}$ , 200 mm

Extrait des coupes des façades nord et sud présentant les propositions d'intervention.

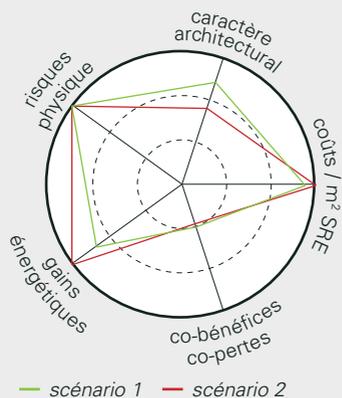


**EXISTANT** Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 116.1 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 317.0 MJ/m<sup>2</sup>.



**SCENARIO 2** Diagramme de Sankey en MJ/m<sup>2</sup>. La valeur limite SIA 380/1 est de 116.1 MJ/m<sup>2</sup> et les besoins de chauffage sont de 111.9 MJ/m<sup>2</sup>.

Part des pertes par les ponts thermiques: 18.2 % (si l'on ne tient pas compte des pertes par aération).



**ÉVALUATIONS des scénarios.** Un résultat optimal devrait tendre vers une forme circulaire extérieure, sans point faible évident.

**Coûts totaux (T.T.C.):**  
Scénario 1: 3'033'000 CHF  
Scénario 2: 2'708'000 CHF

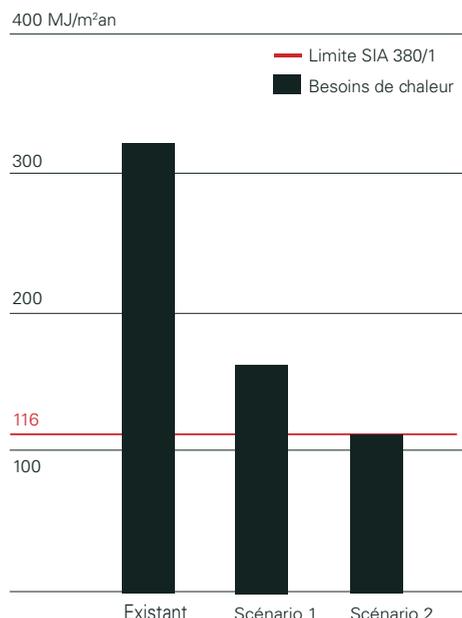
**Coût / m<sup>2</sup> de SRE (T.T.C.):**  
Scénario 1: 580 CHF  
Scénario 2: 520 CHF

**Coût / m<sup>2</sup> d'éléments (T.T.C.):**  
Toiture: -  
Façades et fenêtres:  
Scénario 1: 685 CHF  
Scénario 2: 580 CHF  
Dalle sur espace non-chauffé:  
325 CHF

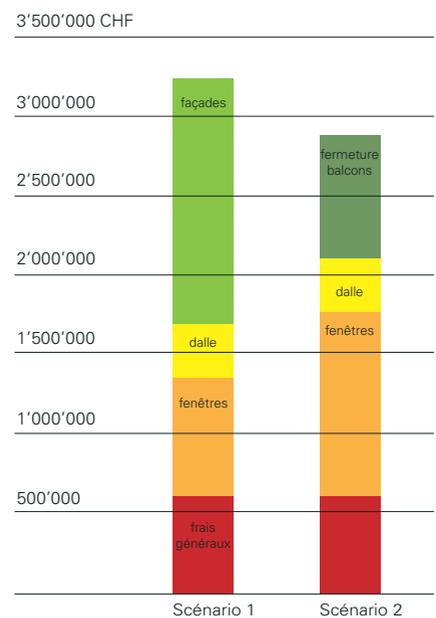
## LES SCÉNARIOS

**Scénario 1:** il intègre le remplacement des verres existants par de nouveaux verres isolants doubles, l'isolation intérieure des façades, l'isolation de la dalle sur sous-sol. Il apporte un gain énergétique de 156 MJ/m<sup>2</sup>, soit 49%, pour un investissement de 112% des coûts totaux du scénario 2. En plus de son coût élevé, il est difficile à mettre en œuvre.

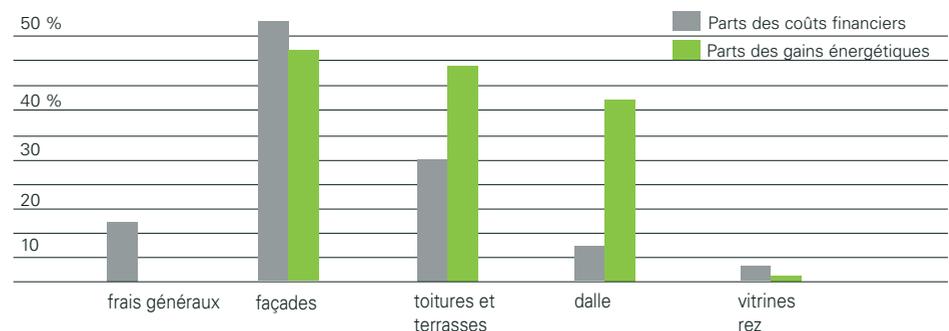
**Scénario 2:** il intègre la fermeture des balcons en façade sud, le remplacement de toutes les autres fenêtres, l'isolation de la dalle et des murs contre sous-sol pour permettre d'atteindre la valeur-limite. Il apporte un gain énergétique de 205 MJ/m<sup>2</sup>, soit 65%.



Graphique des besoins de chaleur de l'état existant et des scénarios.



Graphique des coûts financiers de chaque scénario répartis par éléments.



Graphique représentant la part des coûts et les gains énergétiques par mesure d'intervention pour le scénario 2.

## CONCLUSION

Les grands balcons et la géométrie complexe qui caractérise généralement ce type d'immeuble rend compliqué une intervention avec une isolation périphérique, sans compter le fait que les façades existantes en béton préfabriqué présentent une très bonne durabilité. Le scénario propose une intervention qui modifie sensiblement l'aspect du bâtiment, en façade sud pour le moins, mais qui a comme avantage de conserver le caractère durable des matériaux utilisés dans la construction dans un environnement assez contraignant (humidité, forêt, etc.). Le remplacement des fenêtres existantes, inévitable pour répondre aux normes thermiques, est un point discuté en raison du bon état général des fenêtres d'origine qui n'ont pas atteint leur limite de durée de vie, d'autant que ce poste constitue l'investissement principal du bouquet d'interventions proposé. D'autres mesures beaucoup plus modestes en terme d'investissement, comme l'isolation de la dalle sur sous-sol, contribuent de manière importante à l'augmentation de la performance énergétique de l'immeuble.