



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Recherche énergétique

Rapport final du 22 janvier 2018

COMPARE RENOVE : du catalogue de solutions à la performance réelle des rénovations énergétiques

Ecarts de performance, bonnes pratiques
et enseignements tirés





Date : 22 janvier 2018

Lieu : Genève

Mandant :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche Bâtiments et villes
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement :

Office cantonal de l'énergie (Genève)
Swiss Competence Center for Energy Research
on Future Energy Efficient Buildings & Districts (SCCER FEEB&D)
Services industriels de Genève (SIG)

Mandataires :

Université de Genève
Groupe Systèmes Energétiques – Institut des sciences de l'environnement (ISE) et Département F.-A.
Forel des sciences de l'environnement et de l'eau (DEFSE)
Boulevard Carl-Vogt 66, CH-1205 Genève
www.unige.ch/energie/

Auteurs :

Jad Khoury, Université de Genève
Pierre Hollmuller, Université de Genève
Bernard Lachal, Université de Genève
Stefan Schneider, Université de Genève
Ursula Lehmann, Université de Genève

Responsable de domaine de l'OFEN : Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Chef de programme de l'OFEN : Rolf Moser, moser@enerconom.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/500973-01

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Résumé

Cette étude s'intéresse à la rénovation énergétique d'immeubles d'habitation collectifs construits après-guerre, dans une perspective d'identification des pratiques actuelles et de leur amélioration possible. Elle s'inscrit en cela dans l'accompagnement à la mise en œuvre de la Stratégie Energétique 2050.

Le premier volet concerne l'analyse, en termes de performances énergétique, économique et environnementale, de 26 opérations de rénovation, regroupant plus de 3'000 logements et totalisant une surface de référence énergétique d'environ 285'000 m². La demande de chauffage en conditions réelles d'utilisation est comparée à la valeur prévue, calculée en conditions standard d'utilisation. L'écart de performance est analysé par simulation numérique, ce qui permet de quantifier le potentiel réaliste d'optimisation et de donner des recommandations dans ce sens. La possibilité de mettre effectivement en œuvre une telle optimisation est explorée sur la base de 2 études de cas spécifiques. Au niveau économique, les rénovations sont analysées en termes de coûts à plus-value énergétique, à partir desquels nous déterminons le coût du kWh économisé et de la tonne de CO₂ évitée.

En complément, les deux volets suivants concernent des solutions d'efficacité énergétique spécifiques, que nous analysons sur la base d'études de cas en usage réel.

La première solution concerne la fermeture de balcons existants en loggias (chaudes ou froides). La performance de cette solution est analysée d'une part en termes de fonctionnement intrinsèque, d'autre part en termes d'utilisation faite par les habitants, en particulier en ce qui concerne l'ouverture des fenêtres.

La deuxième solution concerne la récupération de chaleur sur air vicié pour le préchauffage de l'ECS, via une pompe à chaleur. Nous analysons la performance des installations avec ou sans préchauffage solaire, ainsi qu'avec du complément PV. En se basant sur un grand nombre de simulations numériques, nous élaborons des recommandations et règles de pré-dimensionnement pour de tels systèmes.

Summary

This study focuses on energy retrofit of post-war multifamily residential buildings, in view of characterizing and improving of common practices. It thereby aims to contribute to the implementation of the Energy Strategy 2050.

The first part concerns the energy, economic and environmental assessment of 26 retrofit operations, totaling 3'000 flats and 285'000 m² heated area. The space heating demand in real conditions of use is compared to the projected value, calculated in standard conditions of use. The performance gap is analyzed by way of numeric simulation, allowing to quantify a realistic optimization potential and to give recommendations in this sense. The possibility to actually implement such an optimization is explored on 2 case studies. At economic level, the retrofit operations are analyzed in terms of costs with energy added value, from where the cost of the avoided kWh and ton of CO₂ is computed.

As a complement, the next two parts of the study concern specific energy efficiency solutions, which are analyzed on the basis of cases studies operated in real condition of use.

The first solution concerns closing of existing balconies in the form of loggias (cold or warm). We analyze the performance of this solution in terms of intrinsic operation, as well as actual use by the inhabitants, in particular concerning opening of the windows.

The second solution concerns heat recovery on exhaust air for preheating of domestic hot water, by way of a heat pump. We analyze the system performance with and without solar thermal pre-heating, as well as with complementary PV. By way of an extended simulation campaign, we finally elaborate recommendations and guidelines for the pre-design of such systems.

Zusammenfassung

Diese Studie untersucht energetische Sanierungen von Mehrfamilienhäusern aus der Nachkriegszeit, um die gegenwärtige Praxis zu beschreiben und zu verbessern. Sie leistet damit einen Beitrag zur Umsetzung der Energiestrategie 2050.

Im ersten Teil der Studie untersuchen wir aus energetischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten 26 Sanierungsobjekte, welche insgesamt 3'000 Wohnungen und 285'000 m² Energiebezugsfläche umfassen. Der gemessene Heizbedarf wird mit dem unter Standardbedingungen berechneten Bedarf verglichen. Zur Analyse der Abweichungen (Performance Gap) wird eine numerische Simulation durchgeführt, dank welcher ein realistisches Optimierungspotential ermittelt und allgemeine Empfehlungen abgeleitet werden. Die Möglichkeit, dieses Potential auszuschöpfen, wird anhand von zwei Fallbeispielen untersucht. Schliesslich werden die 26 Sanierungsobjekte hinsichtlich Energieeinsparungen und Kosten untersucht, auf deren Grundlage die Vermeidungskosten pro eingesparter kWh und Tonne CO₂ ermittelt werden.

Im zweiten und dritten Teil der Studie werden zwei spezifische energetische Sanierungsmassnahmen anhand von konkreten Fallbeispielen untersucht.

Die erste Massnahme betrifft das Schaffen von Loggias (kalt oder warm) durch Verglasen von bestehenden Balkonen. Die Effektivität dieser Lösung wird sowohl hinsichtlich ihrer Funktionalität als auch bezüglich ihrer Nutzung analysiert

Die zweite Massnahme betrifft die Wärmerückgewinnung aus der Abluft für die Bereitstellung von Warmwasser mit Hilfe einer Wärmepumpe. Die Effizienz dieser Lösung wird sowohl mit als auch ohne thermische Solaranlage und alternativ mit einer PV-Anlage untersucht. Aufgrund umfangreicher Simulationen werden schlussendlich Empfehlungen für das Design und die Dimensionierung solcher Anlagen erarbeitet.

Table des matières

Résumé	3
Summary	3
Zusammenfassung.....	4
Table des matières	5
Liste des abréviations.....	8
Synthèse.....	9
Introduction générale.....	23
Remerciements.....	24
PARTIE A : Analyse comparative des performances globales mesurées et planifiées de rénovations énergétiques	25
A.1 Introduction	26
A.2 Démarche méthodologique.....	26
A.2.1 Critères de sélection des opérations	26
A.2.2 Présentation des opérations de rénovation analysées	27
A.2.3 Indicateurs de performance	33
A.3 Performances prévues des opérations de rénovation (projet normé)	36
A.3.1 Catalogues de solutions retenues	36
A.3.2 Performances prévues des projets en conditions normées d'utilisation	37
A.3.3 Performances des éléments de l'enveloppe thermique.....	39
A.3.4 Performances des systèmes techniques	40
A.4 Performances réelles des opérations de rénovation	41
A.4.1 Consommation thermique (chauffage et ECS).....	41
A.4.2 Consommation électrique (ménages et communs)	41
A.4.3 Emissions de CO ₂ associées à la production de chaleur	42
A.4.4 Economies réalisées (énergie et CO ₂).....	43
A.4.5 Mise en perspective avec les objectifs de la STE2050	44
A.5 Ecarts de performance dans la rénovation (normé vs. réalité).....	48
A.5.1 Définitions et méthodologie.....	48

A.5.2	Ecart sur les demandes de chauffage (energy demand gap).....	50
A.5.3	Ecart sur les économies de chauffage (energy saving gap).....	51
A.5.4	Relation entre économies de chauffage théoriques et réalisées.....	52
A.5.5	Impacts potentiels à l'échelle cantonale et nationale	53
A.6	Facteurs explicatifs de l'écart de performance	56
A.6.1	Approche méthodologique et raisons possibles	56
A.6.2	Sensibilité des besoins de chauffage aux divers paramètres.....	58
A.6.3	Décomposition de l'écart de performance	65
A.7	Bonnes pratiques visant à réduire l'écart de performance	66
A.7.1	Etudes de cas	66
A.7.2	Résultats	67
A.7.3	Recommandations pour réduire l'écart de performance	69
A.8	Performances économiques et incidence sur les loyers	71
A.8.1	Coûts globaux des rénovations.....	71
A.8.2	Méthode de décomposition des coûts	72
A.8.3	Répartition des coûts par groupes d'éléments	74
A.8.4	Répartition des coûts par type de travaux	76
A.8.5	Performances énergétiques et coûts associés	77
A.8.6	Coûts du kWh et de la tonne de CO ₂ évités	79
A.8.7	Incidence sur les loyers	81
A.9	Autres aspects	83
A.10	Synthèse et conclusions.....	85
PARTIE B1 : Evaluation des performances intrinsèques du système « loggia » en hiver		91
B1.1	Introduction	92
B1.2	Etudes de cas	93
B1.2.1	Loggia froide : étude de cas « Gros-Chêne » (B6)	94
B1.2.2	Loggia chaude : étude de cas « La Cigale » (B12-13)	95
B1.3	Caractérisation des loggias	97
B1.3.1	Caractérisation des loggias froides (« Gros-Chêne »)	97

B1.3.2	Caractérisation des loggias chaudes (« La Cigale »)	98
B1.4	Usage et performance des loggias en conditions réelles d'utilisation	100
B1.4.1	Effet de l'ouverture des fenêtres	100
B1.4.2	Taux d'ouvertures des fenêtres, loggias froides («Gros-Chêne»).....	101
B1.4.3	Taux d'ouverture des fenêtres, loggias chaudes (« La Cigale »)	103
B1.5	Mise en perspective des résultats	109
B1.5.1	Aspects énergétiques	109
B1.5.2	Autres aspects	109
B1.6	Synthèse et conclusions	111
PARTIE B2 : Evaluation des performances intrinsèques du système « PAC sur air vicié ».....		115
B2.1	Introduction	116
B2.2	De la solution à son intégration dans le projet.....	118
B2.2.1	Principe de fonctionnement	118
B2.2.2	Présentation des deux études de cas.....	118
B2.2.3	Performances prévues (design performance)	121
B2.3	Performances mesurées en conditions réelles d'utilisation	122
B2.3.1	Concept du monitoring	122
B2.3.2	Résultats de l'analyse du système Eaux Vives	124
B2.3.3	Résultats de l'analyse du système Meyrin.....	133
B2.4	Etude de sensibilité et règle de pré dimensionnement	137
B2.5	Mise en perspective des résultats et potentiel de généralisation	140
B2.6	Synthèse et conclusions	141
Références		143

Liste des abréviations

AVG	Moyenne
CAD	Chauffage à distance
COP	Coefficient de performance
DALE	Département de l'aménagement, du logement et de l'énergie
DJ	Degrés-jours de chauffage
ECS	Eau chaude sanitaire
Ehww	Energie finale pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire ou indice de dépense d'énergie thermique
HPE / THPE	Haute performance énergétique (Minergie) / Très haute performance énergétique (Minergie-P)
IDC	Indice de dépense de chaleur
MJ	Mégajoule
OCEN	Office cantonal de l'énergie
PAC	Pompe à chaleur
Qh	Besoins de chaleur pour le chauffage ($Qh = QT + QV - Qu g$)
Qww	Besoins de chaleur pour l'eau chaude sanitaire
PV	Solaire photovoltaïque
SIA	Société suisse des Ingénieurs et des Architectes
SITG	Système d'information du territoire genevois (guichet de données géographiques)
SRE	Surface de référence énergétique (=A _e)
VMC	Ventilation mécanique contrôlée

Synthèse

Cette étude s'intéresse à la rénovation énergétique d'immeubles d'habitation collectifs construits après-guerre, dans une perspective d'identification des pratiques actuelles et de leur amélioration possible. Elle s'inscrit en cela dans l'accompagnement à la mise en œuvre de la Stratégie Energétique 2050.

Le projet comporte les volets complémentaires suivants :

- Le premier volet (partie A) concerne le benchmark des performances énergétique, économique et environnementale d'un ensemble représentatif de rénovations d'immeubles d'habitation dans une perspective d'amélioration des pratiques et de leur promotion.
- Les deux volets suivants (parties B1 et B2) concernent l'analyse de deux solutions d'efficacité énergétique spécifiques : i) la fermeture des balcons en loggia comme solution d'efficacité énergétique en hiver ; ii) la récupération de chaleur sur air vicié pour le préchauffage de l'ECS comme alternative à la ventilation double-flux avec récupération de chaleur (VDF).

Partie A : Analyse comparative des performances globales mesurées et planifiées de rénovations énergétiques

Ce premier volet de l'étude est fondé sur une analyse comparative d'un ensemble représentatif de grands immeubles d'habitation collectifs construits après-guerre, majoritairement au cours des années soixante, et rénovés depuis 2005 à Genève (réovation globale ou par étapes de l'enveloppe thermique, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques). Au total, l'échantillon est composé de 26 opérations, regroupant plus de 3'000 logements et totalisant une surface de référence énergétique d'environ 285'000 m². Avant rénovation, ces bâtiments étaient entièrement dépendant des énergies fossiles et consommaient en moyenne pour le chauffage et l'ECS (Ehww) plus de 600 MJ/m² par an.

Ces opérations de rénovation se répartissent comme suit :

- 11 rénovations énergétiques « complète ou quasi-complète » (portant sur au moins 3 éléments de l'enveloppe thermique, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques) ;
- 14 rénovations énergétiques « ponctuelle ou partielle » de l'enveloppe thermique (portant sur un seul ou deux éléments de la façade, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques) ;
- 1 rénovation qui se limite à des travaux d'entretien de l'enveloppe, avec remplacement du système technique.

Performances réelles des rénovations

L'évolution de la performance réelle énergétique et environnementale des bâtiments avant et après rénovation a été évaluée à l'aide d'un ensemble d'indicateurs de performance. L'analyse a porté sur les 22 opérations de rénovation réalisées. Les résultats montrent que :

- L'énergie finale pour le chauffage et l'ECS est passée en moyenne de 644 à 465 MJ/m², soit une baisse moyenne de 179 MJ/m² (économies relatives de 29% en moyenne, tous types de travaux confondus) ;
- L'intensité en carbone des agents énergétiques est passé de 260 à 200 gCO₂éq/kWh ;
- Les émissions annuelles de carbone liées à l'exploitation ont baissé en moyenne de 46 à 27 kg CO₂/m². Les émissions évitées sont en moyenne de 19 kg CO₂/m² (baisse relative de 41%, tous types de travaux confondus) ;
- La consommation électrique totale des bâtiments a baissé en moyenne de 6.3% entre avant et après travaux, passant de 36.5 à 34.3 kWh/m². Cette baisse s'inscrit dans la tendance générale observée au niveau cantonal.

Ces résultats sont ensuite comparés à la performance moyenne du parc résidentiel collectif genevois et aux objectifs de réduction à l'horizon 2035 et 2050 du secteur résidentiel suisse selon le scénario NPE de la Stratégie énergétique 2050. Il ressort de cette analyse que seules les rénovations à très haute performance énergétique (Minergie-P) se rapprochent aujourd'hui des objectifs fixés, nécessitant à la fois de moins et mieux consommer.

Ecarts de performance énergétique

La performance énergétique des rénovations évaluée en conditions réelles d'utilisation et d'exploitation a été ensuite comparée avec la performance prévue des projets, calculée en conditions standard d'utilisation selon la norme SIA 380/1. Afin de caractériser l'écart de performance des rénovations énergétiques, nous nous sommes en un premier temps concentré sur les 10 opérations faisant l'objet d'un justificatif thermique par performance globale, sans création de surfaces habitables supplémentaires (surélévation), pour lesquelles des relevés de consommation étaient disponibles sur une moyenne sur 3 ans, avant et après rénovation.

Avant rénovation, la demande réelle de chauffage (Q_h) de ces bâtiments variait entre 708 et 332 MJ/m². Par comparaison avec la valeur annoncée dans les justificatifs thermiques, l'économie de chauffage prévue/théorique liée à la rénovation varie entre 140 et 560 MJ/m². Cependant, dans la réalité la part réalisée de cette économie n'atteint, selon les cas, que 29% à 65% de l'objectif, mettant en lumière un important écart de performance.

En fait, il ressort de cette analyse que plus l'économie théorique est importante, plus la part effectivement réalisée de cette économie est élevée. Ainsi, en visant des économies théoriques de l'ordre de 550 MJ/m², les économies réalisées s'élèvent à près de 365 MJ/m², soit une part mobilisée d'environ 65%. Cette part baisse à 35% en visant des économies théoriques de l'ordre de 200 MJ/m² (observées dans les cas de rénovations partielles, souvent réalisées sans réglage des installations de chauffage).

Par ailleurs, il existe pour cet échantillon une relation statistiquement assez robuste entre les économies de chauffage théoriques et réalisées. A condition d'être corroborée par des exemples supplémentaires, cette relation peut être vue comme une signature des pratiques de rénovation actuelle, incluant l'ensemble du processus de rénovation, depuis l'étape de conception (choix des solutions d'amélioration énergétique et usage des logiciels de simulation), jusqu'à l'usage des bâtiments par les occupants et les gestionnaires de l'énergie.

On déduit de cette signature que si l'on généralisait les pratiques actuelles de rénovation à l'ensemble du parc genevois de bâtiments résidentiels collectifs d'après-guerre, à peine la moitié (42%) du potentiel théorique d'économie de chauffage de ces bâtiments pourrait être atteinte en réalité. Des résultats similaires (46% et 48%) ont été obtenus respectivement en appliquant cette relation à l'ensemble du parc résidentiel suisse et à la totalité du parc immobilier national (toutes catégories confondues).

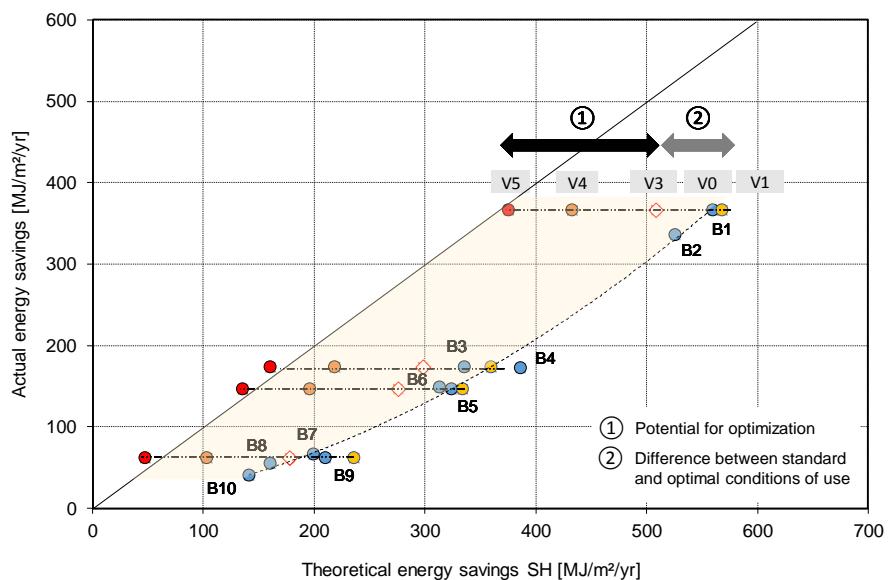
Facteurs explicatifs de l'écart de performance

Afin de mieux comprendre les raisons de l'écart de performance observé plus haut, nous avons analysé l'effet de l'utilisation des valeurs standards de la norme SIA 380/1 dans le calcul des besoins de chauffage théoriques, par rapport aux valeurs moyennes réelles observées sur l'échantillon. En complément, la sensibilité aux possibles erreurs d'estimation ou d'entrée dans les simulations (choix de la météo, type de régulation, facteur d'ombrage et incertitude sur le calcul de la surface énergétique) a été étudiée. Enfin, d'autres facteurs pouvant influencer la performance énergétique durant la phase de réalisation des travaux et d'exploitation du bâtiment sont discutés.

En un premier temps, l'analyse de sensibilité aux divers paramètres de calcul est effectuée sur 20 opérations de notre échantillon, en utilisant les données constructives figurant dans les dossiers de demande d'autorisation. Sur les 10 paramètres analysés, il s'avère que les deux paramètres les plus déterminants pour l'écart entre demande de chauffage normée et réelle sont la température intérieure et le débit d'air neuf :

- La température intérieure moyenne de 23°C (mesurée avec un pas de temps horaire durant toute la période de chauffage dans six bâtiments rénovés) dépasse largement la valeur standard de 20°C. En moyenne, cela entraîne une augmentation de la demande de chauffage de plus de 30% (soit 11% par degré supplémentaire).
- De même, les débits d'air neuf directs mesurés à l'extraction de la ventilation mécanique s'élèvent en moyenne à 1 m³/m².h durant la période de chauffage (sans considérer la récupération de chaleur, dans les cas où elle existe), et à 1.5 m³/m².h si l'on considère le débit d'air indirect résultant des ouvertures des fenêtres (valeur estimée par les experts), soit largement plus que la valeur standard de 0.7 m³/m².h de la norme SIA 380/1. En moyenne, de telles hausses de débit entraînent une hausse de la demande de chauffage de 25 à 70 MJ/m² (soit une hausse de 17 MJ/m² par 0.2 m³/m².h).

En deuxième temps, nous combinons la variation de ces paramètres afin de décomposer l'écart de performance caractérisé plus haut. Cette analyse est faite pour 4 des 10 opérations de rénovation analysés, qui représentent bien la dispersion d'économies théoriques observées.



Décomposition de l'écart de performance dans la rénovation en (1) potentiel d'optimisation et (2) différence entre les conditions d'utilisation standard et optimales

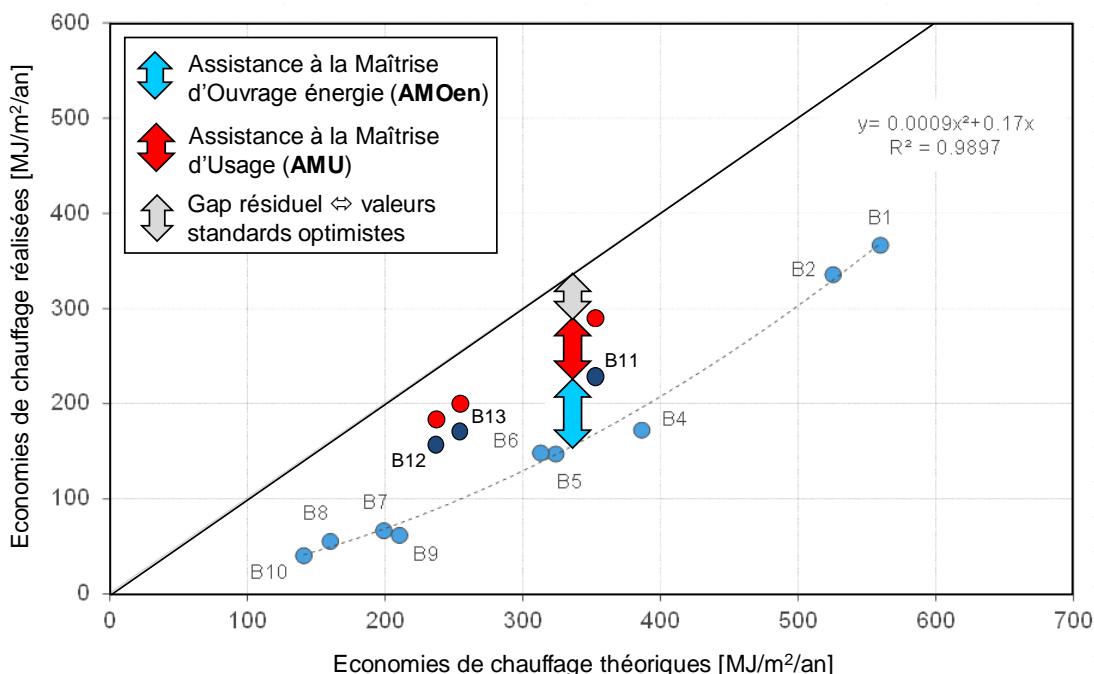
Il résulte de ces simulations que le passage du scénario de référence (20°C, 0.7 m³/m².h) à des scénarios en usage réel (23-24°C, 1.3-1.5 m³/m².h) permet dans chaque cas d'expliquer l'écart de performance. Ce dernier peut finalement être divisé en deux parties :

- Le potentiel d'optimisation, qui correspond à la différence entre les conditions réelles d'utilisation (sans optimisation) et des conditions d'utilisation optimales/réalistes (par exemple : température moyenne des logements de 21°C et débit d'air neuf de 1.1 m³/m².h, dans le cas d'un bâtiment rénové et optimisé énergétiquement).
- La différence entre ces conditions optimales et les conditions normées de la norme SIA, jugées souvent trop optimistes (par ex. la différence entre 21°C et 20°C préconisée par la norme).

Bonnes pratiques et recommandations

Nous explorons alors, sur la base de deux exemples de rénovation HPE (Minergie) et THPE (Minergie-P), la possibilité de réduire concrètement l'écart de performance observé, grâce à une attention particulière lors de la phase de réalisation, ainsi qu'une série de mesures d'optimisation de la gestion énergétique une fois les bâtiments rénovés. Dans les deux cas, on observe une importante réduction de l'écart de performance, par rapport à celui observé dans les 10 opérations de référence étudiées plus haut. Cette réduction se décompose en deux parties :

- Une Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage énergie (AMOen) lors de la phase de conception et de réalisation des travaux, qui permet une économie réelle sur la demande de chauffage supérieure à ce qui est observé dans les autres cas.
- Une Assistance à la Maîtrise d'Usage (AMU) visant à accompagner les locataires durant la phase d'exploitation, accompagnée d'une phase d'optimisation et de suivi énergétique après rénovation, qui permet de réduire encore la demande de chauffage et donc l'écart de performance.



Réduction de l'écart de performance énergétique sur deux études de cas B11 et B12-13 après rénovation :
(1) mesures d'optimisation et (2) reste dû à la différence entre les conditions standard d'utilisation et les conditions optimales d'utilisation

Grâce aux mesures d'optimisation, la part effectivement réalisée du potentiel d'économie théorique passe ainsi dans les deux cas d'environ 65% à 80%. Le solde est principalement dû aux valeurs optimistes de la norme SIA pour calculer les économies théoriques, en particulier une température des logements à 20°C, au lieu des 21.5°C qui semblent acceptables par les locataires.

Finalement, nous proposons une série de recommandations visant à réduire l'écart de performance et à éviter les ruptures dans la chaîne de responsabilité tout au long du processus de rénovation. Ces recommandations ont été recueillies auprès de divers acteurs professionnels et académiques. Elles ont été complétées par des recommandations décrites dans diverses études sur le sujet. Ces recommandations sont regroupées selon les différentes phases du projet, à savoir l'état des lieux, la conception, la réalisation, conclue par la mise en service, et l'exploitation.

Recommandations pour diminuer l'écart de performance

Acteurs impliqués en priorité
 P Propriétaire, Maître d'ouvrage
 E Entreprises (constr., exploit.)

A Architecte
 R Gestionnaire, régie

I Ingénieur

U Utilisateurs, locataires

Etat des lieux		Conception		Réalisation		Mise en service		Exploitation	
PERFORMANCE	EXPERTISE	RESPONSABILITÉ	FORMATION	SUIVI	COMMUNICATION	P	A	E	R
P bien cerner les attentes et les A moyens, distinguer entre les I calculs nommés et un objectif R réaliste U	P favoriser une rénovation glo- A bale ou par étapes selon un I planning prédefini E R U	P contrôler rigoureusement la A qualité de l'exécution, valider I la réalisation, actualiser les R résultats calculés en cas de U changement	P respecter les spécifications A et les détails constructifs, con- I trôler la conformité des tra- E vaux exécutés aux cahiers des R charges U	P regrouper lors de la mise en A service tous les acteurs con- I cernés, faire des contrôles E périodiques pendant la pre- R mière année d'exploitation U	P informer et sensibiliser les A exploitants et les utilisateurs, les motiver à s'impliquer, évaluer leur satisfac- E tion R	P ajuster continuellement les A systèmes et réglages selon les E conditions réelles d'utilisation R et à l'amélioration continue U	P comparer la performance A réelle à la prédition réalistre, veiller au suivi régulier R et à l'amélioration continue U	P veiller au respect des cahiers A des charges par les exploi- E tants R	P contrôler le bon fonctionne- A ment et optimiser les instal- E lations, déceler les pannes et R améliorer la performance U
P caractériser l'état existant et A identifier la situation éner- I tique initiale (périmètre, E R U bâtiment, postes de consom- U mation)	P favoriser des solutions simples, A efficientes et robustes, pren- I dre en compte le coût global E du cycle de vie, réaliser un R calcul financier réaliste, inté- U gérer le futur usage du bâti- ment	P clarifier les responsabilités A et les rôles, élaborer un cahier de I charges complet et une straté- E gie de rémunération liée à la R performance U	P analyser finement les ré- A ponses aux appels d'offre E	P éviter la rupture dans la chaîne A de responsabilité entre les E acteurs et transmettre la res- R ponsabilité à l'exploitant U	P assurer que le suivi est orga- A nisé et informer et expliquer I les systèmes et réglages, docu- E mentation écrite R	P donner un feedback aux A concepteurs et à tous les E acteurs concernés, favoriser R les retours d'expérience et U diffuser les bonne pratiques	P se renseigner sur le plan de A maintenance et d'exploita- I tion des installations et sur E l'équipe en charge du suivi U	P prévoir une stratégie de me- A sure et de suivi E	P favoriser l'échange d'informa- A tions et les synergies entre les I acteurs, (ex. utilisation d'ou- E tilis BIM), partage d'expérience R et de savoirs pluridisciplinaire U
P prendre en compte les A acteurs assez tôt dans le E projet R	P prendre en compte les A expériences tirés des projets E précédents et les bonnes R pratiques U	P veiller à avoir un personnel A qualifié et expérimenté I (formation continue, ...) E	P favoriser l'émergence d'une A offre mieux coordonnée et I plus performante E (accréditation des professionnels, ...) U	P former les gestionnaires de A l'énergie aux dimensions I techniques, humaines et organi- R sationnelles du management U de l'énergie	P s'assurer que le suivi est orga- A nisé et informer et expliquer I les systèmes et réglages, docu- E mentation écrite R	P donner du bon déroulement A de protocoles de mise en ser- E vice, manuels, infos des four- R nisseurs, mise à jour des plans U et schémas	P prendre en compte les feed- A backs des usagers et des E exploitants R	P favoriser une stratégie de me- A sure et créer une atmos- E phère de confiance, mettre en R place une équipe pluridisciplinaire U	P contrôler le bon fonctionne- A ment et optimiser les instal- E lations, déceler les pannes et R améliorer la performance U

Synthèse des recommandations selon les différentes étapes du projet

Coûts des travaux

L'analyse de la performance économique concerne l'ensemble de l'échantillon. Elle se base sur les coûts détaillés des travaux figurant dans les dossiers d'autorisation. Hors subventions, le coût global (TTC) des opérations de rénovation s'élève en moyenne à 877 CHF/m² (SRE).

En moyenne, le coût par type de rénovation est comme suit :

- 1330 CHF/m² pour les rénovations complètes
- 700 CHF/m² pour les rénovations partielles
- 240 CHF/m² pour les travaux de réfection uniquement.

Le coût des travaux portant sur les installations techniques, les façades et les toitures représente en moyenne la moitié du coût total (437 sur 877 CHF/m²). A noter que la fourchette des coûts observés entre les différentes opérations est relativement large et dépend principalement de la nature des travaux réalisés.

Les coûts des rénovations ont été ensuite répartis par type de travaux : travaux à plus-value énergétique, travaux à plus-value non énergétique et travaux d'entretien. Nous avons pour cela utilisé une méthode de répartition des coûts qui combine à la fois une approche normée (utilisation du standard CRB) et de pratiques de répartition appliquées par l'Etat (OCLPF) lors de la répercussion des coûts des travaux sur les loyers. On observe que :

- Les travaux d'amélioration énergétique représentent en moyenne 20% du coût global. Cette part baisse à 16% pour les rénovations partielles (1 ou 2 éléments de l'enveloppe assainis) et s'élève à 24% pour les rénovations complètes (≥ 3 éléments). La part restante se répartit entre travaux à plus-value non énergétique (70%) et travaux d'entretien (30%).
- La fourchette des coûts à plus-value énergétique est assez large (de 24 à 834 CHF/m², selon les opérations), ce qui montre bien l'hétérogénéité des travaux réalisés. Près de la moitié de ces bâtiments ont investi entre 100 et 300 CHF/m² pour ce type de travaux.

Coûts de la performance énergétique et environnementale

En un premier temps, le coût des travaux énergétiques est comparé avec le niveau de performance énergétique après travaux. Sur la base de l'échantillon analysé, on observe que :

- Les rénovations complètes ou quasi complètes affichent des besoins normés de chauffage et des consommations thermiques moindres, mais elles coûtent davantage que les rénovations partielles.
- Il existe bien une relation entre le coût des travaux énergétiques et les besoins normés de chauffage après travaux, qui semble être confirmée également pour les consommations réelles de chauffage et d'ECS après travaux. Néanmoins, on ne peut pas affirmer avec certitude qu'il existe une relation bien établie avec les économies de chauffage théoriques ou réalisées.
- Le surcoût entre les rénovations à haute performance énergétique (Minergie) et celles à très haute performance énergétique (Minergie-P) est en moyenne de 100 CHF/m² environ, pour des économies d'énergies réelles comprises entre 50 et 100 MJ/m². Ce constat mérite d'être mis en perspective avec les économies engendrées par le suivi et l'optimisation énergétique des bâtiments après travaux (économies de près de 100 MJ/m² à des coûts bien moindres).

En un deuxième temps, nous analysons le coût du kWh économisé ainsi que celui de la tonne de CO₂ évitée par les opérations de rénovation (effets de l'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe et des installations techniques et du changement de l'agent énergétique). Les résultats montrent que :

- Sur l'ensemble de l'échantillon, le coût brut du kWh d'énergie finale réellement économisée se situe dans une fourchette allant de 9 à 26 ct/kWh.
- Pour les 3 rénovations à haute performance énergétique – Minergie, le coût brut du kWh d'énergie finale économisée se situe dans une fourchette de 11 à 22 ct/kWh. Après déduction de l'énergie économisée et de la taxe carbone évitée (aux coûts 2016), il reste un surcoût nul ou de quelques

centimes par kWh. Ceci devrait se réduire ou même s'inverser avec l'augmentation de la taxe carbone et/ou une augmentation du coût des combustibles.

- Pour les 2 rénovations à très haute performance énergétique – Minergie-P, le coût brut du kWh d'énergie finale économisée s'élève à 25 ct/kWh. Après déduction de l'énergie économisée et de la taxe carbone évitée (aux coûts 2016), il reste un surcoût d'une dizaine de centimes par kWh par rapport aux combustibles fossiles. Il est à souligner que le coût brut de l'énergie économisée est proche du coût actuel de la chaleur renouvelable offerte sur le marché genevois. Un doublement du prix de l'énergie ou une augmentation de la taxe carbone à environ 300 CHF/tonne ou bien encore une composition des deux rendrait le coût du négo kWh économiquement compétitif.
- Les conclusions sont similaires pour le coût de la tonne de CO₂ évitée.

Sur la base de l'échantillon à disposition, et avec la méthode de décomposition des coûts à plus-value énergétique pratiquée par l'Etat de Genève, on en conclut qu'avec le prix actuel de l'énergie et dans le contexte règlementaire en vigueur, les opérations rénovation Minergie sont proche de la rentabilité, alors qu'un effort supplémentaire doit être consenti pour assurer la rentabilité des rénovations Minergie-P. Par ailleurs, le suivi et l'optimisation énergétique des installations techniques après la fin des travaux de rénovation devraient permettre d'accroître l'efficacité des opérations, d'augmenter les économies d'énergie effectivement réalisées et de diminuer le coût de la tonne de CO₂ évitée, pour le même montant investi dans les travaux énergétiques.

Incidence sur les loyers

La quasi-majorité des rénovations analysées ont engendré après travaux une hausse des loyers pour les locataires. La hausse moyenne des loyers est comprise entre 95 et 956 CHF/pce/an. Elle peut résulter de la répercussion de la hausse admissible par les travaux à plus-value énergétique et non énergétique, à laquelle peut s'ajouter la Baisse Prévisible des Charges et une contribution énergétique du locataire à hauteur de 120 CHF/pce/an. Cette augmentation dépend également du loyer initial et du plafond LDTR qui se situe aujourd'hui à 3405 CHF/pce/an. Il ressort de notre analyse les points clés suivants :

- Dans les cas où les loyers avant rénovation dépassaient le seuil LDTR, les travaux réalisés se sont limités à des travaux de rénovations partielles, avec très peu d'investissement dans les travaux d'amélioration énergétique.
- Les rénovations ont engendré une forte hausse des loyers les plus bas, sans différence marquée entre les rénovations complètes et partielles.
- Dans les cas de rénovations complètes, plus la hausse des loyers a été importante, plus ont été importantes les économies d'énergies finales effectivement réalisées.

Sur la base de ces constats, nous pensons qu'il serait important, lors de l'application du mécanisme de répercussion des coûts, de tenir compte dorénavant du type de rénovation envisagée (réovation globale, façade, ponctuelle, etc.). A notre avis, une forte hausse des loyers induite par des travaux de rénovation partielle (processus de saucissonnage des travaux) ne devrait pas être permise. Il convient en fait de considérer le potentiel de hausse de loyers comme un levier pour déclencher des travaux de rénovation à haute et très haute performance énergétique et d'éviter autant que possible le processus d'écrémage appliqué par certains acteurs qui consiste à plafonner les loyers en réalisant des travaux partiels à faible potentiel d'amélioration énergétique.

Autres aspects

Si le recours à divers indicateurs de performance permet d'évaluer la performance énergétique, environnementale et économique des opérations de rénovations, la réussite de ce type de projets dépend de nombreux autres aspects, comme ceux liés à la qualité architecturale et urbanistique des interventions, ainsi que les aspects socio-économiques et organisationnels.

A cet égard, une pesée d'intérêt des solutions tenant compte des aspects de coût, des règlementations thermiques et de la conservation de la qualité architecturale et urbanistique mériterait d'être menée. A ce propos, des solutions de principe acceptables par les architectes et les ingénieurs (de légères à intensives) en fonction de différentes typologies de façades pourraient aider à guider les partenaires du projet à prendre les bonnes décisions. Un catalogue d'expérience réussies et de bonnes pratiques de la rénovation devrait permettre d'accélérer le processus d'apprentissage des différents acteurs, et conduira, espérons-le, à des rénovations plus performantes. A ce propos, une première classification de typologie de façade de bâtiments construits dans les années 60-70 et situés au sein de la commune d'Onex (GE) a fait l'objet d'une étude détaillée dans le cadre du projet pilote Onex-Rénove.

Partie B1 : Evaluation des performances intrinsèques du système « loggia » en hiver

La typologie des façades des immeubles d'habitation d'après-guerre se caractérise fréquemment par des grandes ouvertures vitrées et des balcons qui se développent sur une partie ou sur l'ensemble des élévations. Lors de travaux d'assainissement énergétique, la question se pose toujours de savoir pour quelle solution opter au niveau des dalles des balcons et des ponts thermiques associés. Une solution consiste à créer des loggias, c'est-à-dire à fermer les balcons avec du vitrage, permettant par la même de créer un espace supplémentaire. A cet égard, on distingue les loggias froides et chaudes, selon que le plus petit coefficient de déperdition thermique se trouve au niveau de la paroi intérieure (interface appartement/loggia) ou extérieure (interface loggia/extérieur).

Le but de ce volet est de comparer les solutions de loggia chaude et froide, d'une part en termes de fonctionnement et performance intrinsèque, d'autre part en termes d'utilisation faite par les habitants. Nous nous basons pour cela sur deux études de cas de bâtiments résidentiels collectifs d'après-guerre ayant récemment fait l'objet d'une rénovation thermique complète de l'enveloppe et du système de production de chaleur, avec à la clé la création de loggias.

Caractérisation des loggias

Dans le cas du bâtiment « Gros-Chêne » (loggia froide), la fermeture des balcons se caractérise par des fenêtres coulissantes en simple vitrage, alors que le vitrage des portes-fenêtres internes a été remplacé par du vitrage isolant double. Ramenée au niveau du plan de la façade, la résistance thermique de la loggia fermée s'élève à $0.79 \text{ K.m}^2/\text{W}$ ($U = 1.26 \text{ W/K.m}^2$), dont 70% se situe au niveau de la paroi interne. Par conséquence, pour une température des logements aux alentours de 24°C et une température externe de 0°C , on observe une température dans les loggias fermées aux alentours de 10°C .

Dans le cas du bâtiment « La Cigale », la fermeture des balcons se caractérise par des fenêtres rétractables en triple vitrage, pour des portes-fenêtres internes en double vitrage (fruit d'une rénovation précédente). Ramenée au niveau du plan de la façade, la résistance thermique de la loggia fermée s'élève à $2.30 \text{ K.m}^2/\text{W}$ ($U = 0.43 \text{ W/K.m}^2$), dont 29% se situe au niveau de la paroi interne. Par conséquence, pour une température des logements aux alentours de 22°C et une température externe de 0°C , on observe cette fois-ci une température dans les loggias aux alentours de 17°C .

Liées à la localisation de l'enveloppe thermique (paroi interne ou externe de la loggia) les appellations « loggia froide » et « loggia chaudes » prennent donc tout leur sens.

Effet de l'ouverture des fenêtres

Dans les deux cas, l'utilisation optimale de la loggia consiste à maintenir les deux parois fermées. Il s'agit de la situation considérée par les ingénieurs dans le calcul du bilan thermique. Néanmoins, en situation

d'usage réel les occupants peuvent avoir tendance à considérer la loggia comme un espace de vie supplémentaire et à garder ouvertes les portes-fenêtres de la paroi interne.

Dans le cas des loggias froides (Gros-Chêne), l'ouverture des portes fenêtres a pour effet de multiplier les déperditions thermiques de la loggia par un facteur 3.3. Ce point est d'autant plus sensible que la tentation d'ouvrir les portes-fenêtres pour tempérer et utiliser les loggias pourrait être grande.

Dans le cas des loggias chaudes (La Cigale), la situation est toute différente. L'ouverture des portes fenêtres ne multiplie pas les déperditions thermiques de la loggia que par un facteur 1.4. L'utilisation continue ou ponctuelle de la loggia comme espace de vie, sans fermeture de la porte-fenêtre, n'est donc pas dramatique, ce d'autant moins que la valeur U résultante (0.61 W/K.m^2) reste 2 fois inférieure à celle de la loggia fermée du bâtiment Gros-Chêne.

Taux d'ouverture et effet sur la performance

Cas des loggias froides

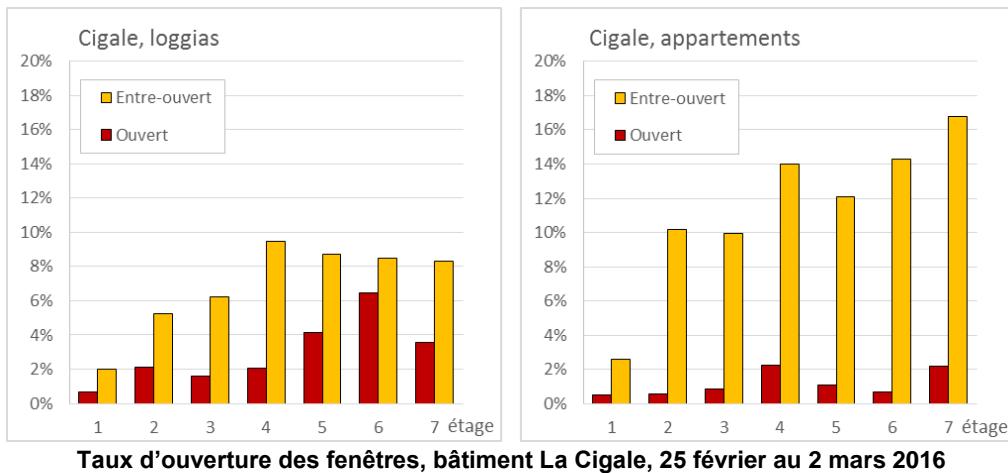
Dans le cas des loggias froides (Gros-Chêne), le taux d'ouverture des fenêtres a été caractérisé par une série de photos dans le spectre visible, en pas horaire, au cours de 2 journées d'hiver. En moyenne, on observe 56% des loggias étaient totalement fermées, 40% avec la paroi externe ouverte et la paroi interne fermée, et 4% dans la situation inverse. Le taux de loggias complètement ouvertes est inférieur à 1%.

En extrapolant ces résultats à l'ensemble de la saison de chauffage, les déperditions annuelles de chaleur à travers les loggias s'élèveraient à 49.7 kWh/m^2 (contre 39.2 kWh/m^2 avec les loggias totalement fermées). Dès lors, la déperdition supplémentaire de 10.5 kWh/m^2 correspondrait à 14% de la demande de chauffage (73 kWh/m^2).

Ces résultats doivent cependant être interprétés avec prudence du fait de la courte durée de la campagne (2 journées, dont une très clémence) et de la difficulté d'identifier sur les photos les parois internes ouvertes. A cet égard, une observation ponctuelle par photo infrarouge indique un pourcentage de loggias chaudes (portes-fenêtres intérieures ouvertes) beaucoup plus important, en particulier aux derniers étages, plus chauds.

Cas des loggias chaudes

Dans le cas des loggias chaudes (La Cigale), le taux d'ouverture des fenêtres a été caractérisé par une série de photos dans le spectre visible et infrarouge, toutes les deux heures, au cours d'une semaine complète d'hiver, en distinguant entre fenêtres « complètement ouvertes » et fenêtres « entre-ouvertes ». L'analyse concerne à la fois les fenêtres externes des loggias, et les fenêtres donnant directement sur les appartements. Dans le cas des loggias, les photos ne permettent malheureusement pas de détecter l'ouverture/fermeture des portes-fenêtres internes. En moyenne, le taux d'entre-ouverture des fenêtres externes est de 7% pour les loggias et de 11% pour les fenêtres donnant sur appartement. Le taux d'ouverture complète est quant à lui de 3% pour les loggias et de 1% pour les appartements.



Afin d'évaluer l'effet de l'ouverture des fenêtres sur la performance de l'enveloppe, nous avons fait faire une mesure ponctuelle de débit de ventilation naturelle, par ouverture de fenêtre, qui ont été comparées à des valeurs d'abaque.

En extrapolant ces observations à l'ensemble de la saison de chauffage, l'effet de l'ouverture des loggias et des fenêtres donnant directement sur les appartements résulterait en une perte thermique de $34.9 + 12.0 = 46.9 \text{ kWh/m}^2$, ce qui représente 1.8 fois la part de la demande de chauffage liée aux pertes par l'enveloppe (26.2 kWh/m^2). Un tel levier est improbable, puisque la fermeture complète des fenêtres impliquerait à elle seule que la demande de chauffage se réduise à zéro !

A cet égard, il est important de noter que l'observation de l'ouverture des loggias par photo infrarouge ne concerne que la paroi externe des loggias. Dans l'hypothèse où 70% des loggias ouvertes sur l'extérieur avaient leur paroi interne fermée, les pertes globales par les diverses fenêtres (transmission et ventilation) restent inférieures ou égales à la part de la demande de chauffage dédiée à l'enveloppe. Cependant, afin d'aller plus avant dans cette comparaison, il faudrait également tenir compte des pertes par les éléments opaques de l'enveloppe, ainsi que des gains internes et solaires qui contribuent à contrebalancer ces pertes.

Enseignements principaux

Cette étude permet de tirer les enseignements suivants :

- Dans les deux cas (loggia chaude ou froide), l'utilisation optimale de la loggia consiste à maintenir les deux parois fermées. Il s'agit de la situation généralement considérée par les ingénieurs dans le calcul du bilan thermique.
- Néanmoins, en situation d'usage réel les occupants peuvent avoir tendance à considérer la loggia comme un espace de vie supplémentaire et à garder ouvertes les portes-fenêtres de la paroi interne. Cette situation est plus critique dans le cas d'une loggia froide, puisque l'enveloppe thermique est dès lors déplacée vers la paroi externe, de moindre qualité.
- Dans la pratique, on observe en fait une combinaison d'usages divers, allant de loggias complètement fermées à des loggias ouvertes sur l'intérieur, sur l'extérieur ou sur les deux.
- A cet égard, l'ouverture des fenêtres extérieures de la loggia s'inscrit dans une discussion plus générale concernant l'ouverture des fenêtres par les habitants. Un tel comportement peut relever de raisons diverses, telle que le besoin de contrôle de l'aération du logement, une façon de contrôler la surchauffe de l'appartement, un besoin d'emprise directe avec l'extérieur, ou une simple habitude.

Autres aspects

En complément aux aspects énergétiques et comportementaux liés à l'usage des loggias par les occupants, lors de la fermeture des balcons en loggias d'autres aspects sont à considérer, en fonction notamment du projet de rénovation et de la sensibilité du site, ou encore de l'expérience et des objectifs du maître de l'ouvrage :

- Aspects de confort thermique et visuel.
- Aspects organisationnel et de mise en œuvre (en lien avec un procédé de fabrication standard ou préfabriqué).
- Détails constructifs (en lien avec le type d'ouverture des fenêtres et la facilité d'usage et de maintenance).
- Impact architectural et urbanistique (en lien avec les contraintes patrimoniales).
- Aspects économiques, en termes de coûts mais également de subventions.

Partie B2 : Evaluation des performances intrinsèques du système « PAC sur air vicié »

Le renouvellement d'air dans les bâtiments est à l'origine de grandes déperditions thermiques. La majorité des immeubles d'habitation existant possède actuellement un système de ventilation de type « extraction simple » qui laisse échapper environ 100 MJ/m²/an de SRE, équivalent à une dizaine de TWh au niveau national. La récupération à grande échelle et la valorisation de cette chaleur fatale constitue un important gisement d'économies d'énergie.

Parmi les solutions de récupération figure le système de ventilation double-flux, quelquefois avec récupération additionnelle de la chaleur sur l'air vicié via une PAC intégrée. Ce type de système qui tend à se généraliser dans les constructions neuves reste peu retenu pour les rénovations; sans doute à cause de son intégration complexe et de sa mise en œuvre onéreuse

En guise d'alternative à la ventilation double-flux, nous proposons ici d'améliorer la connaissance de l'usage et du fonctionnement du système utilisant des pompes à chaleur sur l'air vicié pour le préchauffage de l'ECS dans des grands immeubles d'habitation, placés individuellement ou en série avec une installation solaire thermique.

A cet effet, deux études de cas situées sur le Canton de Genève ont été analysées.

Etude de cas « Eaux-Vives »

Cette première étude concerne deux immeubles de 13 niveaux hors sol, totalisant une surface de référence énergétique de 15'760 et 13'822 m², qui ont été rénovés par étape. Sur chacun des immeubles, la récupération de chaleur sur l'air vicié se fait via une pompe à chaleur dédiée au préchauffage de l'ECS, sans solaire thermique.

Les systèmes ont fonctionné sans problèmes durant les 2 années du suivi, mais les performances sont en dessous de ce qui était prévu. Le taux de couverture renouvelable a été de 20% environ, contre 25% prévu dans le cadre du projet. Le COP système observé est inférieur aux prévisions, suite à deux causes :

- La pompe à chaleur ne fonctionne pas comme prévu (COP inférieur aux données fabricant)
- Le choix de ne pas modifier l'échangeur de chaleur entre la PAC et le stock de préchauffage au moment des travaux résulte en une augmentation d'une dizaine de degrés des niveaux de température en aval de la PAC.

La mesure détaillée de ce système a permis de valider un modèle de simulation complet de ce type de système.

Etude de cas « Meyrin »

La seconde étude concerne un ensemble de bâtiments de 3 niveaux hors-sol, rénové récemment et est équipé d'une installation de récupération de la chaleur sur l'air vicié avec préchauffage solaire.

Dans ce cas, les performances mesurées se sont avérées meilleures que ce qui avait été prévu, principalement suite à une consommation d'ECS basse et bien inférieure aux normes. Le solaire a correctement fonctionné (environ 700 kWh par m² de capteur) et, vue la faible demande en eau chaude, représente plus de 40% de la chaleur pour l'ECS. Le système de récupération étudié a fourni la même quantité d'énergie que le solaire, avec un COP de 4.85 au niveau de PAC. Cette excellente valeur est due aussi bien à la qualité intrinsèque du matériel qu'à son usage en conditions optimales. Pour une quantité d'électricité très comparable à ce qui était prévu, ceci permet de fournir beaucoup plus de chaleur qu'attendu. Il s'agissait de la deuxième installation effectuée par le bureau d'étude, et l'amélioration des résultats est notable. Enfin, et par conséquence des points précédents, le complément en gaz a été réduit drastiquement puisqu'il passe de près de 50% de taux de couverture à moins de 15%.

En complément, une étude par simulation numérique montre qu'en absence d'installation solaire thermique, le défaut de production solaire pourrait être intégralement assuré par la PAC, dont le COP augmenterait même légèrement, grâce aux températures d'arrivée d'eau plus basse en absence de préchauffage solaire.

L'analyse économique de ce système a été réalisée par une double approche : en coût marginal, qui ne prend en compte que les coûts additionnels liés au système, et en coût moyen, qui prend en compte une partie des coûts communs. Les coûts marginaux sont évidemment inférieurs mais le coût moyen représente mieux l'approche globale de la rénovation – qui est plus qu'un simple empilement de solutions issues d'un catalogue et considérées individuellement. La notion de coût du kWh économisé est donc plus complexe qu'il n'y paraît dès que l'on désire désagréger un coût global en diverses composantes, liées à des interventions particulières mais réalisées dans une opération plus globale. L'analyse économique a montré que la présence du solaire thermique n'est économiquement pas judicieux.

Enfin, une série de simulation permet de conclure sans ambiguïté que le couplage avec du photovoltaïque est en principe meilleur qu'avec du solaire thermique, l'approvisionnement d'électricité sur le réseau étant quasiment identique, avec pour avantage une production d'électricité supplémentaire, qui pourrait être absorbée localement pour les communs d'immeubles ou les occupants ou injectée sur le réseau. Toutefois, cette conclusion reste vraie pour des immeubles pas trop élevés (jusqu'à environ une dizaine de niveaux). Au-delà, et selon la configuration de toit et la consommation d'eau chaude spécifique, l'avantage du PV serait moins flagrant et resterait à étudier au cas par cas.

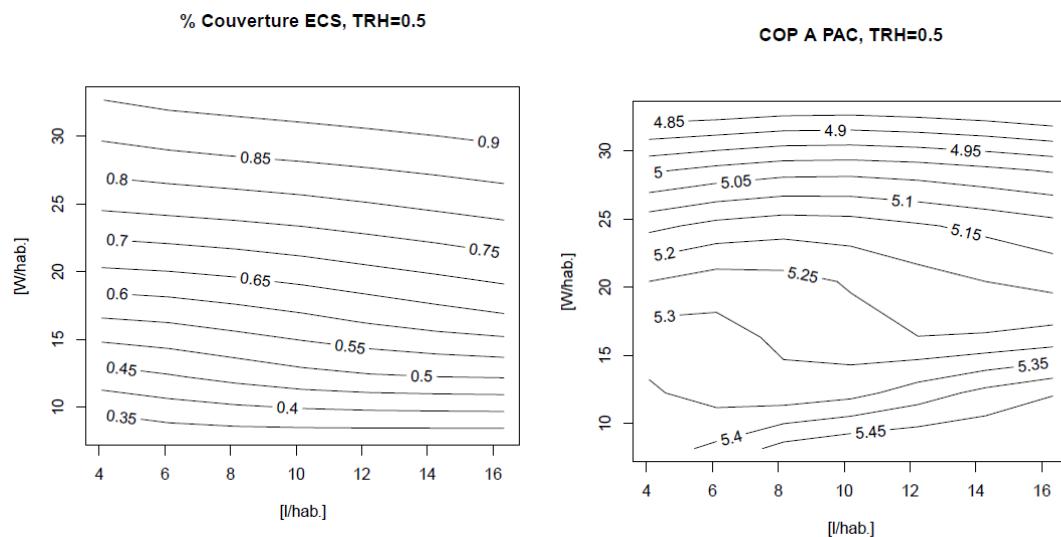
Règle de dimensionnement

Enfin en se basant sur un grand nombre de simulations numériques, nous avons élaboré les indications suivantes pour le pré – dimensionnement de systèmes de récupération de chaleur sur l'air vicié via une pompe à chaleur dédiée au préchauffage de l'ECS :

- Dimensionner généreusement les échangeurs de chaleur et choisir une PAC de bonne qualité,
- Le volume du stock dédié au préchauffage doit être d'environ 5 litres par habitant; il n'est pas nécessaire de prévoir trop important si le bâtiment est d'une certaine taille.
- La puissance de la PAC est en fait l'élément le plus sensible. A cet égard, une puissance importante (qui permet un grand taux de couverture) a tendance à dégrader le COP (étant donné un préchauffage ECS à plus haute température), et vice-versa. Pour fixer les idées, une puissance de

l'ordre de 20 W/hab permet d'atteindre un COP PAC de 5 tout en couvrant plus de 60% de la demande d'eau chaude.

- La présence d'un système PV de taille suffisante pourrait partiellement lever ce conflit, dans la mesure où il permet de viser un haut taux de couverture sans trop impacter l'appel d'électricité sur le réseau.
- Les puissances des auxiliaires, ainsi que leur mode d'enclenchement, doivent être étudiées attentivement, sous peine d'une baisse drastique des performances au niveau du système.



Taux de couverture ECS (gauche) et COP PAC (droite), en fonction de la taille relative du stockage dédié à la PAC (axe vertical) et de la puissance relative de la pompe à chaleur (axe horizontal), pour un taux de renouvellement d'air de 0.5 h^{-1} .

Introduction générale

L'objectif de ce projet est de contribuer à la réussite des objectifs fixés par la politique énergétique en stimulant par un processus de feedbacks entre académiques et praticiens (processus d'innovation incrémentale) les bonnes pratiques et solutions d'efficacité énergétique retenues dans le domaine de la rénovation énergétique des grands ensembles d'habitation d'après-guerre.

Ces bâtiments d'habitation, construits dans les années 60 et 70, arrivent simultanément en période de rénovation. Ils présentent un indice de dépense de chaleur (IDC) élevé dont la médiane genevoise est d'environ 500 MJ/m²/an (Khoury, 2014) et constituent ainsi un gisement important d'économies d'énergie et de réduction des émissions de CO₂. Le défi majeur consiste dès lors à réussir la modernisation de ces bâtiments qui, ayant passé la cinquantaine, nécessitent un assainissement énergétique et une mise aux normes dans les prochaines années.

Certains de ces bâtiments ont déjà subi des travaux d'améliorations thermiques. Dès lors, il est du plus grand intérêt de savoir quelles ont été les motivations, les difficultés rencontrées, les solutions d'efficacité énergétique retenues et les performances réelles énergétiques, économiques et environnementales de ces rénovations, dans une perspective d'amélioration des pratiques et de leur promotion.

Le projet comporte les volets complémentaires suivants :

- Le premier volet (volet A) concerne le benchmark des performances énergétique, économique et environnementale d'un ensemble représentatif de rénovations d'immeubles d'habitation dans une perspective d'amélioration des pratiques et de leur promotion.
- Les deux volets suivants (volets B1 et B2) concernent l'analyse de deux solutions d'efficacité énergétique spécifiques : i) la fermeture des balcons en loggia comme solution d'efficacité énergétique en hiver ; ii) la récupération de chaleur sur air vicié pour le préchauffage de l'ECS comme alternative à la ventilation double-flux avec récupération de chaleur (VDF).

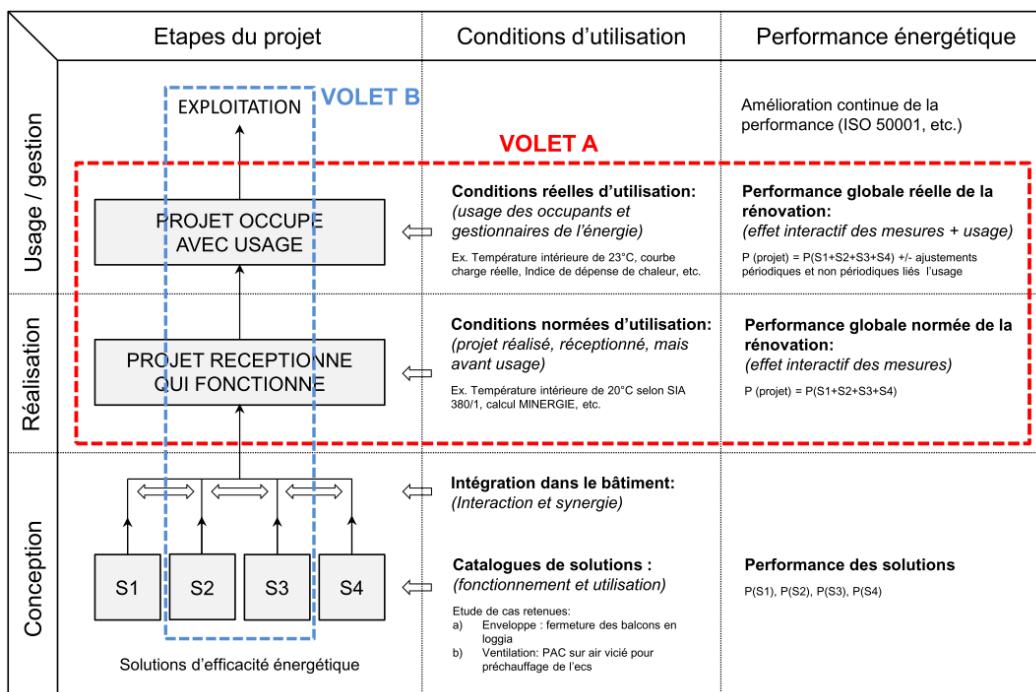


Figure 1. Vision synthétique du projet de recherche avec les volets A et B

Remerciements

Nous remercions les membres du groupe de suivi COMPARE RENOVE pour leur précieuse contribution à cette plateforme de partage d'expérience sur les rénovations, leur grande disponibilité et leur intérêt pour le travail réalisé, en particulier :

- François Baud (*Bureau d'architecture Baud & Früh*), Flourentzos Florentzou (*ESTIA SA*), Christian Freudiger (*OCEN*), Peter Haefeli (*Archiwatt*), Alexandre Molinari (*Brolliet SA*), Rolf Moser (*OFEN*), Olivier Ouzilou et Jan Schneider (*Signa-terre SA*), Frédéric Pérone (*CPEG*), Patrik Rechsteiner (*CVSC GITEC SA*), Jean-Marc Santines et Mariapia Barben-Vargas (*Ville de Genève*), Guy Tornare (*Coopérative La Cigale*), Willi Weber (*Consultant expert pour les aspects architecture et urbanisme*) et Jean-Marc Zgraggen (*Services Industriels de Genève*). Nos pensées vont également à Charles Favre (*Régimo Genève SA*) qui nous a quittés au cours de ce projet à la suite d'un accident.

Nous remercions les personnes suivantes pour leurs contributions spécifiques au projet :

- François Baud pour le partage des enseignements tirés de la fermeture des balcons en loggia du bâtiment rénové « La Cigale » (volets A et B1)
- Olivier Zuber pour sa participation à l'analyse des coûts de rénovation (volet A)
- Willi Weber pour sa contribution à l'évaluation des aspects architecture/urbanisme des bâtiments de l'échantillon (volet A)
- Yann Demont pour sa participation au datamining (volet A)
- Zeinab Alameddine pour les simulations Lesosai (volet A)
- Eric Pampaloni pour son support technique tout au long du projet, la mise en place du suivi énergétique des installations et la campagne de photos effectuée (volets B1 et B2)
- Anthony Haroutunian pour les mesures de débits d'air et valeurs U sur le bâtiment « La Cigale » (volet B1)
- Peter Haefeli pour le relevé des mesures (volet B2)
- Patrick Rechsteiner pour les informations concernant les coûts du système de l'installation « Meyrin » (volet B2).

Nous remercions également les institutions suivantes pour la mise à disposition de données et de documents :

- Office cantonal de l'énergie, Genève (OCEN)
- Office d'autorisation de construire, Genève (OAC)
- Office cantonal de la statistique, Genève (OCSTAT)
- Office cantonal du logement et de la planification foncière, Genève (OCLPF)
- Services Industriels de Genève (SIG)

Finalement, nous remercions nos mandants pour le financement du projet :

- Office fédéral de l'énergie (OFEN)
- Office cantonal de l'énergie de Genève (OCEN)
- Commission pour la technologie et l'innovation (CTI) dans le cadre du programme SCCER FEEB&D (KTI.2014.0119)
- Services Industriels de Genève (SIG)

PARTIE A : Analyse comparative des performances globales mesurées et planifiées de rénovations énergétiques

A.1 Introduction

Ce premier volet de l'étude s'intéresse à la performance réelle énergétique, environnementale et économique des rénovations énergétiques, dans une perspective d'amélioration des pratiques et de leur promotion. Il est fondé sur une analyse comparative - de type *benchmarking* - d'un ensemble représentatif de grands immeubles d'habitation collectifs construits après-guerre, majoritairement au cours des années soixante, et rénovés depuis 2005 (rénovation globale ou par étapes de l'enveloppe thermique avec ou sans la rénovation des systèmes techniques).

Cette analyse comparative vise à :

- Créer une base de connaissance des pratiques et des solutions d'efficacité énergétique retenues dans le domaine de la rénovation des immeubles d'habitation d'après-guerre (pratiques actuelles vs meilleures pratiques) ;
- Comparer les performances globales réelles des bâtiments rénovés avec celles prévues dans les projets calculés en conditions normées d'utilisation ;
- Evaluer les écarts de performance en rénovation (projet vs. réalité) et déterminer l'amplitude des écarts, les raisons possibles et le potentiel d'atténuation ;
- Dégager les enseignements tirés et les processus d'amélioration des pratiques de rénovation en vue de leur promotion à grande échelle (notamment sous forme d'une brochure d'information destinée aux acteurs de la rénovation).

A.2 Démarche méthodologique

A.2.1 Critères de sélection des opérations

Les opérations de rénovation énergétique analysées dans le cadre de cette étude ont été sélectionnées à partir de la liste des requêtes d'autorisation de rénovation déposées à l'Office cantonal de l'énergie à Genève entre 2005 et 2012. Une analyse détaillée de cette liste a permis de déterminer le taux de rénovation énergétique des immeubles d'habitation durant cette période dans le canton de Genève (Khoury, 2014).

Les principaux critères de sélection des opérations sont résumés dans le Tableau 1. Pour plus d'information concernant le processus de sélection, se référer à l'étude complète citée ci-dessus.

Critères de sélection	Description
Catégorie de bâtiment	Immeubles de logements locatifs
Affectation	100% logements (avec éventuelles activités au rez-de-chaussée)
Epoque de construction	1946-1980 (période d'après-guerre)
Année de rénovation	Requêtes essentiellement déposées avant 2010, soit avant l'introduction de la nouvelle loi cantonale sur l'énergie
Surface rénovée	Surface par opération supérieure à 1500 m ²
Nature des travaux	Rénovation énergétique de l'enveloppe thermique avec ou sans la rénovation des systèmes de production de chaleur
Exigences	Rénovation selon la norme SIA 380/1 (justificatif par performance globale de préférence) avec ou sans labellisation Minergie
Disponibilité de l'information et problème de comptabilisation	Opérations dont les dossiers d'autorisation et les pièces énergétiques sont disponibles aux services concernés et dont la comptabilisation des économies d'énergie est possible

Tableau 1. Critères de sélection des opérations de rénovation

A.2.2 Présentation des opérations de rénovation analysées

Description de l'échantillon

Au total, 26 opérations de rénovation ont été sélectionnées (nommées B1 à B26). Ces opérations regroupent 115 immeubles d'habitation (allées) et plus de 3'000 logements, abritant près de 5'500 habitants et totalisant une surface de référence énergétique (SRE) d'environ 285'000 m² (Tableau 2).

Année de construction	Nombre opérations	Nombre bâtiments	Nombre logements	SRE [m ²]	SRE [%]
1946-1960	6	20	488	34 269	12%
1961-1970	17	78	1902	192 309	68%
1971-1975	3	17	634	56 933	20%
Total	26	115	3 024	283 511	100%

Tableau 2. Composition de l'échantillon

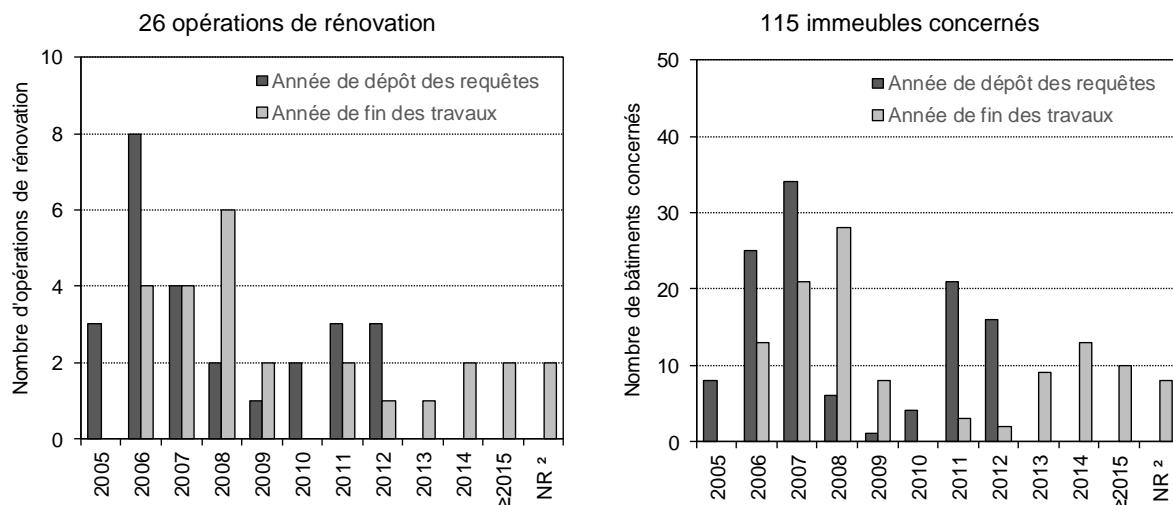


Figure 2. Répartition des opérations de rénovation (à gauche) et des bâtiments concernés (à droite) selon l'année de dépôt des requêtes et l'année de fin des travaux

Ces bâtiments sont assez représentatifs de ceux construits durant la période d'après-guerre dans le canton de Genève et plus globalement en Suisse. De par leur taille et leur état de vétusté, ils présentent un important gisement d'économie d'énergie surtout qu'ils arrivent aujourd'hui en période de rénovation.

Les bâtiments construits entre 1961 et 1970 constituent près de 2/3 de la surface totale chauffée de notre échantillon (68% ; 192'000 m²). Cela représente 4.9% de la SRE du parc de logements collectifs édifiée durant cette décennie à Genève (Khoury, 2014). Cette part s'élève à 11,9% si on considère l'ensemble du complexe résidentiel cité Lignon (B26²). La taille de l'échantillon est donc importante.

Environ 2/3 des opérations de rénovation analysées et des bâtiments concernés ont reçu l'autorisation de construire entre 2005 et 2009, soit avant l'entrée en vigueur de la nouvelle loi cantonale sur l'énergie en

¹ NR : Rénovations non réalisées à fin 2016.

² La requête d'autorisation B26 concerne la rénovation thermique de l'ensemble résidentiel « Cité du Lignon » regroupant plus de 80 allées et totalisant à elle seule près de 286'000 m². Dans notre échantillon, nous avons considéré uniquement les allées 20 à 24 de l'avenue du Lignon, sur lesquels a été calculé le bilan thermique.

été 2010. Le reste concerne des rénovations déposées entre 2010 et 2012, ayant fait l'objet d'une analyse plus spécifique dans cette étude (cf. Figure 2).

Sur les 26 opérations retenues, 16 ont été réalisées durant la période 2006-2009 (62%), 6 entre 2010 et 2014 (23%) et enfin 4 opérations ont été réalisées après 2014 ou non réalisées à fin 2016 (15%). Les proportions demeurent sensiblement les mêmes pour la répartition selon le nombre d'immeubles concernés, le nombre de logements et la surface de référence énergétique.

Le Tableau 3 propose une synthèse des caractéristiques générales de l'échantillon analysé.

Année de rénovation	Lot	Type d'opérations	Justificatif thermique	Numéro opérations	Nombre opérations	Nombre bâtiments	SRE [m ²]
2006-2009	1	Rénovation	Perf. globale	B1 à B10	10	51	111 902
	2	Rénovation (+surélévation)	Perf. globale	B18, B20, B21 (r+s)	3	11	32 751
2010-2014	3	Rénovation	Perf. ponctuelle	B22, B23, B24	3	8	24 947
		Rénovation (HPE-THPE)	Perf. globale	B11, B12, B13	3	14	21 489
Après 2014 ou NR ¹	4	Rénovation (par étapes)	Perf. globale	B14, B15, B16 (a+b)	3	13	33 825
		Rénovation	Perf. globale	B17, B19, B25, B26	4	18	58 597
¹ NR: Opérations non réalisées à fin 2016				Total	26	115	283 511

Tableau 3. Caractéristiques générales de l'échantillon analysé

Ces opérations ont été réparties en 4 lots comme suit :

- Lot 1 : comprend toutes les rénovations réalisées avant 2010, sans création de surfaces habitables supplémentaires et avec justificatif thermique par performance globale (B1 à B10) ;
- Lot 2 : englobe toutes les rénovations réalisées avant 2010, à l'exception de celles comprises dans le lot 1. Ce lot regroupe les rénovations et surélévations (r+s) avec justificatif par performance globale et les rénovations avec justificatif par performance ponctuelle (établi pour un élément individuel, sans calcul des besoins en chaleur du bâtiment à rénover) ;
- Lot 3 : comprend les rénovations réalisées entre 2010 et 2014, soit après l'entrée en vigueur de la nouvelle loi cantonale sur l'énergie et le renforcement de la réglementation thermique des bâtiments. Ce lot regroupe 3 rénovations à haute et très haute performance énergétique (HPE-THPE) labellisées Minergie et Minergie-P et 3 autres rénovations réalisées en deux étapes (a+b) qui feront l'objet d'études de cas dans le volet B2 de cette étude.
- Lot 4 : regroupe 2 rénovations non réalisées à fin 2016 et 2 autres rénovations en cours de réalisation (2015 et 2016).

On distingue aussi différents types de rénovation : rénovation partielle (type P1/3 : 1 élément de l'enveloppe rénové), rénovation de la façade (type F 2/3 : 2 éléments de l'enveloppe rénovés), rénovation quasi-complète ou complète (type C3/3 : ≥ 3 éléments de l'enveloppe rénovés), avec ou sans la rénovation des systèmes techniques. Pour plus d'infos, se référer au point A.3.1 Catalogues de solutions retenues.

Localisation et photos des bâtiments

Les Figures 2, 3 et 4 suivantes montrent respectivement la localisation géographique, les photos et les plans de situation des bâtiments analysés.

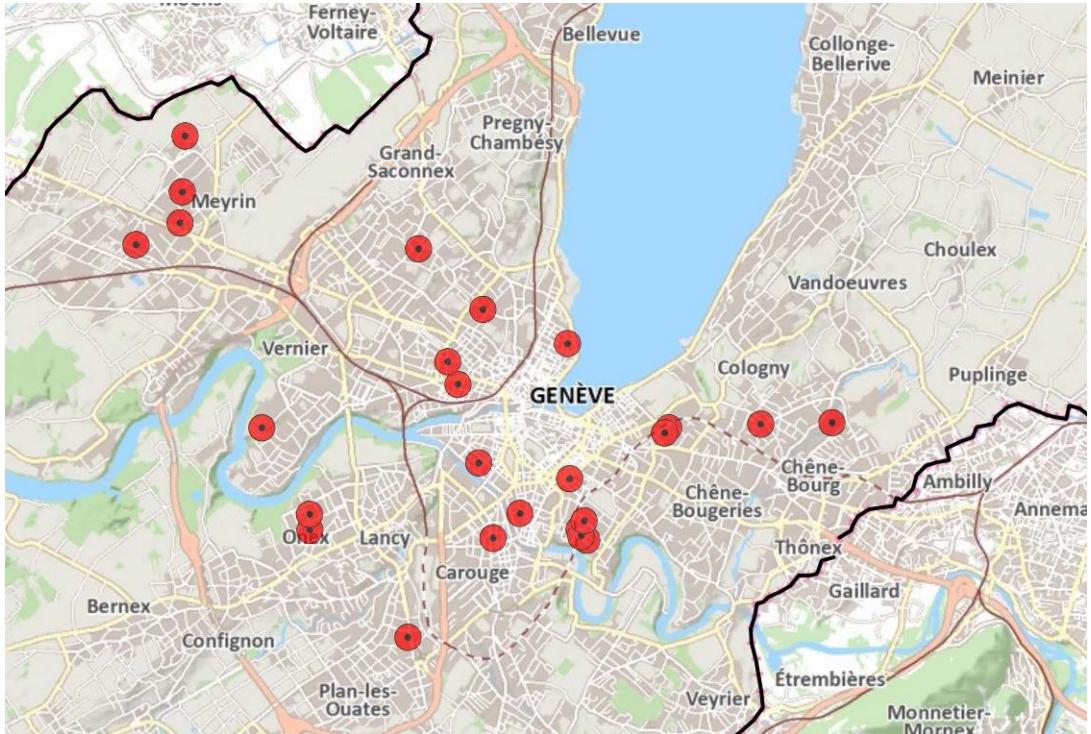


Figure 3. Cartographie de l'échantillon (26 opérations de rénovation, 115 immeubles, env. 285 000 m²)

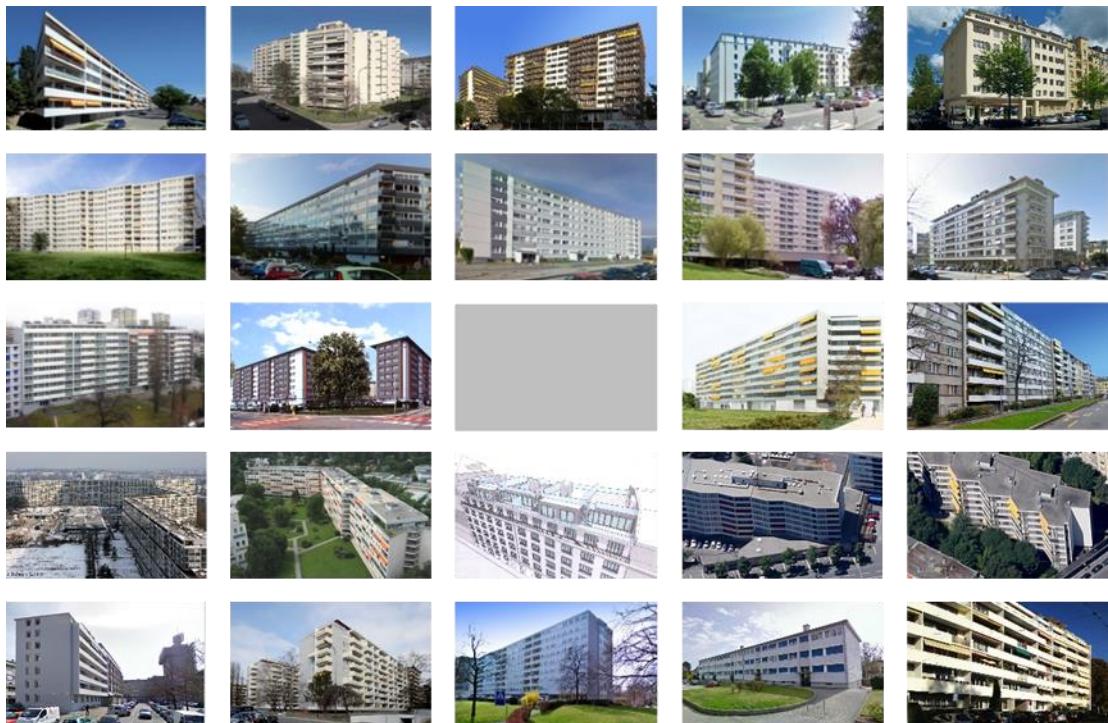


Figure 4. Photos des bâtiments de l'échantillon



Figure 5. Plans de situation des opérations de rénovation (extrait du SITG)

On observe que près de la moitié de ces bâtiments construits après-guerre (1946-1980) se situe dans les communes suburbaines du canton de Genève qui concentrent un grand volume de logements édifiés dans des grands ensembles ou des cités satellites, le reste étant situé sur la commune de Genève dans un

contexte de densification du centre. Notre échantillon est jugé représentatif du secteur résidentiel collectif genevois (1946-1980) qui affiche une répartition similaire des surfaces chauffées : 48% située au centre ; 52% répartie en périphérie urbaine (Khoury, 2014). Enfin, ces bâtiments sont principalement orientés d'est en ouest, partiellement au sud profitant des conditions optimales d'ensoleillement.

Caractéristiques physiques des bâtiments d'après-guerre

Les bâtiments de l'échantillon ont globalement une forme très compacte. Leur compacité³ varie entre 0.55 et 1.15, avec une moyenne qui se situe à 0.73. Cette valeur vaut presque la moitié de la valeur standard indiquée dans le cahier technique SIA 2031⁴ pour la catégorie habitat collectif et qui s'élève à 1.30.

La compacité du bâtiment a une influence sur les valeurs limites à respecter et les valeurs cibles à viser des besoins normés de chauffage. L'utilisation d'un facteur 1.3 au lieu de la valeur moyenne observée (0.7) entraîne une augmentation d'un facteur 1.4 des besoins de chauffage (Khoury 2014, p 34). A noter que la plupart des bâtiments se situent dans des plans d'ensembles caractérisés par une implantation par volumes continus. L'implantation en mitoyenneté permet de réduire les surfaces en contact avec l'extérieur et par conséquent de diminuer les déperditions thermiques à travers l'enveloppe.

La composition de l'enveloppe thermique des bâtiments de notre échantillon est en moyenne comme suit : les éléments opaques (murs y compris les caissons des stores) constituent 42% de la surface totale, les surfaces vitrées 25% et enfin les toitures et les planchers respectivement 17% et 16%. Ces résultats sont calculés à partir des informations contenues dans les pièces énergétiques jointes aux dossiers d'autorisation.

La proportion vitrée des façades (rapport de la surface vitrée à la surface de la façade contre extérieur) est en moyenne de 39%. Cette proportion, qui varie entre 17% et 63% dans notre échantillon, dépend essentiellement de la typologie de façade du bâtiment.

Qualité énergétique avant rénovation

L'énergie finale totale (Ehww ou IDC⁵) consommée par les 115 immeubles de l'échantillon avant rénovation pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire s'élève à 168 TJ/an (47 GWh/an). Cette valeur représente près de 4% de la consommation totale des bâtiments résidentiels collectifs construits entre 1946 et 1980 à Genève (1255 GWh selon Khoury 2014).

Les valeurs de consommation des bâtiments ont été calculées à partir des relevés de consommation disponibles sur SITG (SITG, 2017) (valeurs moyennes sur les trois années qui précèdent la réalisation des travaux) et sont toutes normalisées à 2659 DJ18/12 (valeur de référence pour la correction climatique genevoise, jusqu'en 2010 [OCEN, 2006]).

Ces bâtiments sont entièrement dépendant des énergies fossiles : mazout (86%), gaz naturel (9%) et chaleur à distance provenant de la combustion du gaz naturel (5%).

La consommation moyenne de ces bâtiments est de 601 MJ/m² par an. La Figure 6 donne pour chacun des 26 sites l'indice moyen Ehww sur 3 ans avant travaux, classé par ordre décroissant de consommation. Au total, 23 sites sur 26 ont une consommation thermique qui dépasse avant rénovation la consommation

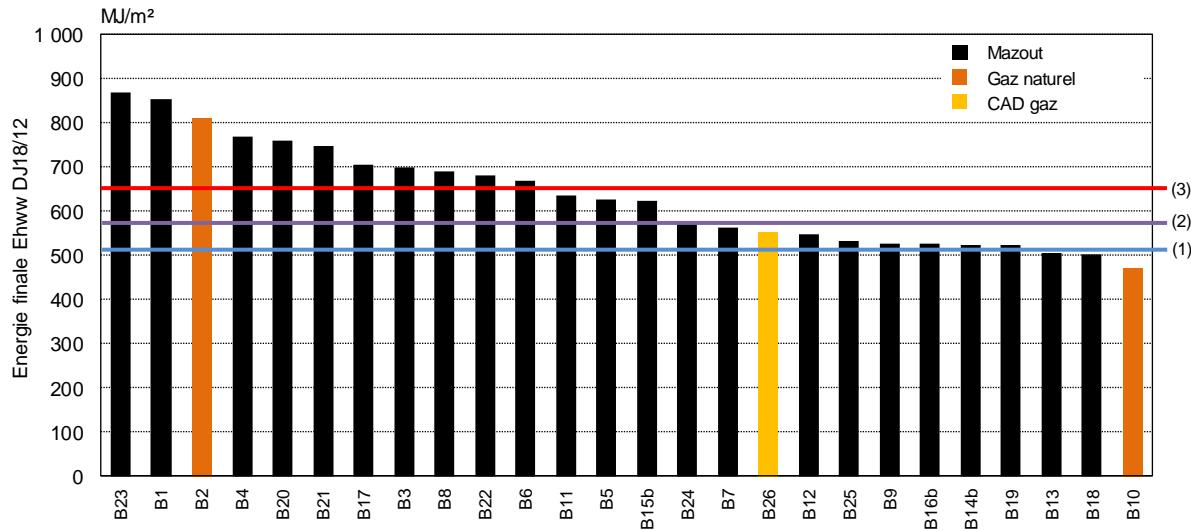
³ La compacité est le rapport entre la surface pondérée de l'enveloppe thermique et la surface de référence énergétique.

⁴ Tableau C.2 du cahier technique SIA 2031 Certificat énergétique des bâtiments (édition 2009). La version 2016 de cette norme propose une méthode de calcul plus fine du facteur de forme.

⁵ L'indice de dépense de chaleur (IDC) est un indicateur utilisé communément dans le canton de Genève et représente la quantité annuelle d'énergie finale consommée pour la production de chaleur (chauffage et eau chaude sanitaire), ramenée à un mètre de plancher chauffé et normalisée en fonction des degrés jours de chauffage de l'année considérée. La méthode appliquée avant 2010 a été utilisée dans cette étude (OCEN, 2006).

moyenne en 2010 des bâtiments résidentiels collectifs construits entre 1946 et 1980 à Genève (soit 512 MJ/m²). On note aussi que 14 opérations ont des consommations supérieures à 582 MJ/m² (3^e quartile), dont 11 dépassent le 9^{ème} décile (654 MJ/m²).

En conclusion, les bâtiments de notre échantillon sont assez représentatifs des bâtiments qui devront être rénovés en priorité dans les prochaines années.



Indices en 2010 des bâtiments résidentiels collectifs genevois construits entre 1946 et 1980 (Khoury, 2014):

(1) Valeur moyenne : 512 MJ/m²; (2) Valeur 3^e quartile : 582 MJ/m²; (3) Valeur 9^{ème} décile : 654 MJ/m²

Figure 6. Energie finale pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des bâtiments avant rénovation (B1-B26), exprimée en MJ/m² par an (valeurs moyennes sur 3 ans, classées par ordre décroissant de consommation). Les agents énergétiques sont également indiqués sur la figure.

Qualité architecturale et urbanistique

La qualité architecturale et urbanistique des bâtiments de l'échantillon (substance existante avant travaux) et celle des opérations de rénovation a été évaluée dans le cadre d'une expertise indépendante (Weber, 2017). Cette dernière vise à identifier les spécificités de ces bâtiments afin de tirer des enseignements de ces réalisations.

Mesures de protection / Guides d'architecture	Nombre opérations	Numéro opération	Remarques
Classement (objet)	1	B17	Classement MS-c257, février 2002 Guide d'architecture Suisse. Volume 3. pp167
Classement (site)	1	B26	Plan de site n° 29430A-540, juin 2009 Guide d'architecture Suisse. Volume 3. pp156
Bâtiments à l'inventaire	0	0	-
Bâtiments cités dans des guides d'architecture	5	B2 B9 B22 B12-B13	XXe, un siècle d'architecture pp 400 XXe, un siècle d'architecture pp 407 XXe, un siècle d'architecture pp 84-85 Guide d'architecture suisse. Volume 3. pp 153
Bâtiments sans caractère spécifique	19	-	-

Tableau 4. Qualités des bâtiments existants de l'échantillon

La qualité des bâtiments existants est résumée dans le Tableau 4 (références de classement d'objets ou de sites considérés comme remarquables et dignes de protection ou de publications dans des guides d'architecture ou de revues d'architecture).

Les demandes d'autorisation pour la rénovation de ces bâtiments sont soumises à titre consultatif à la Commission d'architecture (CA) et à la Commission des monuments et des sites (CMNS) lorsque le bâtiment est digne d'être protégé. Leurs avis donnent une première évaluation qualitative des opérations réalisées. Ces services se sont prononcés sur 11 opérations (42% des opérations) avec des avis favorable, favorable sous réserve, très critique mais pas d'opposition et un avis défavorable aux travaux projetés dans l'opération B22 et demande d'engager une étude de plan de site pour mieux conserver dans le futur cet ensemble résidentiel. Pour plus d'infos, se référer à l'expertise (Weber, 2017).

Catégories de propriétaires

La moitié de la surface chauffée des bâtiments de notre échantillon d'analyse sont détenues par des assurances. Les institutions de prévoyance professionnelles, les institutions de droit public, le canton et les communes détiennent ensemble 21% des surfaces, suivis par les sociétés immobilières et les fonds de placement immobilier (14%), les particuliers (8%) et les sociétés coopératives d'habitation (7%).

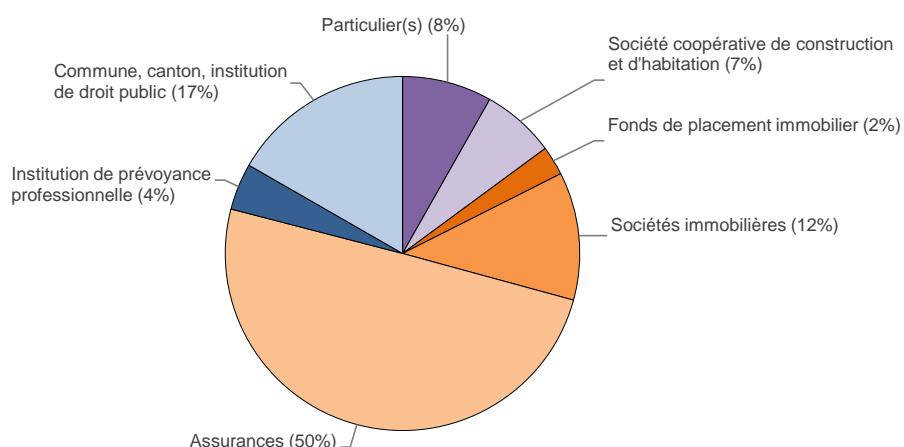


Figure 7. Répartition des surfaces chauffées des bâtiments de l'échantillon en fonction du type de propriétaire (100% = env. 285 000 m²)

En comparant ces résultats avec la répartition des logements collectifs occupés en permanence dans le canton de Genève (Khoury 2014, pp 103-104), on observe que les répartitions en fonction du type de propriétaire sont globalement similaires avec une inversion des catégories « assurances » et « particulier(s) ».

A.2.3 Indicateurs de performance

Plusieurs indicateurs de performance ont été utilisés dans cette étude afin d'évaluer la performance énergétique, environnementale et économique des rénovations énergétiques et de comparer les valeurs réelles avec les valeurs prévues en conditions standard d'utilisation (cf. Tableau 5).

Indicateurs de Performance énergétique		Unités	Description
ENR.	Ehww (ou IDC)	[MJ/m ² SRE]	Energie finale pour la production de chaleur (chauffage et ECS) consommée en conditions réelles d'utilisation par an, normalisée à 2659 DJ/an et ramenée à 1 m ² SRE
	Qhww re	[MJ/m ² SRE]	Besoins annuels en chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire en conditions réelles d'utilisation, normalisés à 2659 DJ/an et ramenés à 1 m ² SRE
	Qww re	[MJ/m ² SRE]	Besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude sanitaire, évalués en conditions réelles d'utilisation et ramenés à 1 m ² SRE
	Qh re	[MJ/m ² SRE]	Besoins annuels en chaleur pour le chauffage, évalués en conditions réelles d'utilisation, normalisés à 2659 DJ/an et ramenés à 1 m ² SRE
	Qh norm	[MJ/m ² SRE]	Besoins annuels en chaleur pour le chauffage, calculés en conditions normées d'utilisation selon SIA 380/1
	IDE	[kWh/m ² SRE]	Electricité totale (ménage et communs) consommée en conditions réelles d'utilisation, normalisée à 365 jours et ramenée à 1 m ² SRE
Performance environnementale		Unités	Description
ENV.	Emissions CO ₂	[tCO ₂ eq]	Quantité moyenne d'émissions de CO ₂ équivalent liées à la consommation thermique finale (par an)
	Emissions CO ₂ par m ² SRE	[kgCO ₂ eq/m ²]	Quantité d'émissions spécifiques de CO ₂ équivalent par m ² de surface chauffée et par année
	Intensité carbone	[gCO ₂ eq/kWh]	Quantité de CO ₂ équivalent émise, issue de la combustion d'agents fossiles, par unité d'énergie finale
Performance économique		Unités	Description
ECO.	Coût global rénovation	[Mio.CHF]	Coût global TTC ⁶ de la rénovation regroupant les coûts à plus-values énergétiques, les coûts à plus-values non énergétiques et les coûts d'entretien
	Coût global rénovation par m ² SRE	[CHFTTC/m ² SRE]	Coût global TTC ⁶ de la rénovation des bâtiments rapporté au m ² de surface chauffée
	Coût des travaux à p-v énergie par m ² SRE	[CHFTTC / m ² SRE]	Coût TTC ⁶ des travaux à plus-values énergétiques, rapporté au m ² de surface chauffée
	Coût du néga kWh	[ct/kWh]	Coût de l'énergie finale effectivement économisée par la rénovation (somme de l'amortissement, de l'achat de l'électricité de fonctionnement et des coûts de maintenance, rapporté à l'énergie économisée).
	Coût de la tonne de CO ₂ évitée	[CHF/tCO ₂ eq]	Coût de la tonne de CO ₂ évitée par la rénovation (coût total annuel (amortissement + exploitation) - prix de la taxe carbone - prix de l'énergie fossile économisée, rapportée à la quantité annuelle de CO ₂ évitée)
	Hausse moyenne des loyers	[CHF/pce]	Hausse moyenne des loyers admise après rénovation, exprimée en CHF par pièce habitable et par an

Tableau 5. Indicateurs de performance énergétique, économique et environnementale retenus pour l'analyse comparative

⁶ TTC : Toutes Taxes Comprises

Les données réelles de consommation thermique (chauffage et eau chaude sanitaire) des bâtiments avant et après travaux proviennent de la base de données SITG. Les besoins réels de chaleur (énergie utile) avant et après rénovation sont déduits à partir de la consommation thermique finale des bâtiments, moyenne sur 3 années consécutives avant et après travaux ; et cela lorsque les valeurs réelles n'étaient pas connues. Le calcul des besoins réels de chauffage ($Q_{h\ re}$) tient compte (Khoury, 2014):

- des fractions utiles de production en fonction du type d'installations (chaudière à mazout, chaudière à gaz, chauffage à distance, etc.) et de sa date de mise en service;
- des besoins d'eau chaude sanitaire estimés en fonction du nombre d'habitants en considérant une demande moyenne de 1080 kWh/hab/an (basée sur une analyse comparative de valeurs mesurées dans 65 immeubles d'habitation à Genève) ;
- d'une correction climatique de 2659 DJ18/12 (valeur de référence pour la correction climatique genevoise, jusqu'en 2010 [OCEN, 2006]), appliquée uniquement sur la part chauffage.

Les besoins de chauffage prévus après rénovation en conditions normées d'utilisation ($Q_{h\ norm,af}$) sont extraits des justificatifs thermiques présentés aux autorités, alors que les besoins normés avant travaux ($Q_{h\ norm,be}$) figurent rarement dans les dossiers d'autorisation. Ces derniers sont aussi jugés trop imprécis et surestiment souvent les besoins réels avant travaux. La définition des indicateurs de performance thermique se trouve dans Khoury 2014 (pp.38-41).

La consommation électrique des bâtiments est issue des factures des Services Industriels de Genève. Les quantités d'émissions de CO₂ associées à la consommation thermique finale ont été calculées en utilisant les facteurs d'émissions⁷ des agents fossiles fournis par l'Office fédéral de l'environnement. Les données utilisées pour la surface de référence énergétique (SRE), le nombre de logements et le nombre de pièces habitables sont celles figurant dans les dossiers d'autorisation.

Les coûts globaux des opérations de rénovation sont des coûts TTC (Toutes Taxes Comprises) provenant des devis finaux présentés par les architectes dans les dossiers d'autorisation. Une méthode présentée au point A.8 a permis ensuite de distinguer la part des coûts liés spécifiquement aux travaux à plus-value énergétique.

Les coûts du kWh économisé (négakWh) et de la tonne de CO₂ évitée ont été calculés en utilisant les coûts des travaux à plus-values énergétiques et les économies d'énergie finale réelles engendrées par les rénovations énergétiques. Pour cela, nous avons considéré une durée d'amortissement de 30 ans, un taux d'intérêt de 4%, un coût forfaitaire pour la maintenance et l'électricité de fonctionnement (7000 CHF/an) et une taxe de 84 CHF/tonne CO₂ émise (montant de la taxe carbone en 2016).

⁷ OFEV, Contenu énergétique et facteurs d'émissions de CO₂ des agents fossiles, n° G134-0310, disponible en ligne à l'adresse : <http://www.bafu.admin.ch/klima/09608/index.html?lang=fr>, consulté en avril 2017.

A.3 Performances prévues des opérations de rénovation (projet normé)

A.3.1 Catalogues de solutions retenues

Un catalogue riche et très varié de solutions a été retenu pour les 26 projets de rénovation analysés, mettant ainsi en évidence différentes pratiques exercées en matière de rénovation énergétique entre 2005 et 2012 dans le canton de Genève (cf. Figure 8).

Ces solutions provenant des demandes d'autorisation de rénovation ont été regroupées en trois grandes catégories :

- mesures portant sur l'enveloppe (toiture, parois opaques y compris les caissons de stores, parois vitrés et balcons, stores ou tentes) ;
- mesures portant sur les systèmes techniques (remplacement de la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire, pose de vannes thermostatiques et remplacement de la ventilation) ;
- mesures de mise aux normes (travaux d'aménagement intérieur, remplacement des installations sanitaires et de la réfection de la distribution d'eau pluviale (EP) et des eaux usées (EU)).

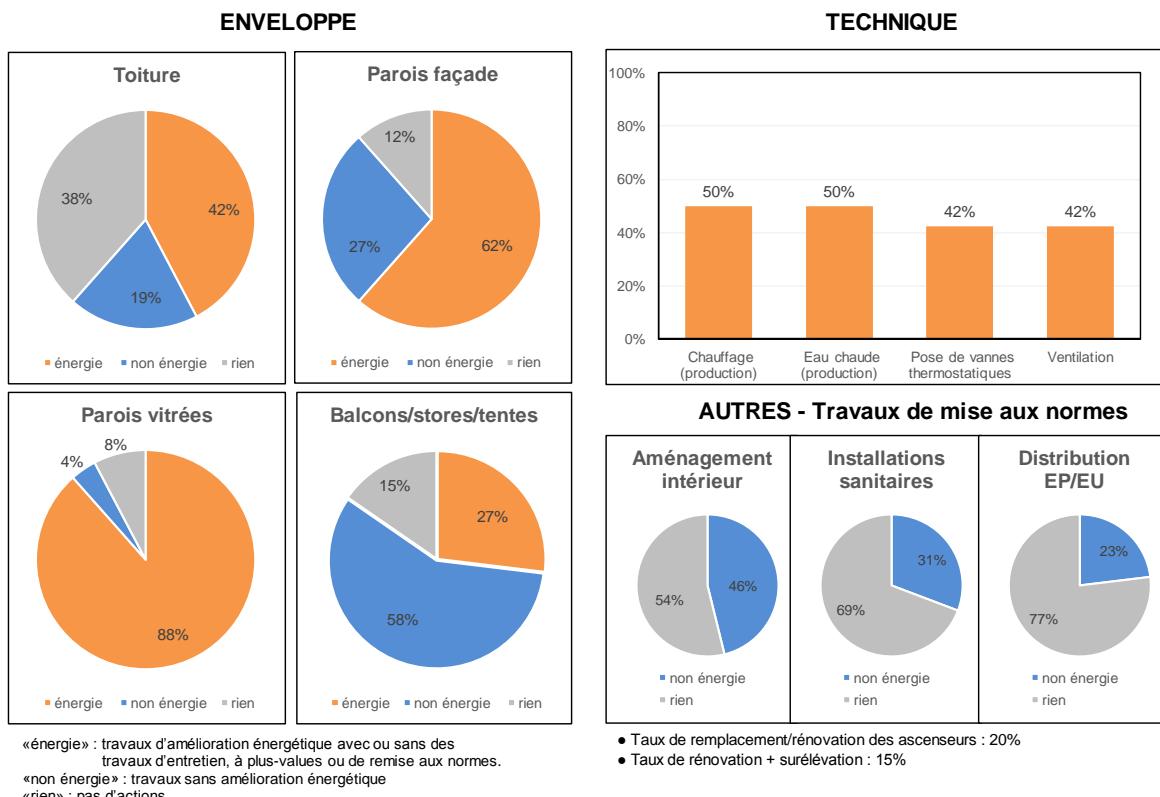


Figure 8. Catalogue de solutions retenues dans les projets de rénovation, réparties en 3 grandes catégories : enveloppe, technique et autres travaux de remise aux normes (100% = 26 opérations)

Pour chacune de ces catégories, nous avons recensé :

- les travaux « énergie » qui regroupent des actions d'amélioration énergétique, comprenant ou pas des travaux d'entretien, à plus-value et de remise aux normes ;
- les travaux « non énergie » qui ne visent pas des améliorations énergétiques (travaux d'entretien, à plus-value et/ou de remise aux normes) ;
- l'absence de travaux (« rien »).

Les résultats montrent que sur les 26 opérations analysées, il est prévu que des travaux d'amélioration énergétique soient réalisés sur 42% des toitures, 62% des parois opaques (façade), 88% des parois vitrées et environ 27% des balcons (création de loggias).

Dans la moitié des cas, l'installation de production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est prévue d'être rénovée (remplacement simple ou avec recours à des solutions renouvelables). Le taux de rénovation des installations de ventilation et celui de remplacement des anciennes vannes manuelles des radiateurs par des vannes thermostatiques s'élève chacun à 42%. Enfin, des mesures d'assainissement de l'éclairage des communs d'immeuble sont prévues dans 15% des cas.

Les travaux d'amélioration énergétique ont été accompagnés dans près de la moitié des cas (46%) par des travaux d'aménagement intérieur comme par exemple la réfection des cuisines et la pose de nouvelles portes palières respectant les normes actuelles de protection incendie. Le taux de remplacement des conduites et/ou des installations sanitaires s'élève à 31%, alors que celui de réfection de la distribution des conduites d'eau pluviale et d'eaux usées atteint 23%. Un taux similaire a été observé pour le remplacement ou réparation des ascenseurs. Enfin, l'échantillon comprend 4 cas de rénovation avec surélévation (3 cas réalisés entre 2006 et 2009 et 1 cas non réalisé à fin 2016).

En se basant sur le catalogue de solutions élaboré dans cette partie, ces opérations de rénovation peuvent se répartir comme suit :

- 11 opérations (42%) : Rénovations énergétiques « Globale, complète ou quasi-complète » de l'enveloppe thermique, portant sur trois éléments ou plus (avec ou sans la rénovation des systèmes techniques et la réalisation de travaux annexes) ;
- 14 opérations (54%) : Rénovations énergétiques « Partielle, Ponctuelle ou Façade » de l'enveloppe thermique, portant sur un seul ou deux éléments de la façade, par ex. isolation des éléments opaques ou/et remplacement des fenêtres (avec ou sans la rénovation des systèmes techniques et la réalisation de travaux annexes) ;
- 1 opération (4%) : Rénovation qui se limite à des travaux d'Entretien de l'enveloppe, mais avec remplacement du système technique.

A.3.2 Performances prévues des projets en conditions normées d'utilisation

La Figure 9 à la page suivante donne les performances prévues des projets de rénovation, comme annoncées dans les dossiers d'autorisation, calculées à l'aide de logiciels de simulation en conditions standard d'utilisation selon la norme SIA 380/1.

L'analyse a porté sur 20 opérations dont le bilan thermique complet était disponible dans les dossiers d'autorisation. Les résultats sont classés par ordre décroissant des pertes de transmission (Q_t) et de renouvellement d'air (Q_v). Les apports thermiques, indiqués en positif, correspondent aux apports utiles d'apports internes (ng^*Qi) et d'apports solaires (ng^*Qs). La demande de chaleur pour le chauffage (Q_h norm) représente le complément à fournir au bilan. Les valeurs absolues et relatives sont présentées respectivement en haut et en bas de la figure.

La demande de chauffage varie entre 245 et 62 MJ/m², avec une moyenne qui se situe à 154 MJ/m². Les rénovations conformes aux labels Minergie et Minergie-P se trouvent à droite de la figure. Leurs besoins annuels en chaleur pour le chauffage est en moyenne de 83 MJ/m². Ces besoins contribuent seulement à 42% des apports thermiques (contre 60% pour le reste de l'échantillon), le reste étant équitablement réparti entre les apports utiles internes et solaires. Des différences marquées peuvent être observées entre les bâtiments, en raison notamment de la typologie du bâtiment, du taux d'occupation et du type d'équipements électriques.

Les pertes par transmission à travers l'enveloppe représentent 65% des pertes totales de chaleur, alors que le reste (35%) est imputé aux pertes par renouvellement d'air. Cette dernière baisse à 23% pour les bâtiments non Minergie. On peut en déduire que la performance des bâtiments Minergie et Minergie-P est plus sensible au comportement des occupants (ex : ouverture des fenêtres).

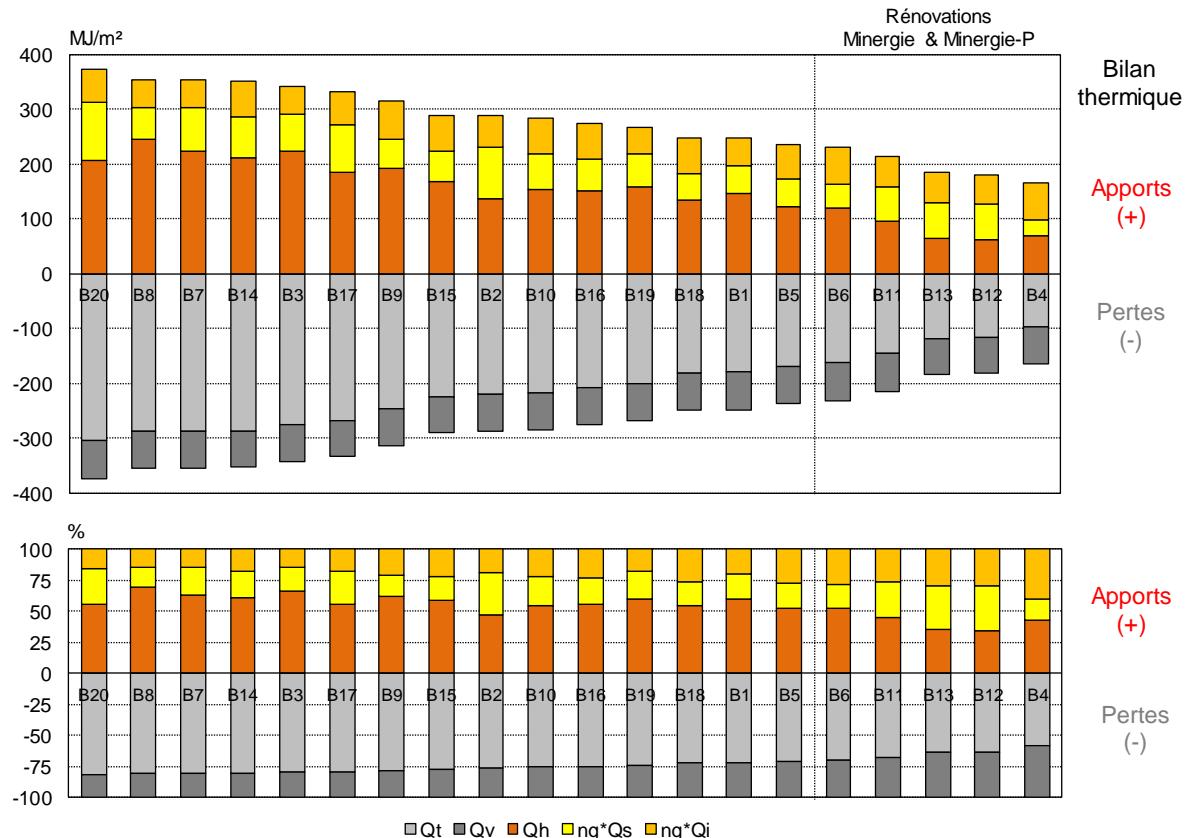


Figure 9. Bilans thermiques des projets de rénovation calculés en conditions normées d'utilisation et classés par ordre décroissant des déperditions Qt+Qv (apports en (+), pertes en (-))

La Figure 10 présente les pertes par transmission à travers les différents éléments de l'enveloppe⁸. On constate globalement que :

- les fenêtres, qui représentent environ 25% de la surface de l'enveloppe thermique des bâtiments rénovés, sont responsables en moyenne de près de la moitié des déperditions totales par transmission (Qt).
- les parois opaques (murs y compris les caissons de stores), qui constituent en moyenne 42% de la surface de l'enveloppe, participent à 30% des pertes Qt.
- les planchers et les toitures, avec 16% et 17% de la surface de l'enveloppe thermique, sont responsables respectivement de 14% et 7% des pertes Qt.

Enfin, les rénovations Minergie et Minergie-P se caractérisent par une réflexion globale sur l'enveloppe, avec une volonté d'assurer une continuité thermique de l'enveloppe des bâtiments. Des mesures d'amélioration thermique sont menées à la fois sur les fenêtres, les murs, la toiture et le plancher. Les pertes à travers ces éléments sont respectivement de 66, 38, 14 et 9 MJ/m²_{SRE} (valeurs moyennes). La répartition des pertes reste donc proportionnellement la même, mais l'isolation des planchers permet d'inverser les proportions des pertes à travers les toitures et les planchers, entre les bâtiments à haute

⁸ Dans le cas de l'opération B3, les valeurs annoncées pour les pertes à travers les murs et les planchers sont incorrectes. Cependant, après introduction des valeurs corrigées, nous avons retrouvé une valeur Qt similaire à celle annoncée.

performance énergétique et l'ensemble de l'échantillon. Les pertes à travers les éléments vitrés peuvent présenter des différences marquées entre les différentes opérations, dépendant des taux vitrés des façades (ex. opérations B12-B13 et B4).

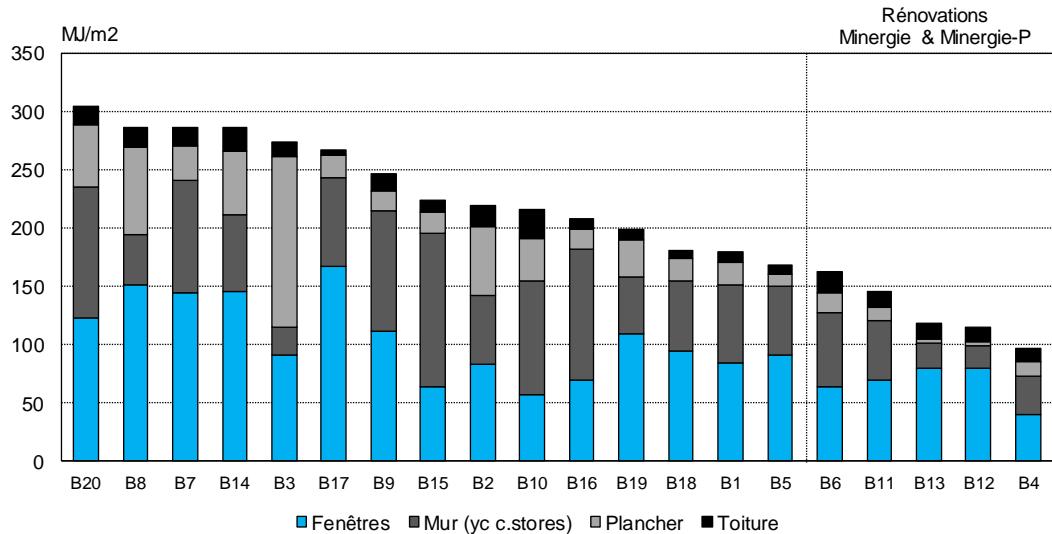


Figure 10. Déperditions thermiques à travers les différents éléments de l'enveloppe, calculées en conditions normées d'utilisation et classées par ordre décroissant des déperditions ($Qt+Qv$)

A.3.3 Performances des éléments de l'enveloppe thermique

Le coefficient de transmission thermique U moyen de l'enveloppe thermique des bâtiments après rénovation varie entre 1.34 et 0.38 W/m²K, avec une moyenne de 0.93 pour l'échantillon (cf. Figure 11). La performance de l'enveloppe des bâtiments rénovés Minergie et Minergie-P est plus performante et s'élève à 0.70 W/m²K. L'axe secondaire à droite donne le rapport entre la surface des fenêtres et la surface totale des façades contre extérieur (Aw/Af).

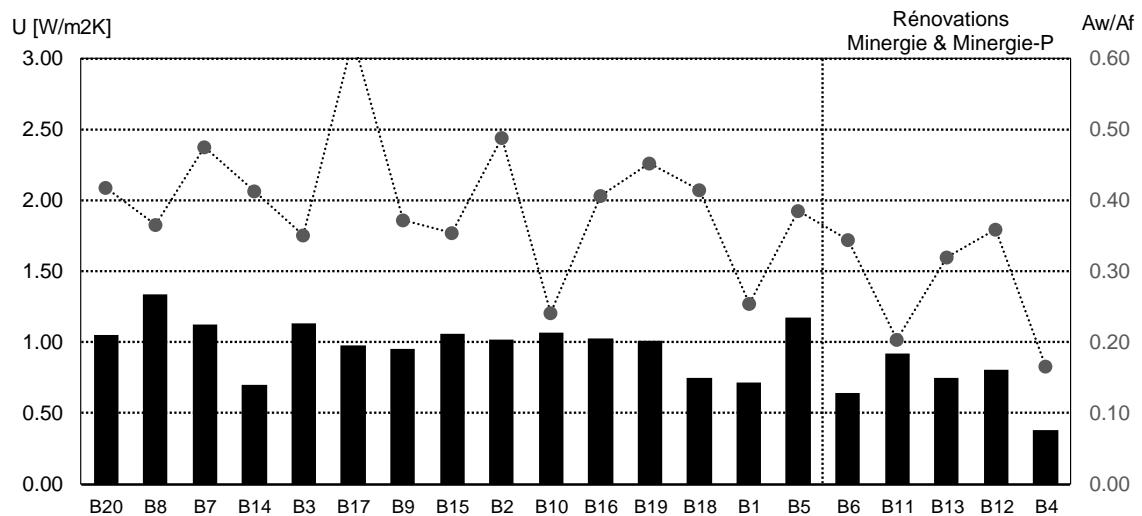


Figure 11. Coefficients moyens de transmission thermique (U en W/m²K) de l'enveloppe des bâtiments après rénovation (axe principale) et fraction surface fenêtre/façade (axe secondaire), classés par ordre décroissant des déperditions ($Qt+Qv$)

La Figure 12 donne la répartition en percentiles de la performance des différents éléments de l'enveloppe. Les valeurs suivantes sont affichées du bas vers le haut : valeur minimale, premier décile (D1), premier quartile (Q1), médiane (M), troisième quartile (Q3) et enfin valeur maximale de l'échantillon. Les traits en pointillés indiquent les valeurs limites à respecter en cas de rénovation de l'élément en question (selon la norme SIA 380/1, édition 2001 et 2009).

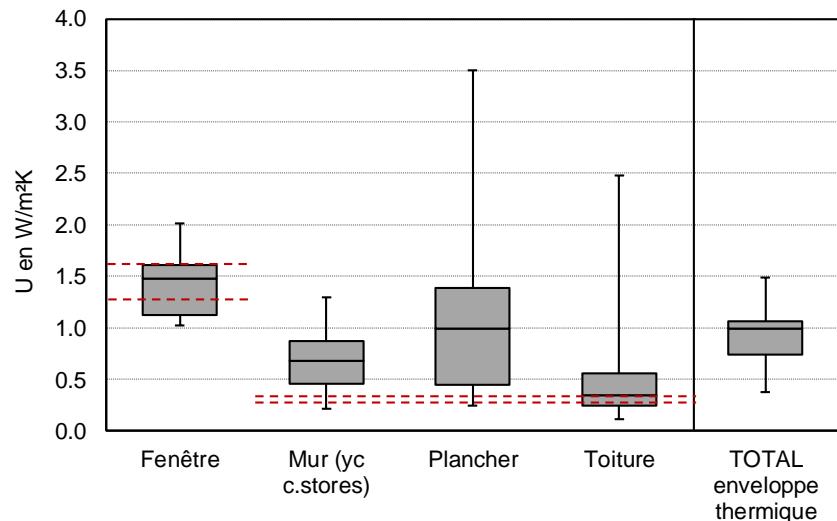


Figure 12. Répartition en percentiles des coefficients de transmission thermique (U en W/m²K) de l'enveloppe des bâtiments après rénovation (Traitillés : valeurs limites SIA 380/1, éd. 2001 et 2009)

Dans la plupart des cas la performance des fenêtres respecte les valeurs-limites préconisées par la norme SIA 380/1 (1.3 – 1.7 W/m²K, édition 2009 – 2001), ce qui montre qu'elles ont généralement été remplacées. Les coefficients des toitures sont assez proches des valeurs-limites pour les éléments opaques (0.30 – 0.25 W/m²K). Enfin, les coefficients des murs et des planchers dépassent largement les valeurs-limites, ce qui montre que ces éléments ne sont pas toujours isolés lors de la rénovation.

A.3.4 Performances des systèmes techniques

La performance attendue des systèmes techniques (production de chaleur, distribution et ventilation) mises en œuvre dans le cadre des rénovations n'est malheureusement pas toujours disponible dans les dossiers d'autorisation analysés. Ceci est particulièrement le cas des dossiers datant d'avant 2010.

Ce manque d'informations ne nous a pas permis d'évaluer la performance moyenne annoncée des systèmes techniques, comme ce fut le cas pour les éléments de l'enveloppe des bâtiments rénovés. Il convient néanmoins de rappeler que les différentes mesures portant sur les systèmes techniques, ainsi que les taux de rénovation associés, sont indiquées à la Figure 7.

Enfin, la comparaison des performances attendues et mesurées des systèmes techniques dans le volet B2 a nécessité le recours à des informations supplémentaires qu'on a pu obtenir.

A.4 Performances réelles des opérations de rénovation

A.4.1 Consommation thermique (chauffage et ECS)

La Figure 13 présente l'évolution de la consommation finale de chaleur pour le chauffage et la préparation de l'eau chaude sanitaire Ehww entre avant et après rénovation pour les 22 opérations réalisées (lot 1 à 3 ; cf. Tableau 3). Ces valeurs moyennes sur 3 ans sont exprimées en MJ/m² par an et normalisées à 2659 DJ18/12 (valeur de référence pour la correction climatique genevoise, jusqu'en 2010 [OCEN, 2006]).

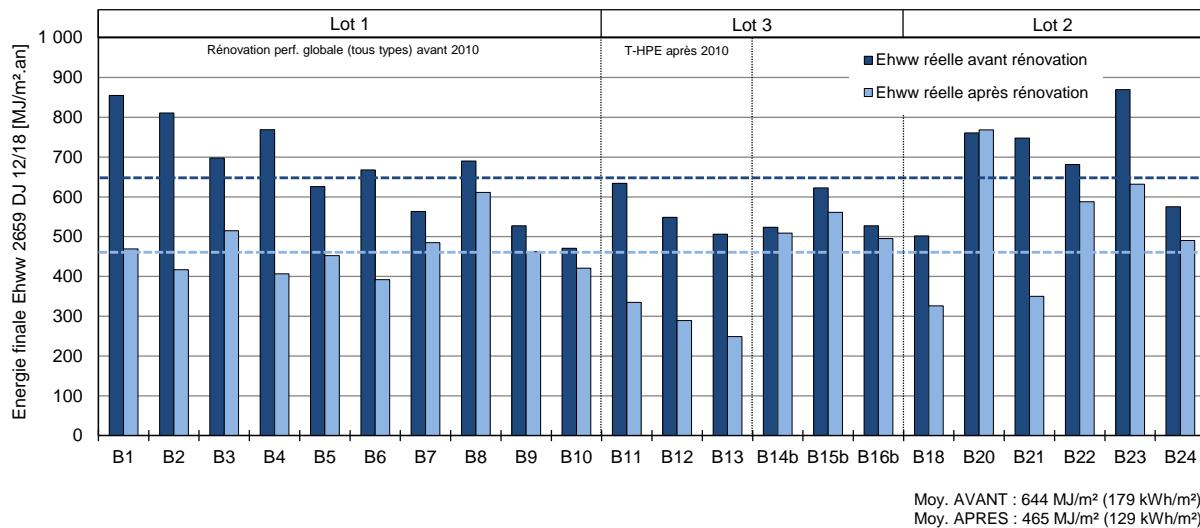


Figure 13. Evolution de la consommation thermique (chauffage + ECS) des bâtiments avant et après rénovation (valeurs moyennes sur 3 ans, 22 opérations réalisées)

La consommation de notre échantillon est passée en moyenne de 644 MJ/m² à 465 MJ/m², soit une baisse de 179 MJ/m². Toutes les opérations ont engendré des baisses de consommation, sauf un cas de rénovation-surélévation (B20). Pour mieux en comprendre les raisons, ce cas mériterait d'être examiné de plus près.

A.4.2 Consommation électrique (ménages et communs)

La consommation électrique totale des bâtiments analysés a baissé en moyenne de 6.3% entre avant et après rénovation, passant de 36.5 kWh/m² à 34.3 kWh/m² (cf. Figure 14).

Cette baisse, qui n'est dans la plupart des cas pas directement liée aux travaux de rénovation de l'enveloppe des bâtiments, s'inscrit dans la tendance générale observée au niveau cantonal. Elle est due notamment à plusieurs facteurs, comme la révision de l'ordonnance sur l'énergie qui prévoit dès janvier 2010 un renforcement des prescriptions d'efficacité pour les équipements électro-ménagers et bien entendu les actions du programme d'économie d'électricité éco21 des Services industriels de Genève. A ce propos, l'étude (Bertholet et al., 2016) dénombre les économies détaillées par année et par action de ce programme sur la période 2008-2015

On note aussi que les consommations totales d'électricité avant et après travaux de notre échantillon dépassent la valeur standard préconisée par la norme SIA 380/1 (27.7 kWh/m² ou 100 MJ/m²). La consommation électrique des ménages s'élève en moyenne à 22.6 kWh/m² après rénovation (médiane = 22.2 kWh/m²), alors que la consommation des communs d'immeuble est de 11.1 kWh/m² (médiane = 11.3 kWh/m²).

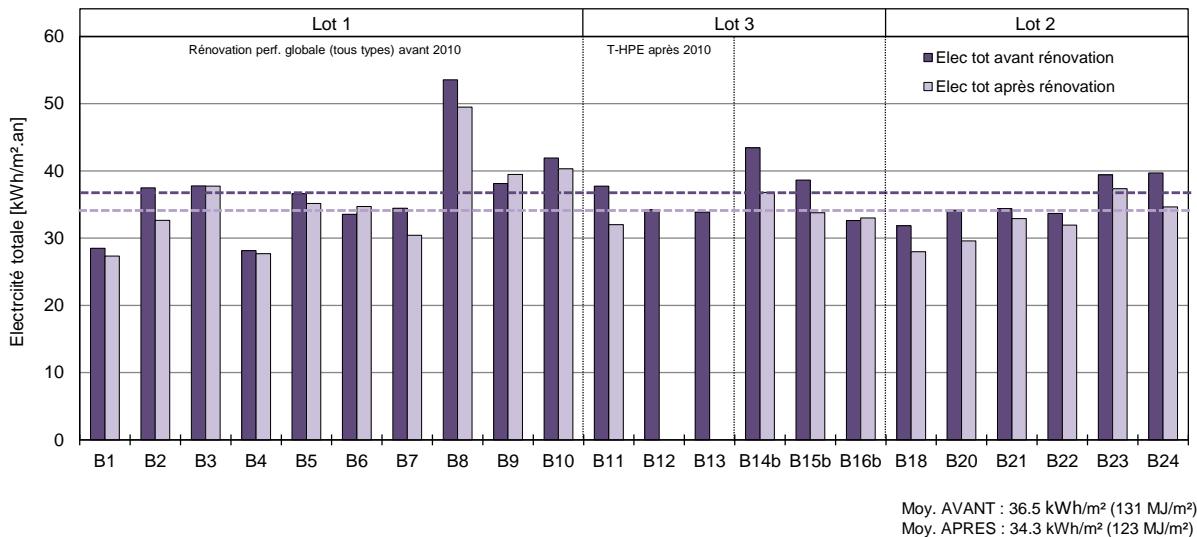


Figure 14. Evolution de la consommation électrique totale des bâtiments avant et après rénovation (valeurs moyennes sur 3 ans, 22 opérations réalisées)

Toutefois, il convient d'interpréter les résultats de la Figure 14 avec prudence dans le sens où l'évolution des consommations peut être le résultat de différentes actions menées sur le bâtiment. Par exemple, l'augmentation de la consommation électrique totale du bâtiment B6 rénové Minergie est le résultat à la fois d'une augmentation de la consommation des logements de 2.8 kWh/m² (+11%) et de la baisse de celles des parties communes de 1.4 kWh/m² (-17%) par rapport à la situation avant rénovation (Khoury 2014, pp.168-170). Pour les parties communes, la baisse observée résulte à la fois d'une baisse engendrée par l'assainissement de l'éclairage des communs (-3.3 kWh/m²) et d'une hausse due à l'électricité supplémentaire consommée par la ventilation double-flux et la pompe à chaleur (+1.9 kWh/m²).

A.4.3 Emissions de CO₂ associées à la production de chaleur

Les émissions de CO₂ liées à la consommation thermique finale ont baissé en moyenne de 41% entre avant et après rénovation, passant de 46 à 27 kgCO₂éq./m² (cf. Figure 15).

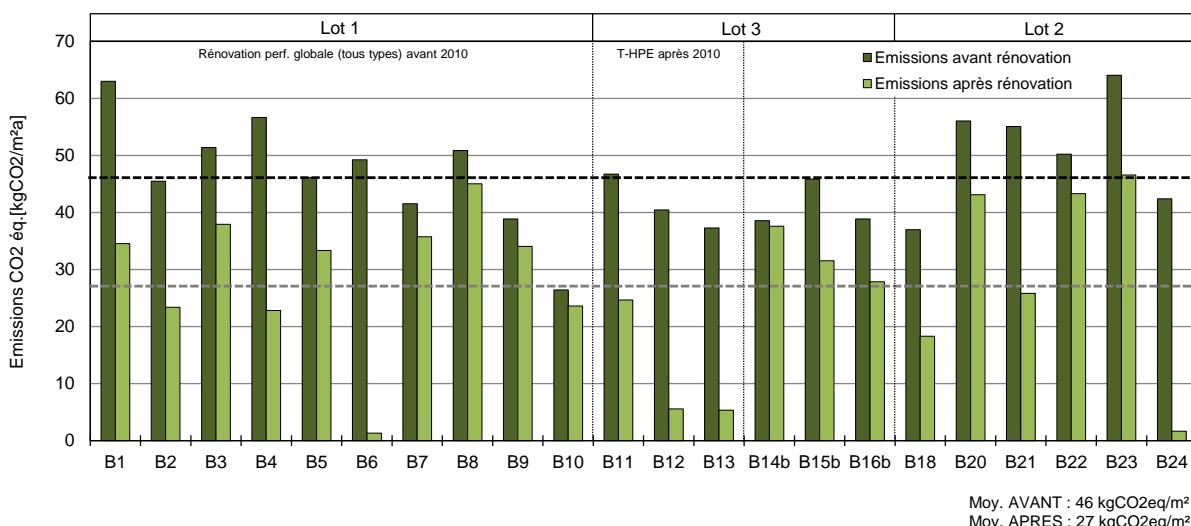


Figure 15. Evolution des émissions de CO₂ liées à la consommation thermique finale des bâtiments avant et après rénovation (valeurs moyennes sur 3 ans, 22 opérations réalisées)

Les émissions sont calculées pour chaque opération en multipliant la (ou les) quantité(s) d'agent(s) énergétique(s) utilisé(s) par le facteur d'émission de CO₂ de l'agent correspondant. Elles sont exprimées en émissions équivalentes de CO₂.

Les facteurs d'émissions retenus pour les agents fossiles sont issus de la fiche (OFEV, 2016). Pour l'électricité des pompes à chaleur, nous avons considéré la gamme vitale bleu (100% hydraulique) des Services Industriels de Genève qui contient 12.4 grammes d'équivalents CO₂ par kWh (SIG, 2017).

A.4.4 Economies réalisées (énergie et CO₂)

Les économies d'énergie et d'émissions de CO₂ engendrées par la rénovation thermique des bâtiments des lots 1 à 3 sont présentées dans les Figures suivantes 15 et 16. Elles représentent des valeurs moyennes sur 3 ans (valeurs absolues sur l'axe principal, relatives sur l'axe secondaire).

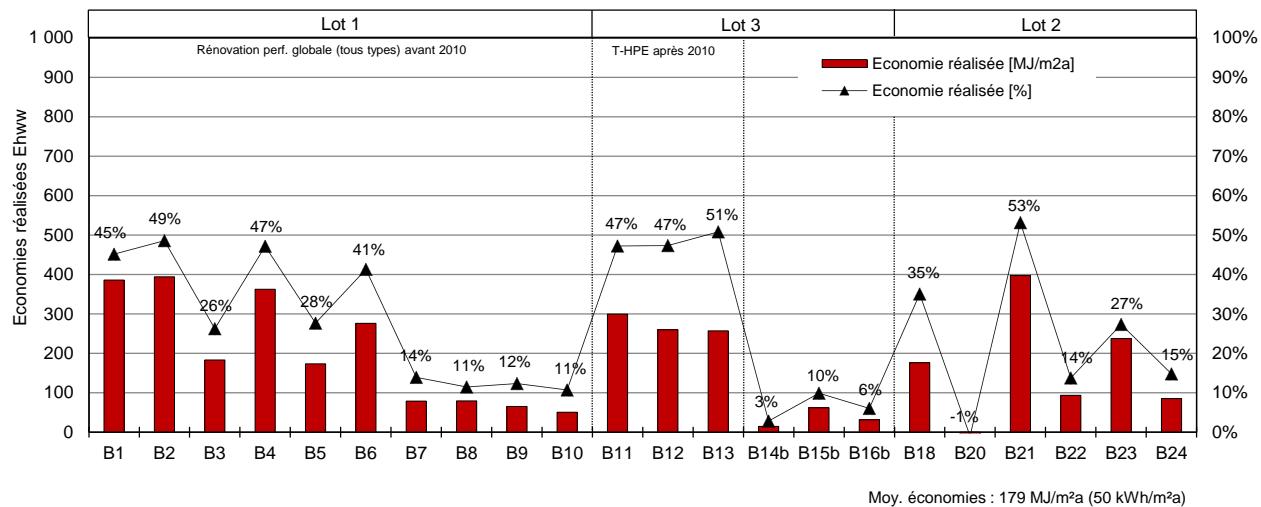


Figure 16. Economies d'énergie réalisées ΔEhww suite aux travaux de rénovation (22 opérations)

A l'exception d'un cas où nous signalons une surconsommation après rénovation, les économies d'énergie finale varient entre 397 et 15 MJ/m², avec une moyenne de 179 MJ/m². Les économies relatives sont en moyenne de 29% et varient entre 53% et 3% (tous types de travaux confondus).

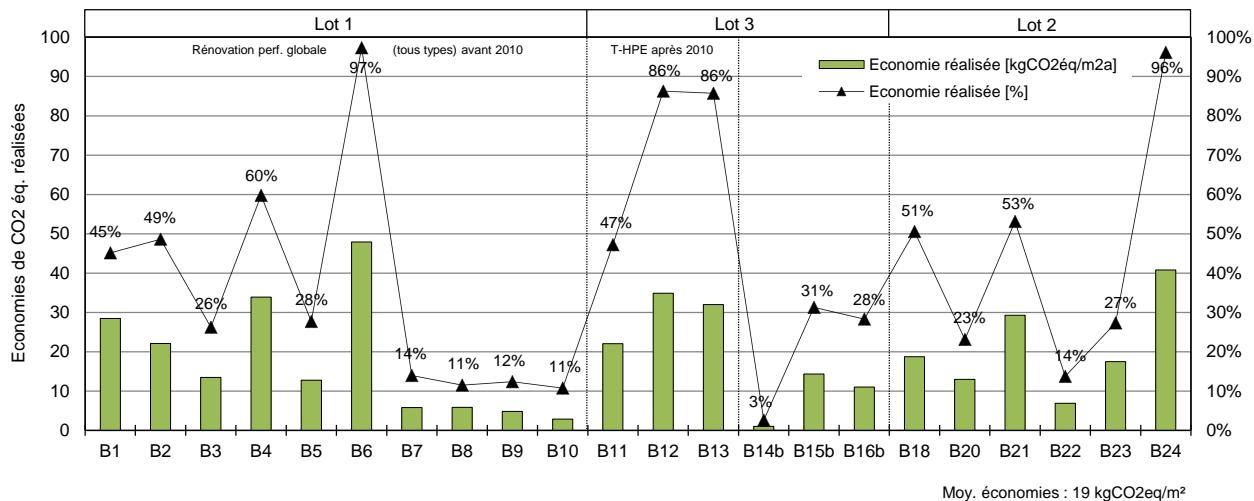


Figure 17. Emissions de CO₂ évitées par les 22 opérations réalisées

Les émissions de CO₂ évitées s'élèvent en moyenne à 19 kg CO₂/m² par an, avec une baisse relative de 41%. La baisse la plus importante (48 kg CO₂/m²; -97%) est constatée dans le cas B6 rénové selon le label Minergie avec substitution du mazout par de la chaleur fatale à très faible intensité carbone provenant de l'usine d'incinération des ordures ménagères des Cheneviers (situation avant 2012). Le bâtiment B24 (substitution identique, mais sans enveloppe rénovée) arrive en deuxième position. Il est discuté au point suivant.

A.4.5 Mise en perspective avec les objectifs de la STE2050

Les résultats présentés ci-avant sont comparés ici à la performance moyenne du parc résidentiel collectif genevois en 2010 et aux objectifs de réduction à l'horizon 2020, 2035 et 2050 du secteur résidentiel suisse comme prévus par la stratégie énergétique 2050 (STE2050).

Les objectifs de la trajectoire de transition énergétique à suivre sont issus de l'étude (PROGNOS, 2012) en se basant sur le scénario « Nouvelle politique énergétique ». Ce dernier vise à réduire massivement la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre par une politique volontariste, qui se traduit par une diffusion accélérée des énergies renouvelables et des technologies d'efficacité énergétique. Les données sur la performance du parc résidentiel collectif genevois proviennent de la thèse de (Khoury, 2014).

La Figure 18 à la page suivante montre l'évolution de la performance énergétique et environnementale des bâtiments entre avant et après rénovation (à gauche : moyenne de l'échantillon, à droite : résultats par opération). Les trois indicateurs de performance utilisés sont :

- Energie finale Ehww (chauffage et ECS), exprimée en MJ/m² par an sur l'axe vertical principal
- Intensité en carbone des agents énergétiques, exprimée en gCO₂ eq/kWh sur l'axe horizontal
- Emissions liées à l'exploitation, exprimées en kgCO₂ eq/m²_{SRE} sur l'axe vertical secondaire

On constate que la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel suisse est proche de celle du secteur genevois pour l'année 2010, mais avec une intensité en carbone globalement plus importante. Les résultats de notre échantillon sont comme suit :

- L'énergie finale chauffage et ECS passe de 179 à 129 kWh/m².an
- L'intensité carbone passe de 260 à 200 gCO₂ éq/kWh
- Les émissions liées à l'exploitation passent de 46 à 27 kgCO₂/m².an

La Figure 19 met en exergue différentes stratégies et trajectoires retenues dans les opérations de rénovation. Le premier exemple illustre le cas de 2 bâtiments (B1 et B2) dont l'enveloppe a été rénovée complètement, et dont le deuxième a été équipé d'une installation solaire thermique, comme prévoit actuellement la loi sur l'énergie dans différents cantons.

Le deuxième exemple montre les trajectoires des rénovations Minergie (B6 et B11) et Minergie-P (B12 et B13). On remarque que seules les deux rénovations à très haute performance énergétique (Minergie-P) se rapprochent des objectifs de réduction fixés par la STE2050, qui nécessitent à la fois de baisser la demande thermique des bâtiments en améliorant la performance de l'enveloppe et de substituer les énergies fossiles par du renouvelable ou par de la récupération. Il convient néanmoins de rappeler que les objectifs fixés à l'horizon 2050 sont des valeurs moyennes pour l'ensemble du parc résidentiel suisse, et représentent des visions à moyen terme.

Enfin, le troisième exemple illustre le cas d'un bâtiment (B24) qui n'a pas subi de travaux d'amélioration énergétique de l'enveloppe, mais dont l'installation de ventilation simple flux a été remplacée et l'agent énergétique modifié. Ainsi, la chaleur fournie au bâtiment n'est désormais plus produite par la chaudière à mazout, mais provient du réseau de chauffage à distance alimenté à presque 100% par de la chaleur fatale générée par l'usine d'incinération des ordures ménagères des Cheneviers.

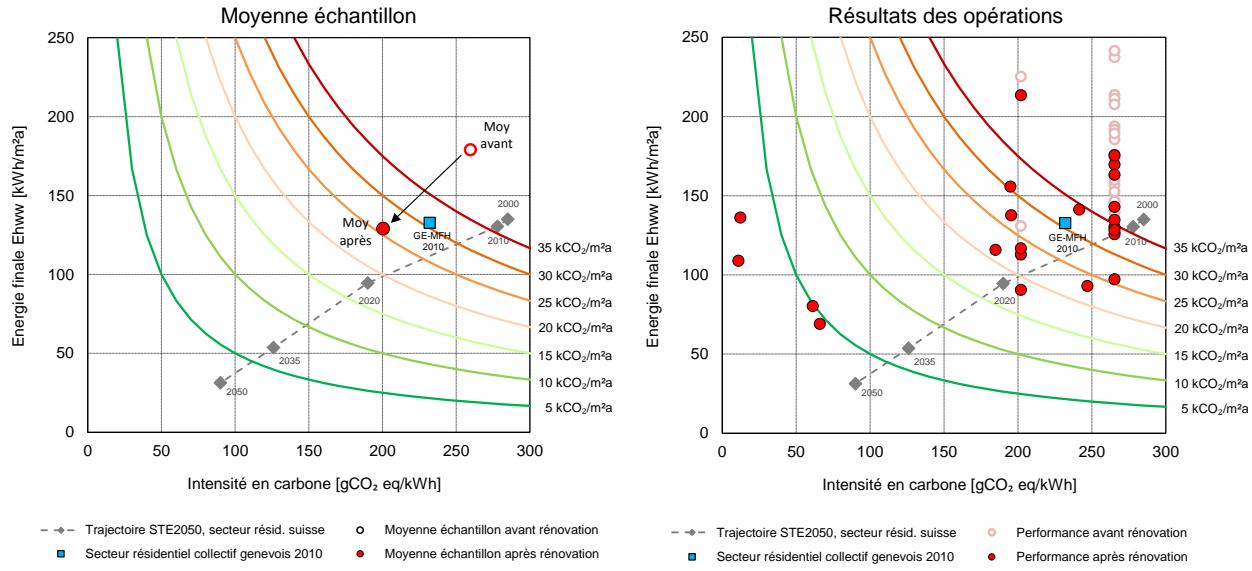


Figure 18. Evolution des performances entre avant et après rénovation

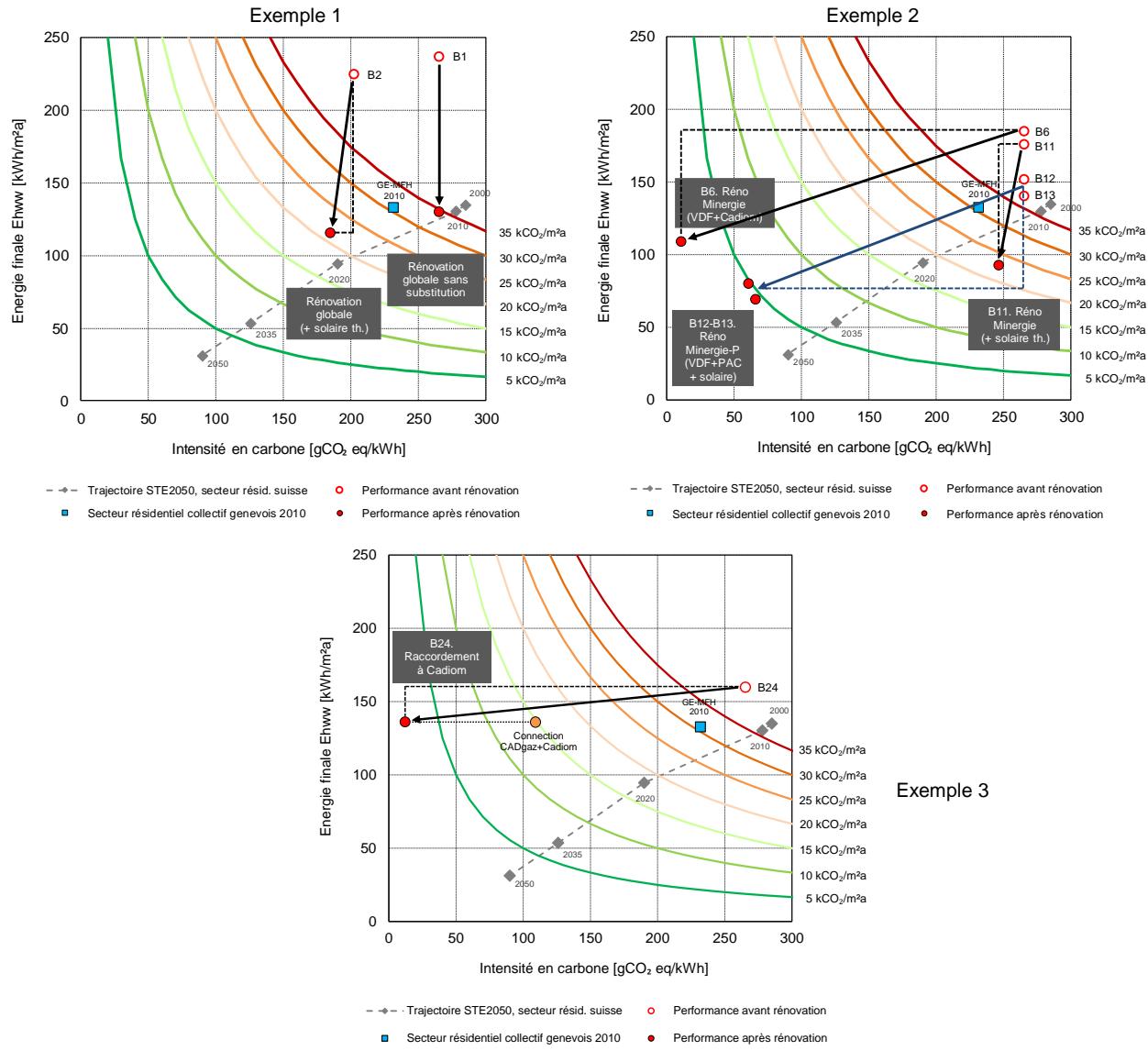


Figure 19. Différentes stratégies et trajectoires de rénovation (sélection de cas)

Ces performances peuvent aussi évoluer dans le temps. A titre d'exemple, on peut observer sur la figure précédente (exemple 3) la nouvelle performance du bâtiment en 2012 après raccordement des deux grands réseaux de chauffage à distance du canton (CADSIG : gaz naturel et CADION : chaleur fatale). Cette liaison a été étudiée de manière approfondie dans la thèse de Quiquerez (2017).

Les baisses réelles en termes d'énergie finale et d'émissions de carbone des opérations de rénovation sont présentées à la Figure 20 en fonction de la nature des travaux réalisés : i) rénovation globale (complète ou quasi-complète); ii) rénovation de deux éléments de l'enveloppe (Façade), d'un élément (Ponctuel) ou encore d'Entretien (sans travaux d'amélioration énergétique).

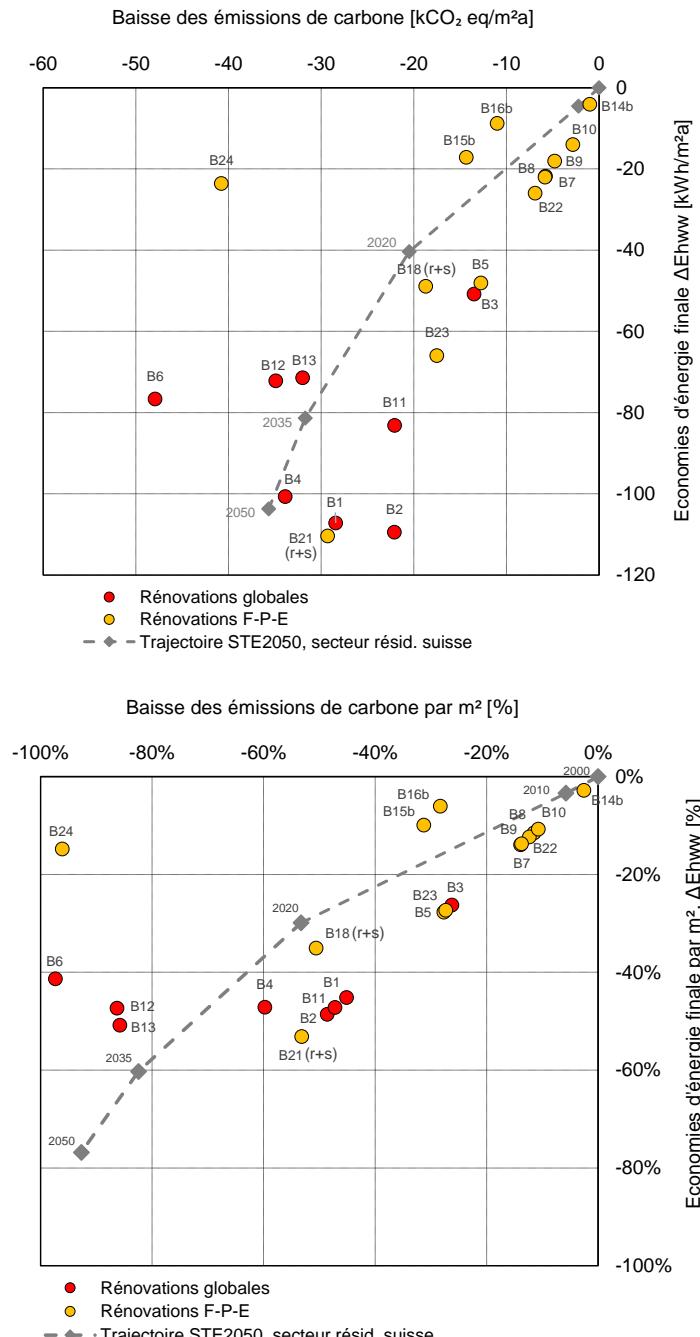


Figure 20. Economies d'énergie finale et émissions de CO₂ évitées par les opérations de rénovation en fonction de la nature des travaux réalisés : i) rénovation globale, ii) rénovation Façade (F), Ponctuelles (P) et Entretien (E) (les écarts absolus sur la figure du haut (moyennes sur 3 ans), les écarts relatifs en bas)

Il ressort donc de ces constats que l'atteinte des objectifs de réduction fixés par la Stratégie énergétique 2050 nécessite à la fois de MOINS et MIEUX consommer.

Il s'agit donc d'améliorer l'efficacité de l'enveloppe et des installations techniques et d'utiliser autant que possible les énergies renouvelables et les rejets de chaleur disponibles. On observe aussi que seules les rénovations à très haute performance énergétique (Minergie-P) se rapprochent aujourd'hui des objectifs fixés.

A.5 Ecarts de performance dans la rénovation (normé vs. réalité)

A.5.1 Définitions et méthodologie

Définition de l'écart de performance

La notion de l'écart de performance ou en anglais « *performance gap* » est très souvent utilisée dans la littérature, mais avec des significations variées. Elle est généralement définie comme la différence entre la performance énergétique mesurée et prévue des bâtiments (Menezes et al., 2012; Zero Carbon Hub, 2013; De Wilde et Jones, 2014; Struck et al., 2014; Wei, Jones et De Wilde, 2014; Reimann et Bühlmann, 2016; van Dronkelaar et al., 2016).

La définition de l'écart de performance diffère dans la forme d'énergie (utile, finale, primaire, etc.), dans l'usage de l'énergie (chauffage, eau chaude, électricité, etc.), dans la notion de performance retenue (performances calculées selon des normes, performances contractuelles calculées selon des protocoles, performances mesurées en labo, performances mesurées in-situ en conditions réelles d'utilisation en tenant compte du comportement des usagers, etc.). Le démarrage récemment de 9 projets de recherche sur ce sujet dans le cadre des programmes de recherche Energie dans les bâtiments 2017-2020 de l'Office fédéral de l'énergie montre la détermination de mieux cerner les enjeux liés à cette problématique.

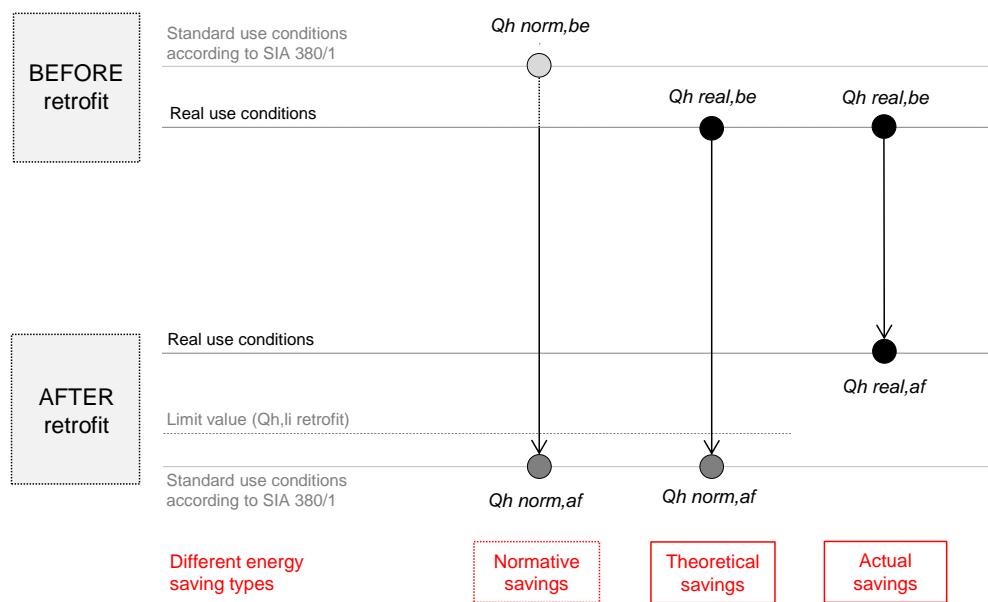


Figure 21. Différents types d'écart de performance en renovation (performance gap)

Dans cette étude nous proposons de différentier deux types d'écart de performance liés aux besoins utiles de chauffage des bâtiments : « Energy demand gap » et « Energy saving gap ». A cet égard nous utilisons les définitions suivantes, représentées sur la Figure 21. Les résultats présentés dans cette section ont fait l'objet d'une publication (Khoury et al., 2016).

Au niveau des demandes de chauffage (Q_h) :

- $Q_{h\text{norm,be}}$: Demande normée, avant rénovation (calculée selon SIA 380/1)
- $Q_{h\text{norm,af}}$ (ou $Q_{h\text{norm}}$) : Demande normée, après rénovation (calculée selon SIA 380/1)
- $Q_{h\text{real,be}}$: Demande réelle, avant rénovation
- $Q_{h\text{real,af}}$: Demande réelle, après rénovation

Au niveau des économies de chauffage (ΔQ_h) :

- $\Delta Q_{h\text{norm}} = Q_{h\text{norm,be}} - Q_{h\text{norm,af}}$: Economies normées
- $\Delta Q_{h\text{theor}} = Q_{h\text{real,be}} - Q_{h\text{norm,af}}$: Economies théoriques
- $\Delta Q_{h\text{real}} = Q_{h\text{real,be}} - Q_{h\text{real,af}}$: Economies réelles

Note : en l'absence de données sur les besoins normés avant travaux ($Q_{h\text{norm,be}}$) et vu l'incertitude liée à la qualité de ces données lorsqu'elles existent, cette grandeur ne sera pas considérée dans la suite de l'étude, pas plus que l'économie normée qui lui est liée ($\Delta Q_{h\text{norm}}$).

L'écart de performance sur la demande (energy demand gap) est défini comme la différence entre la demande réelle et la demande prévue. Cet écart peut être considéré en valeur absolue ou relative :

- $\Delta Q_{h\text{dem}} = Q_{h\text{real,af}} - Q_{h\text{norm,af}}$: écart sur la demande, valeur absolue
- $F_{\text{dem}} = \Delta Q_{h\text{dem}} / Q_{h\text{norm,af}}$: écart sur la demande, valeur relative

L'écart de performance sur les économies (energy saving gap) est défini comme la différence entre l'économie réelle et l'économie théorique. Cet écart peut également être considéré en valeur absolue ou relative :

- $\Delta Q_{h\text{sav}} = \Delta Q_{h\text{theor}} - \Delta Q_{h\text{real}}$: écart sur l'économie, valeur absolue
- $F_{\text{sav}} = \Delta Q_{h\text{sav}} / \Delta Q_{h\text{theor}}$: écart sur l'économie, valeur relative

En fait, comme cela apparaît clairement sur la Figure 21, l'écart de performance sur la demande et sur l'économie de chauffage comme définis plus haut sont identiques en valeur absolue ($\Delta Q_{h\text{dem}} = \Delta Q_{h\text{sav}}$), mais diffèrent en termes d'écart relatifs ($F_{\text{dem}} \neq F_{\text{sav}}$).

Méthodologie

Dans la présente étude, les besoins prévus après rénovation ($Q_{h\text{norm,af}}$) sont extraits des justificatifs thermiques présentés aux autorités, alors que les besoins normés avant travaux ($Q_{h\text{norm,be}}$) figurent rarement dans les dossiers d'autorisation. Ces derniers sont aussi jugés trop imprécis et surestiment souvent les besoins réels avant travaux (Hoffmann et Ménard, 2015; Majcen, 2016).

Les besoins réels avant et après rénovation ($Q_{h\text{real,be}}$; $Q_{h\text{real,af}}$) sont déduits à partir des relevés de consommation des bâtiments, moyenne sur 3 années consécutives avant et après travaux. Le calcul des besoins de chaleur tient compte (Khoury, 2014) :

- des fractions utiles de production de chaleur en fonction du type d'installation (chaudière à mazout, chaudière à gaz, chauffage à distance, etc.) et de sa date de mise en service ;
- des besoins d'eau chaude sanitaire (ECS) estimés en fonction du nombre d'habitants en considérant une demande moyenne de 1080 kWh/hab/an (résultat d'une analyse comparative de besoins mesurés d'ECS de 65 immeubles d'habitation à Genève) ;
- d'une correction climatique de 2659 DJ18/12 (valeur de référence pour la correction climatique genevoise, jusqu'en 2010 [OCEN, 2006]).

En premier temps, notre analyse a porté sur les 10 opérations de rénovation (B1 à B10) du lot 1 (cf. Tableau 3), soient sur toutes les rénovations réalisées avant 2010, sans création de surfaces habitables supplémentaires et avec justificatif thermique par performance globale. Ces opérations regroupent 50 immeubles d'habitation et près de 1'100 logements, totalisant une surface de référence énergétique d'environ 110'000 m².

En deuxième temps, les résultats de cette partie (lot 1) ont été comparés à ceux des opérations réalisées après 2010 (lot 3) et des rénovations-surélévations avec justificatif par performance globale (partie du lot 2).

A.5.2 Ecart sur les demandes de chauffage (energy demand gap)

La Figure 22 présente les besoins réels de chauffage des bâtiments avant et après rénovation ($Q_{h,\text{real},\text{be}}$ et $Q_{h,\text{real},\text{af}}$), ainsi que les besoins prévus en conditions normées d'utilisation ($Q_{h,\text{norm}}$).

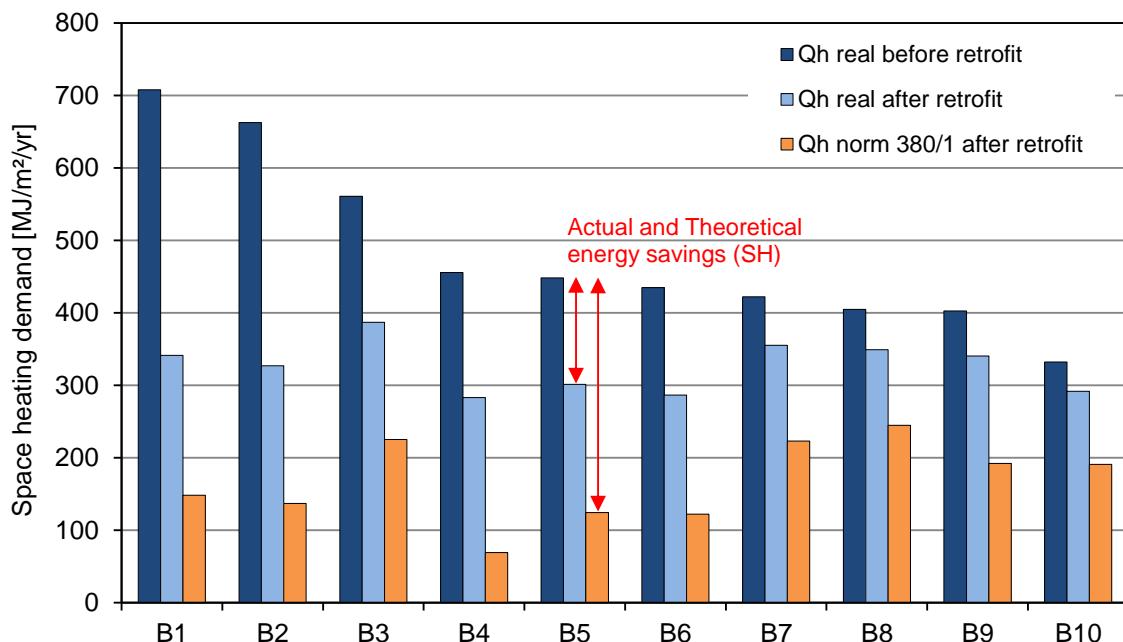


Figure 22. Demande réelle et prévue de chauffage Q_h , avant et après rénovation (lot 1)

On peut observer tout d'abord que les besoins réels de chauffage des bâtiments après rénovation dépassent systématiquement les valeurs prévues par calcul. Néanmoins, les besoins réels de chauffage des bâtiments B6 et B4 rénovés selon le standard Minergie sont inférieurs à ceux des rénovations réalisées conformément à la norme SIA 380/1. Ceci met en évidence l'effet attracteur du label Minergie, sans toutefois que les besoins prévus de chauffage soient atteints. Ce constat a également été confirmé pour les constructions neuves par (Zgraggen, 2010).

Avant rénovation, la demande réelle de chauffage (Q_h) de ces bâtiments variait entre 708 et 332 MJ/m²a. Après rénovation, elle se situe entre 387 et 283 MJ/m²a, avec une moyenne de 326 MJ/m²a. Les écarts relatifs entre les valeurs réelles ($Q_{h,\text{real},\text{af}}$) et prévues dans le justificatif thermique ($Q_{h,\text{norm}}$) varient entre 43% (B8) et 142% (B5), à l'exception d'une opération qui dépasse de plus de 310% l'objectif calculé (B4). La moyenne des dépassements est de 116% et baisse à 94% si l'on ne considère pas l'opération B4.

Ces résultats s'alignent avec ceux d'une étude récente (Reimann et Bühlmann, 2016) menée en Suisse et qui montre que près de 2/3 des immeubles d'habitation rénovés analysés et environ 3/4 des immeubles neufs conçus selon les normes en vigueur dépassent les valeurs limites à respecter. Il ressort également que parmi les différentes catégories de bâtiments analysés, les écarts dans les immeubles d'habitation sont les plus importants. Ces conclusions rejoignent également celles d'une étude réalisée sur le parc résidentiel hollandais, fondée sur environ 100'000 entrées d'immeuble, et qui montre que les bâtiments à haute performance énergétique ont tendance à consommer en réalité plus que prévu par calcul (Majcen, 2016).

A.5.3 Ecart sur les économies de chauffage (energy saving gap)

La Figure 23 présente les économies de chauffage théoriques et réalisées des opérations de rénovation du lot 1 ainsi que la part réalisée des économies théoriques (tracé, axe secondaire).

Les économies théoriques varient ici entre 140 et 560 MJ/m²a. Elles dépendent principalement des besoins réels de chauffage avant rénovation, étant donné que les valeurs de $Q_{h,norm}$ sont assez proches de la valeur limite de chauffage à respecter pour la rénovation $Q_{h,lim}$ (voir Figure 21).

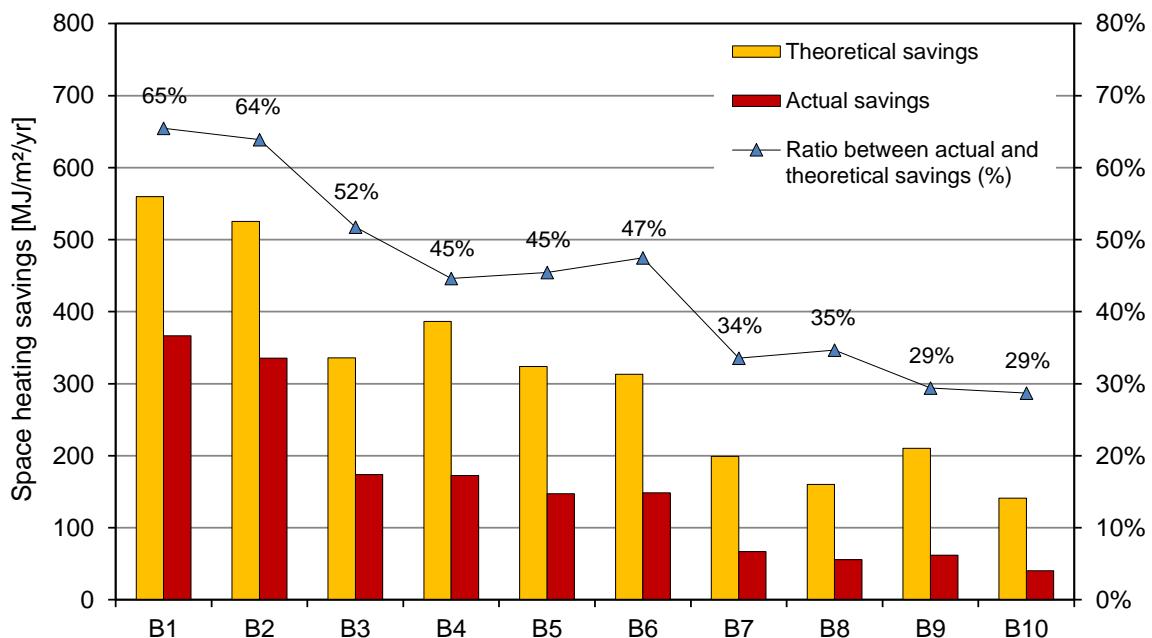


Figure 23. Economies de chauffage théoriques et réalisées des opérations de rénovation (lot 1)

La part réalisée des économies théoriques de chauffage varie entre 29% et 65%. La moyenne observée sur les bâtiments est de 44%.

Les opérations de rénovation B1 et B2 réalisées selon les normes SIA arrivent en tête de classement avec des économies respectives de chauffage réalisées de 366 et 336 MJ/m²a (65% et 64%). Les opérations B4 et B6 visant le standard Minergie arrivent respectivement en quatrième et sixième position avec une baisse des besoins de chauffage de 172 et 148 MJ/m²a (45% et 47%). A la fin du classement, on trouve les rénovations « partielles » B8, B9 et B10, avec des économies réalisées comprises entre 40 et 62 MJ/m²a et une part réalisée de près de 30%. Ces derniers ont porté sur un élément du bâti sans aucun réglage ni modification des installations de chauffage.

A.5.4 Relation entre économies de chauffage théoriques et réalisées

L'analyse des 10 opérations de rénovation du lot 1 montre qu'il existe une relation statistiquement assez robuste ($R^2=0.9897$) entre les économies de chauffage théoriques et réalisées (Figure 24). Elle peut s'exprimer par une expression du type :

$$\Delta Qh_{real} = 0.0009 \cdot (\Delta Qh_{theor})^2 + 0.17 \cdot \Delta Qh_{theor} \quad (\text{en MJ/m}^2/\text{an})$$

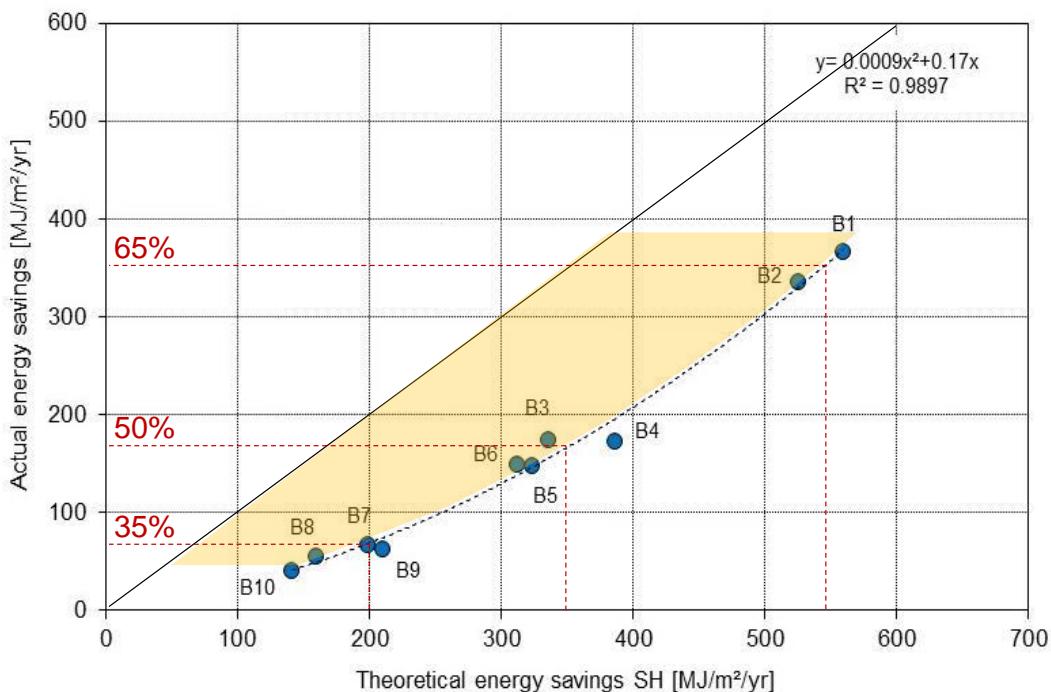


Figure 24. Relation entre les économies de chauffage théoriques et réalisées (lot 1)

Il ressort que plus les économies théoriques de chauffage sont importantes, plus la part effectivement réalisée de ces économies est élevée. Ainsi, en visant des économies théoriques de l'ordre de 550 MJ/m², les économies réalisées s'élèvent à près de 365 MJ/m², soit une part mobilisée d'environ 65%. Cette part baisse à 35% en visant des économies théoriques de l'ordre de 200 MJ/m²a (observées dans le cas de rénovation partielle souvent réalisée sans réglage des installations de chauffage).

Ce constat met en évidence l'importance d'accompagner les travaux de rénovation de l'enveloppe des bâtiments par l'adaptation des réglages des installations techniques. En fait, le remplacement des vitrages existants par des vitrages plus performants peut engendrer des surchauffes dans les appartements si la courbe de chauffe du bâtiment est mal réglée.

En deuxième temps, nous avons complété l'analyse avec les opérations réalisées après 2010 (lot 3) et avec les rénovations-surélévations avec justificatif par performance globale du lot 2. Les résultats montrent que cette tendance est globalement respectée (cf. Figure 25).

Les opérations de rénovation B11, B12 et B13 réalisées après 2010 selon les labels à haute et très haute performance énergétique performent mieux que la tendance observée sur les opérations d'avant 2010. Ceci est due en grande partie à l'attention portée par le maître d'ouvrage et les acteurs impliqués dans la

rénovation pour réduire l'écart de performance énergétique durant la phase de conception et de réalisation des travaux.

Les cas de rénovation-surélévation (B18 et B21) sont difficilement comparables avec la tendance observée (double effet : rénovation et surélévation). Quant aux 3 opérations de rénovation partielles et par étapes (B14b à B16b), elles présentent comme mentionnés auparavant des performances médiocres, inférieures à la tendance initiale, tout en s'inscrivant dans la continuité de la relation identifiée.

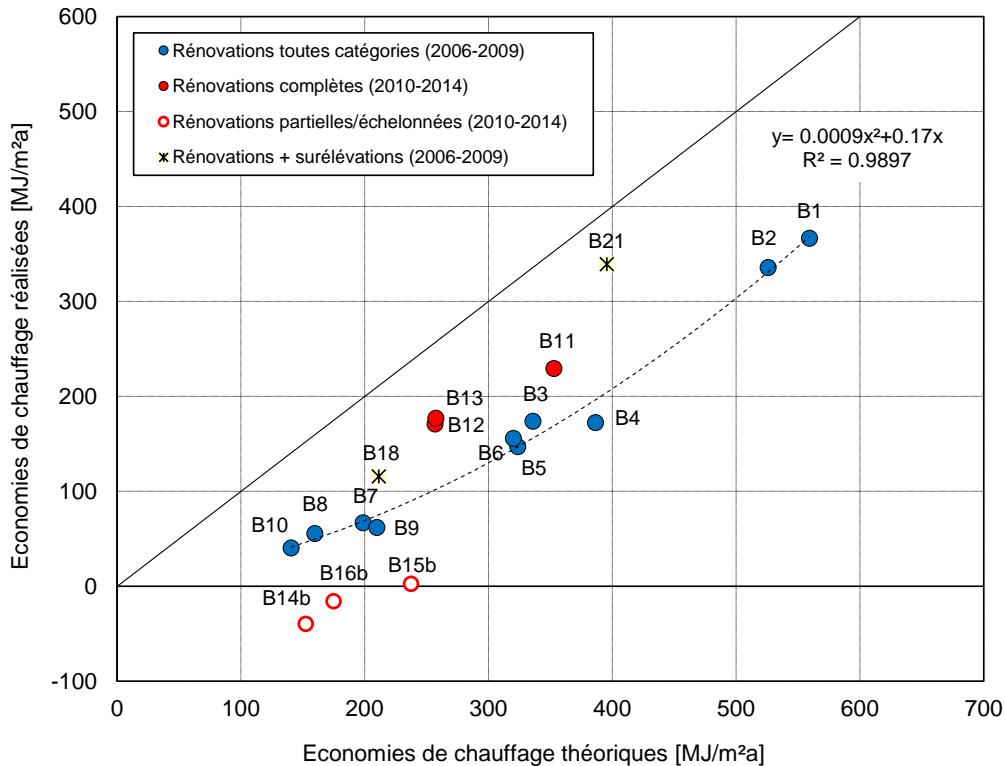


Figure 25. Relation entre les économies de chauffage théoriques et réalisées (lot 1 -3)

Enfin, cette relation porte sur l'ensemble du processus de rénovation, depuis l'étape de conception (choix des solutions d'amélioration énergétique et usage des logiciels de simulation), jusqu'à l'usage des bâtiments par les occupants et les gestionnaires de l'énergie. Elle peut aussi être vue comme une signature des pratiques de rénovation à une période donnée dans le canton. A condition d'être corroborée par des exemples supplémentaires, cette relation pourrait être utilisée comme un facteur correctif traduisant la différence entre norme et réalité.

A.5.5 Impacts potentiels à l'échelle cantonale et nationale

Cette partie consiste à évaluer l'impact potentiel de l'écart de performance observé sur la réalisation du potentiel théorique d'économie de chauffage du parc immobilier genevois et national.

Potentiel théorique d'économie de chauffage

D'après l'étude (Khoury, 2014), le potentiel théorique d'économie de chauffage du secteur résidentiel collectif genevois est estimé à 1273 GWh par an dont environ la moitié est imputée aux bâtiments construits durant la période 1946-1980 (53% ; 677 GWh/an). Ce potentiel est défini comme la différence entre les besoins réels de chauffage ($Q_{h,\text{real,be}}$) des immeubles d'habitation issues de la base de données de SITG Genève et la valeur limite des besoins de chauffage ($Q_{h,\text{lim}}$: 2009) à respecter lors de travaux de rénovation.

Les résultats sont représentés sur la Figure 26 suivante.

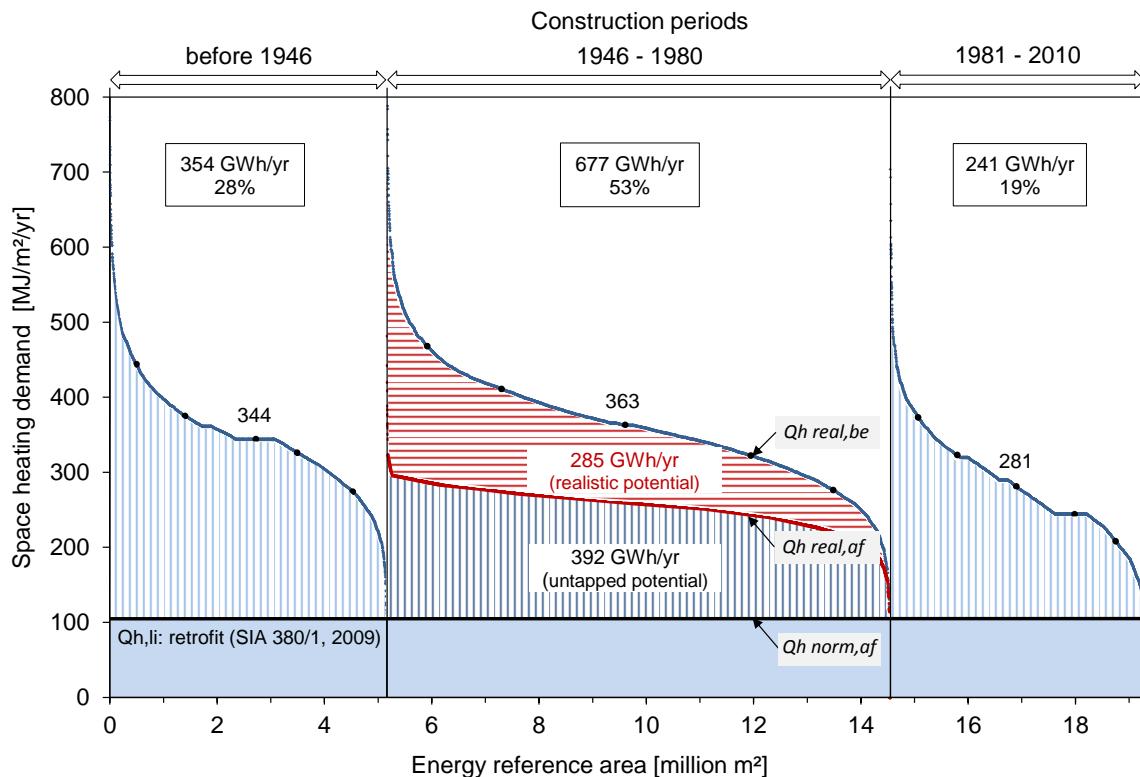


Figure 26. Demande de chauffage classée du secteur résidentiel collectif genevois en fonction des trois grandes périodes de construction et Potentiels théorique et réaliste d'économie d'énergie des bâtiments construits entre 1946 et 1980 selon les pratiques actuelles observées (Equation 1)

Pour exploiter pleinement le potentiel théorique des immeubles d'après-guerre (677 GWh/a), le besoin médian de chauffage de ces bâtiments (363 MJ/m^2) doit être réduit au moins d'un facteur 3.5. On peut également constater sur la Figure 26 que les objectifs de réduction varient fortement d'un bâtiment à l'autre et dépendent bien entendu de la situation initiale avant travaux. Par exemple, un bâtiment dont la demande de chauffage est de 468 MJ/m^2 (valeur correspondant au 90e centile) nécessite de réduire ses besoins d'un facteur 4.5, alors que ce facteur n'atteint que 2.7 pour un bâtiment dont la demande de chauffage est de 276 MJ/m^2 (valeur correspondant au 10e centile).

A ce stade, il convient de rappeler que la mobilisation de ce potentiel pose des difficultés qui ne sont pas nécessairement d'ordre technique, mais plutôt d'ordres économique et financier, d'usage, de conservation du patrimoine ou encore organisationnel et de gouvernance.

Potentiel réaliste d'économie de chauffage

Dans un second temps, nous avons estimé les économies réalisistes de chauffage en appliquant la relation entre économie théorique et économie réalisée.

Si on généralise les pratiques observées avant 2010 de notre échantillon d'analyse sur l'ensemble des bâtiments d'après-guerre destinés à être rénovés au cours des prochaines années à Genève (677 GWh/an), l'évaluation montre que à peine la moitié (42%) du potentiel théorique d'économie de chauffage de ses bâtiments pourrait être seulement atteint en réalité en tenant compte de l'écart de performance (voir Figure 26, zone hachurée en rouge); ce qui rend plus difficile l'atteinte des objectifs de la Stratégie énergétique 2050.

En appliquant cette relation à l'ensemble du parc immobilier suisse dont la demande de chaleur a été déterminée à l'aide d'un modèle (Schneider et al., 2017), le potentiel réaliste d'économie de chauffage ne représente également que près de la moitié (48%) du potentiel d'économie théorique (18.4 sur un total de 38.1 TWh/an).

Le Tableau 6 montre aussi que la part potentiellement réalisable, qui n'est autre que le rapport entre les économies réaliste et théorique, ne varie pas beaucoup selon les différentes catégories de bâtiments et reste stable autour de 50%.

		GE MFH postwar	CH MFH postwar	CH MFH stock	CH total stock
Potentiel théorique d'économie de chauffage (SIA 380/1 :2009)	[TWh/an]	0.7	7.8	16.2	38.1
Potentiel réaliste d'économie de chauffage (selon Eq.1)	[TWh/an]	0.3	3.6	7.4	18.4
Part potentiellement réalisable (réaliste / théorique)	[%]	42%	46%	46%	48%

Tableau 6. Potentiels théorique et réaliste d'économie de chauffage du parc immobilier genevois (GE) et suisse (CH), selon les pratiques observées entre 2006 et 2010 (MFH= résidentiel collectif ; total= toutes catégories ; post-war = 1946-1980 ; stock = parc immobilier)

Cela veut dire qu'en levant tous les obstacles à la rénovation et en mettant à disposition toutes les ressources supplémentaires nécessaires pour exploiter le potentiel théorique de ces bâtiments, près de la moitié de ce potentiel restera non mobilisé si on n'améliore pas les pratiques actuelles de rénovation et d'utilisation des bâtiments (suivi et optimisation énergétique insuffisante). Se pose également la question de la pertinence de ce potentiel, qui est évalué sur la base d'usage normé (voir les remarques finales du chapitre A.6.3).

L'enjeu principal consiste donc non seulement à réduire les besoins d'énergie en chauffage des bâtiments pour satisfaire à des exigences énergétiques de plus en plus strictes, mais aussi à réduire les écarts de performance en rénovation.

A.6 Facteurs explicatifs de l'écart de performance

A.6.1 Approche méthodologique et raisons possibles

Cette section vise à mieux comprendre les raisons des écarts de performance observés dans la section précédente. Il existe à priori de nombreux facteurs interdépendants pouvant expliquer ces écarts. Par ailleurs, ces facteurs sont liés à divers stades du processus de rénovation, allant de la phase de conception jusqu'à l'exploitation des bâtiments. Les résultats présentés dans cette section ont fait l'objet d'une publication (Khoury *et al.*, 2017).

L'analyse de la littérature fait état de peu de publications existantes sur les facteurs explicatifs de l'écart de performance dans la rénovation des immeubles locatifs. Les études sur les opérations neuves sont plus nombreuses et mettent en avant des écarts de l'ordre de 30 à 150% entre les performances prévues et réelles (Norford. *et al.*, 1994; Branco *et al.*, 2002; Thomsen, Schultz et Poel, 2005; Zgraggen, 2010). L'étude (van Dronkelaar *et al.*, 2016) a examiné les causes de l'écart de performance dans les bâtiments neufs non résidentiels et a identifié les facteurs explicatifs suivants : i) incertitude sur les données entrantes dans la modélisation, ii) comportement des occupants, et iii) mauvaise gestion énergétique de l'exploitation. La contribution de ces facteurs aux écarts observés est estimée à 20-60%, 10-80% et 15-80% respectivement.

Nous proposons dans cette étude de regrouper les facteurs de l'écart de performance en trois grandes catégories (cf. Tableau 7 à la page suivante) :

- I. Ecart dus à la différence entre les conditions normées et les conditions réelles d'utilisation et d'exploitation des bâtiments, résultant de l'utilisation des valeurs standards de la norme SIA 380/1 dans le calcul des économies théoriques;
- II. Ecart dus à la présence d'erreurs d'estimation, de calcul ou d'entrée commises par les opérateurs (telles que dans le calcul du facteur d'ombrage ou des surfaces saisies pour la simulation), ou encore liés aux limites des modèles utilisés ;
- III. Autres facteurs liés à la qualité de l'exécution des travaux, de l'exploitation et du suivi des installations et au comportement des usagers (occupants et gestionnaires de l'énergie).

Cette répartition repose sur l'expérience acquise dans le groupe Système énergétique de l'Université de Genève fondée sur le retour d'expérience in-situ de plusieurs études de cas, telles que celle menée par (Weber *et al.*, 1991; Mermoud, Khoury et Lachal, 2012; Khoury *et al.*, 2014).

Les deux premières catégories ont une influence sur la demande de chauffage normée des bâtiments ($Q_{h,norm}$, output du modèle bilan thermique SIA 380/1) et par conséquent sur les économies théoriques de chauffage lors de la phase de conception (cf. Figure 26).

La troisième catégorie concerne les facteurs en lien avec la phase de réalisation des travaux et d'exploitation du bâtiment qui ont un impact sur les valeurs réelles de demande de chauffage.

Retrofit process (selected phases)	Main reasons behind the energy performance gap
Design phase	<ul style="list-style-type: none"> I. Inaccuracies due to the use of standard values according to SIA 380/1 (input parameters related to the conditions of use) <ul style="list-style-type: none"> - Occupancy ($m^2/pers$) - Electricity consumption ($MJ/m^2/yr$) - Electricity factor reduction (-) - Utilization period (h/d) - Indoor temperature ($^{\circ}C$) - Air flow rates ($m^3/m^2/h$) II. Uncertainties in the input data used and model limitations <ul style="list-style-type: none"> - Design weather data (SIA 381/2, SIA 2028) - Regulation type (per room, etc.) - Shading factor ($F_s = F_{s1} + F_{s2} + F_{s3}$) - Calculation of surfaces (energy reference area, building envelope components, etc.) - Thermal bridges, U values, b factors, etc.
Execution and operation phase	<ul style="list-style-type: none"> III. Other factors related to quality of execution, operation, measurements and user behaviour <ul style="list-style-type: none"> - Poor quality of execution - Design changes during the execution phase - Poor commissioning - Malfunctioning / maladjustment of technical systems - Occupant behaviour - Measurement limitations - Uncertainties regarding the estimated DHW demand and the efficiency of heat production system, etc.

Tableau 7. Principaux facteurs explicatifs de l'écart de performance

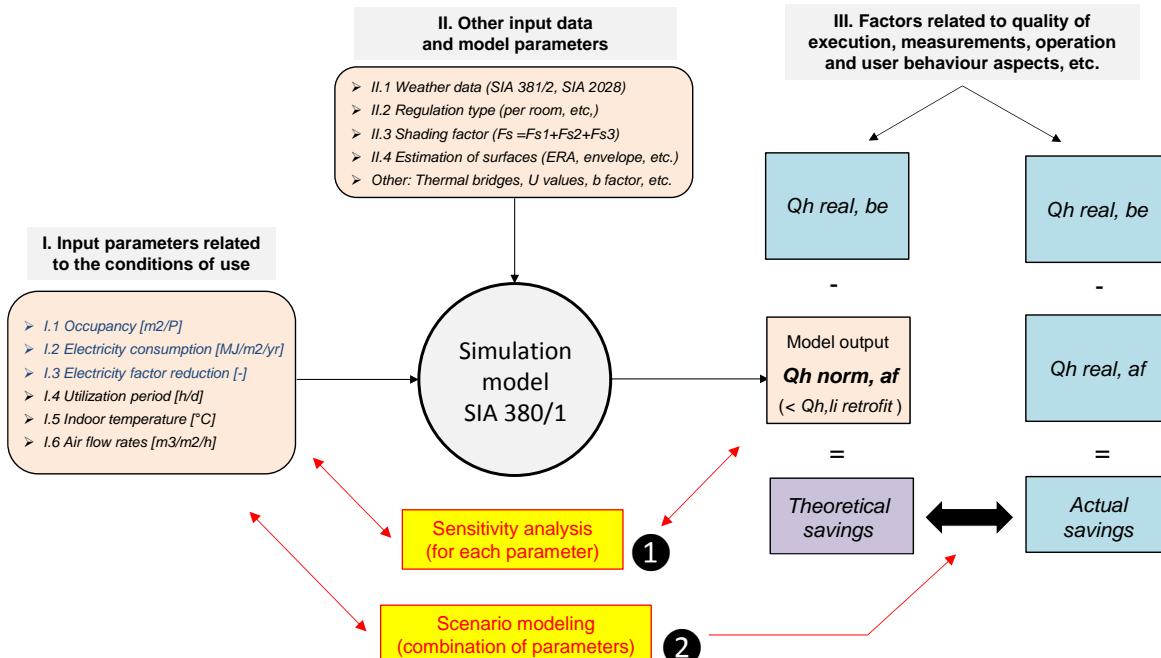


Figure 27. Approche méthodologique retenue pour l'analyse de l'écart de performance en rénovation : i) analyse de sensibilité de $Q_h \text{ norm}$ à la variation des paramètres de la catégorie I et II ; ii) analyse de décomposition par modélisation de l'écart observé entre économie théorique et économie réalisée.

Dans cette étude, nous analyserons les facteurs explicatifs de l'écart de performance en deux temps :

- En un premier temps, nous examinons la sensibilité des besoins de chauffage théoriques aux divers paramètres de calcul (catégories I et II). L'étude de sensibilité est effectuée sur 20 opérations de notre échantillon (B1-B20). La demande de chauffage des bâtiments rénovés ($Q_{h\text{norm}}$) est calculée à l'aide d'un logiciel de simulation, en utilisant les données figurant dans les dossiers de demande d'autorisation. Les résultats sont présentés au point A.6.2.
- En deuxième temps, nous combinons la variation des paramètres les plus sensibles, afin de décomposer l'écart de performance observé sur les bâtiments B1-B10. Les résultats sont présentés au point A.6.3.

A.6.2 Sensibilité des besoins de chauffage aux divers paramètres

L'analyse de sensibilité est effectuée séparément pour chacun des 10 paramètres de la catégorie I et II. Ces paramètres sont utilisés pour calculer la demande de chauffage normée ($Q_{h\text{norm}}$) des bâtiments rénovés B1-B20. Au total, 54 variantes ont été simulées pour chacune des 20 opérations.

Ecarts dus à l'utilisation des valeurs standards (catégorie I)

La sensibilité de $Q_{h\text{norm}}$ à la variation des 6 paramètres, dont la norme SIA 380/1 préconise des valeurs standards (catégorie I), sont présentés à la Figure 28 et sont résumés dans le Tableau 8 ci-dessous. Le tableau donne également, pour chacun des paramètres, la valeur moyenne réelle observée sur l'échantillon (à l'exception de la durée de présence, qui est difficile à obtenir).

Paramètres (catégorie I)	Unités	Valeurs standards	Moyenne échantillon	Action	Impact sur $Q_{h\text{norm}}$ (Moy±std)**
Température intérieure	°C	20	23	+1	10.7% ± 0.9%
Débit d'air neuf	m³/h.m²	0.7	1-1.5*	+0.2	17.5 ± 0.7 MJ/m²
Durée de présence	h	12	-	+2 -2	-2.4 ± 0.3 MJ/m² 2.4 ± 0.3 MJ/m²
Facteur de réduction des besoins d'électricité	-	0.7	0.8	+0.1 -0.1	-5.1 ± 0.7 MJ/m² 5.4 ± 0.7 MJ/m²
Consommation annuelle d'électricité	MJ/m²	100	123	+25 -25	-8.6 ± 1.2 MJ/m² 9.4 ± 1.2 MJ/m²
Surface chauffée par personne	m²/P	40	53	+10 -10	2.1 ± 0.3 MJ/m² -7.0 ± 0.9 MJ/m²

* Ventilation mécanique : 1 m³/h.m² (moyenne des valeurs mesurées durant la période de chauffage, sans considérer la récupération de chaleur lorsqu'elle existe); Renouvellement d'air par ouverture des fenêtres : 0.5 m³/h.m² (valeur estimée).

** Moy: moyenne des valeurs; std: écart-type.

Tableau 8. Sensibilité de $Q_{h\text{norm}}$ à la variation des paramètres standards (moyennes sur 20 opérations)

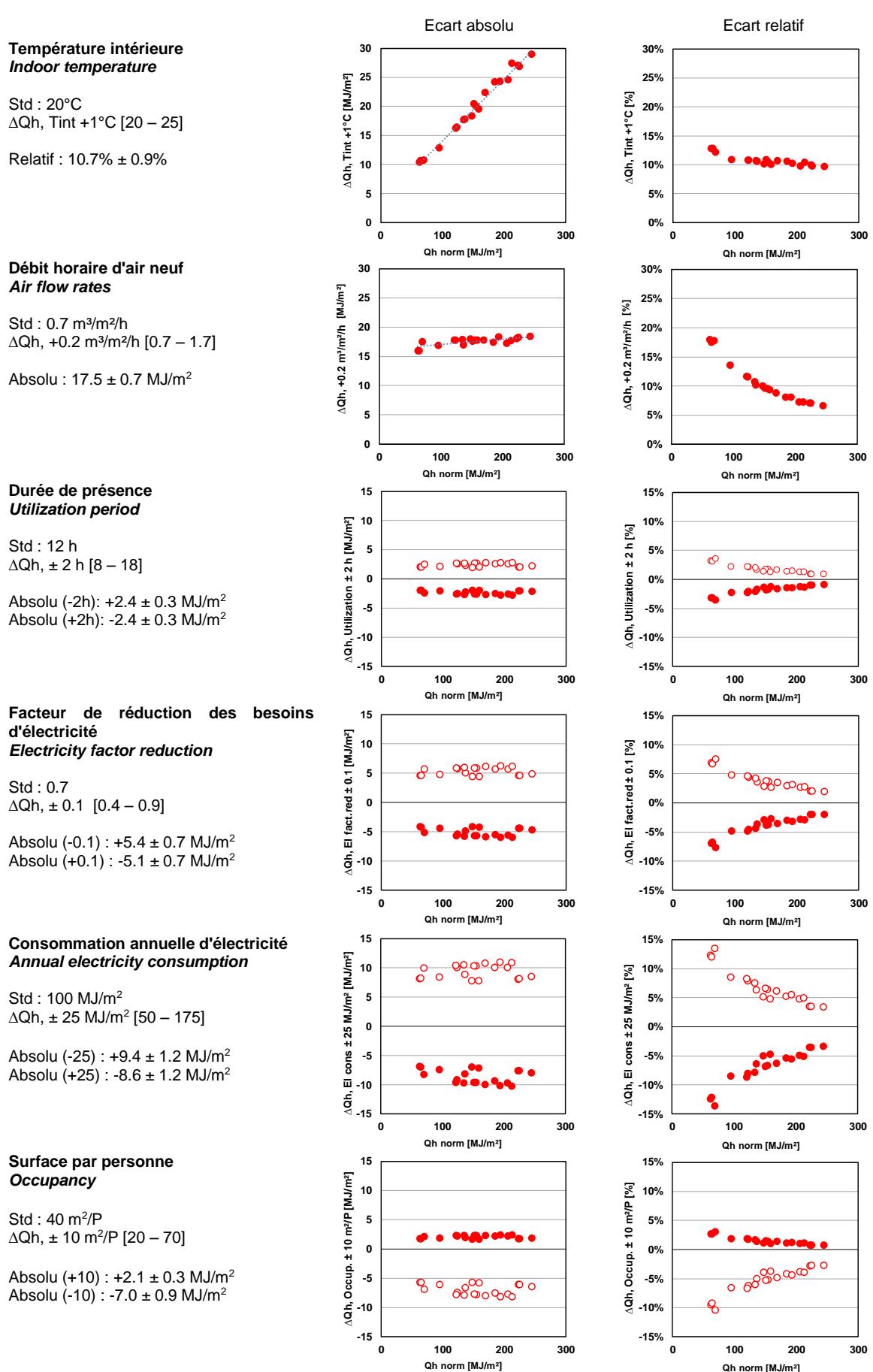


Figure 28. Sensibilité de $Q_{h\text{norm}}$ à la variation des paramètres standards (résultats sur 20 opérations)

A la lumière du Tableau 8, on observe que les valeurs réelles des paramètres analysés (catégorie I) dépassent systématiquement les valeurs standards, cependant avec des incidences diverses sur $Q_{h\text{norm}}$. Ainsi, une consommation électrique réelle (valeur moyenne sur 3 ans après travaux) plus élevée que celle préconisée par la norme SIA 380/1 (123 au lieu de 100 MJ/m^2 par an) induit des apports internes plus importants dans le bilan thermique, et par conséquent une baisse de $Q_{h\text{norm}}$. Pour la surface chauffée par personne, un dépassement moyen de $13 \text{ m}^2/\text{P}$ baisse les apports internes du bilan et engendre en contrepartie une hausse de $Q_{h\text{norm}}$.

Néanmoins, les deux paramètres les plus déterminants pour l'écart entre demande de chauffage normée et réelle sont la température intérieure et le débit d'air neuf :

- La température intérieure moyenne de 23°C (mesurée avec un pas de temps horaire durant toute la période de chauffage dans six bâtiments rénovés) dépasse largement la valeur standard de 20°C . En moyenne, chaque degré supplémentaire entraîne une augmentation de la demande de chauffage de 11% (soit une hausse de plus de 30% au total).
- De même, les débits d'air neuf directs mesurés à l'extraction de la ventilation mécanique s'élèvent en moyenne à $1 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ durant la période de chauffage (valeur brute, sans considérer la récupération de chaleur, dans les cas où elle existe), et à $1.5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ si l'on considère le débit d'air indirect résultant des ouvertures des fenêtres (valeur estimée par les experts), soit largement plus que la valeur standard de $0.7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ de la norme SIA 380/1. En moyenne, de telles hausses de débit entraînent une hausse de la demande de chauffage de 25 à 70 MJ/m^2 , respectivement (soit une hausse de 17 MJ/m^2 par $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$).

Notons par ailleurs que ces résultats issus d'une analyse de sensibilité par paramètre ne sont pas cumulatifs. Par ailleurs, certains de ces paramètres peuvent évoluer dans le temps. A titre d'exemple, nous avons analysé l'évolution entre 2010 et 2015 de la densité d'occupation (surface par habitant) et de la consommation annuelle d'électricité :

- Ainsi, sur les 20 bâtiments analysés, l'évolution de la densité d'occupation (m^2/P) se situe dans une fourchette de -10% à +10%. En moyenne, la surface par habitant a légèrement reculée de $53 \text{ m}^2/\text{P}$ en 2010 à $51 \text{ m}^2/\text{P}$ en 2015. Néanmoins, il ressort de l'analyse de sensibilité ci-dessus qu'une variation de la densité d'occupation de ±10% n'a qu'une influence minime sur le résultat de la simulation (entre -1.3 et 1.3 MJ/m^2).
- La consommation électrique a quant à elle baissé en moyenne de 6.3% entre avant et après rénovation, passant de 36.5 kWh/m^2 à 34.3 kWh/m^2 (cf. point A.4.2). Des variations plus importantes sont observées au niveau de chaque bâtiment. Or, une variation de la consommation annuelle d'électricité de ±10% résulte en une variation de $Q_{h\text{norm}}$ de ± 5 MJ/m^2 .

A ce stade, nous pouvons conclure que ces évolutions n'ont qu'une influence minime sur $Q_{h\text{norm}}$.

Ecarts dus à la qualité des données introduites par les opérateurs (catégorie II)

Nous analysons ci-après l'effet d'éventuelles erreurs d'estimation, choix ou données erronées introduites par les opérateurs dans le calcul de $Q_{h\text{norm}}$ (Tableau 9 et Figure 29), en particulier :

- la météo considérée (SIA 381/3 – SIA 2028)
- le type de régulation
- l'effet d'ombrage
- l'incertitude liée au calcul des surfaces (SRE)

Des erreurs dans l'introduction des ponts thermiques ou dans l'estimation des valeurs de coefficients thermiques (valeurs U), des valeurs g des verres ou encore des valeurs b de réduction des pertes n'ont pas été analysés dans cette étude.

Paramètres (catégorie II)	Action	Impact sur Qh norm (Moy±std)**
Données météo (station Genève-Cointrin)	SIA 2028 au lieu de SIA 381/3	-5.4% ± 1.5%
Type de régulation SIA (0K, 1K, 2K)*	+1	10.2% ± 2.4%
Facteur d'ombrage (25%, 35%, 45%)	+10%	4.3% ± 1.9%
Surface de référence énergétique	+10%	-7.7% ± 0.6%
	-10%	9.5% ± 0.7%

* Augmentation de la température intérieure pour une régulation non performante.

** Moy: moyenne des valeurs; std: écart-type.

Tableau 9. Sensibilité de Qh_{norm} aux possibles erreurs d'estimation ou d'entrée dans les simulations (résultats sur 20 opérations)

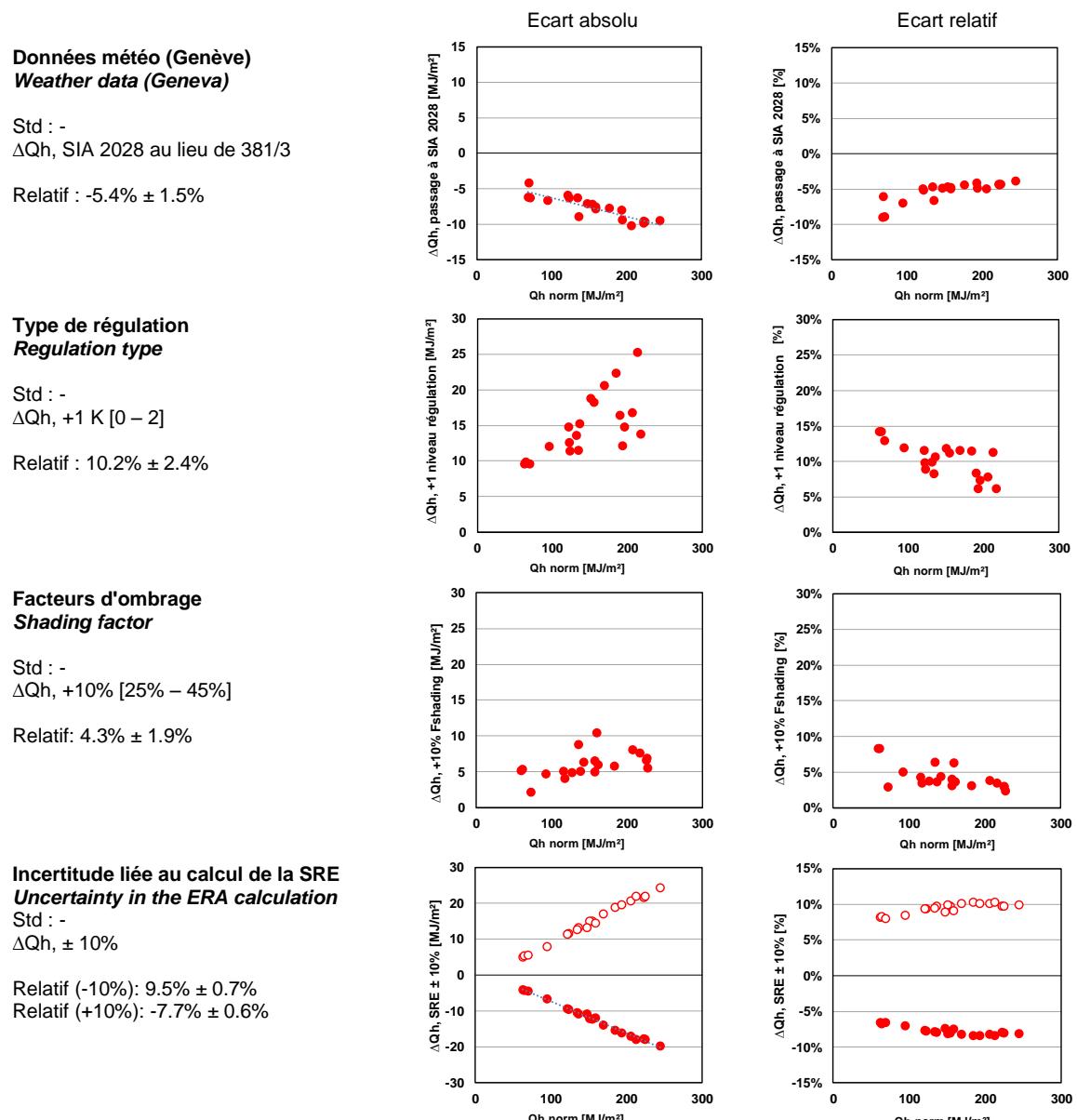


Figure 29. Sensibilité de Qh_{norm} aux possibles erreurs d'estimation ou d'entrée dans les simulations (résultats sur 20 opérations)

On peut conclure que :

- Une erreur d'estimation de 1K sur le type de régulation est essentiellement équivalente à une erreur d'estimation de la température intérieure de 1 K, aboutissant à une erreur de 10% sur la demande de chauffage.
- Il en va de même pour une erreur d'estimation de 10% de la SRE, ou de 25% sur le facteur d'ombrage.
- En ce qui concerne la météo, le calcul de $Q_{h,norm}$ dans les dossiers d'autorisations de construire a dans la plupart des cas été réalisé avec les données climatiques de l'ancienne norme SIA 381/3, étant donné qu'une grande partie des opérations de rénovation analysées ont été planifiées avant 2010. Après 2010, le cahier technique SIA 2028 propose une nouvelle météo qui est plus proche des températures mesurées durant les dernières décennies, et met à disposition des données horaires pour des années moyennes, extrêmes chaud et extrêmes froid.
Pour les bâtiments B1 à B20, le passage de l'ancienne à la nouvelle météo engendre une baisse moyenne de $Q_{h,norm}$ d'environ 5.5%, et augmente par conséquent l'écart de performance constaté entre les économies théoriques et réalisées (Tableau 9).
- Pour mieux cerner l'impact de la localisation géographique des bâtiments sur $Q_{h,norm}$, nous avons comparé la météo standard SIA 2028 (normale, chaud et froid) basée sur les mesures de température à Genève-Cointrin avec les données météo mesurées sur 3 stations en zone urbaine (Prairie), rurale (Anières) et semi-rurale (Battelle) du canton de Genève (Ineichen et Pampaloni, 2017).

Les résultats (Figure 30) montrent qu'en zone urbaine, il est recommandé d'utiliser la météo SIA 2028-chaud pour simuler les besoins de chaleur en hiver, alors que pour les bâtiments situés en zone rurale ou semi-rurale à Genève, la météo SIA 2028-normale donne des résultats très satisfaisants. Pour le calcul des besoins de froid durant la période estivale, nous avons remarqué que la météo SIA 2028-normale peut être utilisée indépendamment de la localisation géographique des bâtiments (urbaine, rurale ou semi-rurale).

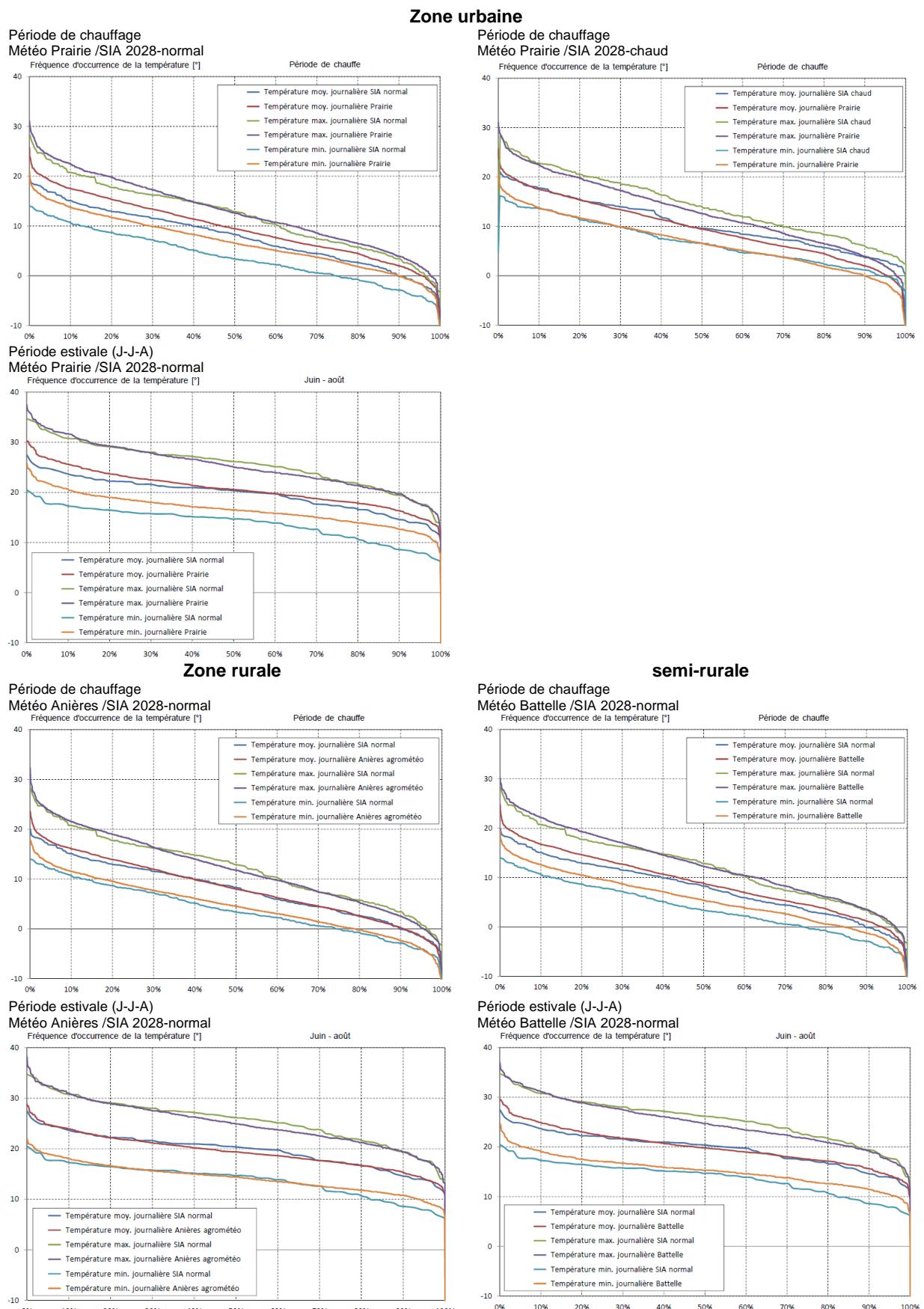


Figure 30. Comparaison de la météo standard SIA 2028 (normale, extrême chaud et froid) avec la météo réelle de 3 stations situées en zone urbaine, semi-rurale et rurale dans le canton de Genève (moyenne 2009-2015, données fournies par P. Ineichen).

Autres facteurs (catégorie III)

La troisième catégorie de paramètres concerne la phase de réalisation de travaux et d'exploitation du bâtiment, notamment : une réalisation non-conforme aux travaux autorisés, une exécution de moindre qualité, une mauvaise mise en service, le dysfonctionnement des systèmes techniques, les pratiques des gestionnaires de l'énergie et le comportement des occupants.

Dans cette étude, l'évaluation quantitative de ces facteurs n'est pas faite de façon systématique. En effet, l'influence du comportement des usagers (occupants et gestionnaires de l'énergie) sur la performance énergétique du bâtiment est implicitement compris dans la première catégorie de paramètres (Tableau 8, différence entre valeurs standard et réelle). Ces facteurs sont également intégrés dans les discussions menées dans la section suivante.

A ce propos, relevons que la responsabilité des écarts de performance est souvent mise sur le dos d'un « mauvais » usage des habitants. Ainsi, on a quelquefois l'impression que l'idéal serait des bâtiments sans occupants, car ceux-ci se comporteraient de « manière inadéquate ». Comme le sociologue Gaetan Briseppier le fait justement remarquer dans le cas des constructions neuves à haute qualité énergétique (Briseppier, 2015), « dans tous les cas les habitants se comportent rarement comme les concepteurs l'avaient prévu et adaptent leur pratique ». La réponse donnée à ce problème est le plus souvent une approche doublement normative : l'accompagnement des habitants vers un usage normalisé prend la forme d'une nouvelle injonction faite aux professionnels du bâtiment.

Se posent alors les questions suivantes :

- Dans quelle mesure s'agit-il de mauvaises pratiques plutôt que d'une mauvaise évaluation de ces pratiques ? Autrement dit : faut-il ramener les normes à l'usage réel ou l'usage réel aux normes ? ou sans doute un peu des deux ?
- Comment faire changer les comportements et jusqu'où peut-on les faire évoluer, particulièrement ceux qui influencent la température intérieure et l'aération ? Le cas échéant, qui doit les faire évoluer et comment ?
- Plus généralement, comment améliorer les pratiques tout au long du processus de rénovation (du projet à l'utilisation par les habitants, en passant par l'exécution des travaux, la mise en service et l'exploitation) ?

Notons enfin que des concepts comme l'Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO) et l'Assistance à la Maîtrise d'Usage (AMU) existent et sont proposés aujourd'hui comme des services d'accompagnement pour améliorer les pratiques des acteurs durant la phase de réalisation et d'exploitation en vue de réduire les écarts de performance constatés.

A.6.3 Décomposition de l'écart de performance

Cette section vise à décomposer l'écart de performance observé sur les bâtiments B1-B10 par une série de simulations combinant les paramètres les plus sensibles identifiés précédemment. En complément au scénario de référence (V0), quatre scénarios sont retenus et présentés ci-dessous:

- V0 : scénario de référence selon les conditions standard d'utilisation SIA 380/1
- V1 : scénario utilisant les valeurs réelles pour le taux d'occupation, la consommation électrique annuelle et le facteur de réduction électrique (mais les valeurs normées pour la température et le débit d'air neuf).
- V3 : scénario correspondant à des bâtiments optimisés selon des critères réalistes, soit une température intérieure de 21°C et un débit d'air neuf de 1.1 m³/m²/h (+ valeurs réelles pour le taux d'occupation, le facteur de réduction électrique et la consommation électrique).
- V4-V5 : scénario correspondant aux pratiques actuelles (sans optimisation), soit une température intérieure de 23 ou 24°C et un débit d'air neuf de 1.3 ou 1.5 m³/m²/h (+ valeurs réelles pour le taux d'occupation, le facteur de réduction électrique et la consommation électrique).

Cette analyse est faite pour 4 des 10 bâtiments (B1, B4, B5, B9), qui représentent bien la dispersion d'économies théoriques observées (Figure 31).

Il résulte de ces simulations que le passage du scénario de référence (usage normé) aux scénarios V4 ou V5 (usage réel) permet dans chaque cas d'expliquer l'écart de performance observé.

Ainsi, l'écart de performance peut être divisé en deux parties : (i) le potentiel d'optimisation, qui correspond à la différence entre les conditions réelles d'utilisation et les conditions optimales d'utilisation ; (ii) la différence entre les conditions normées et les conditions optimales d'utilisation.

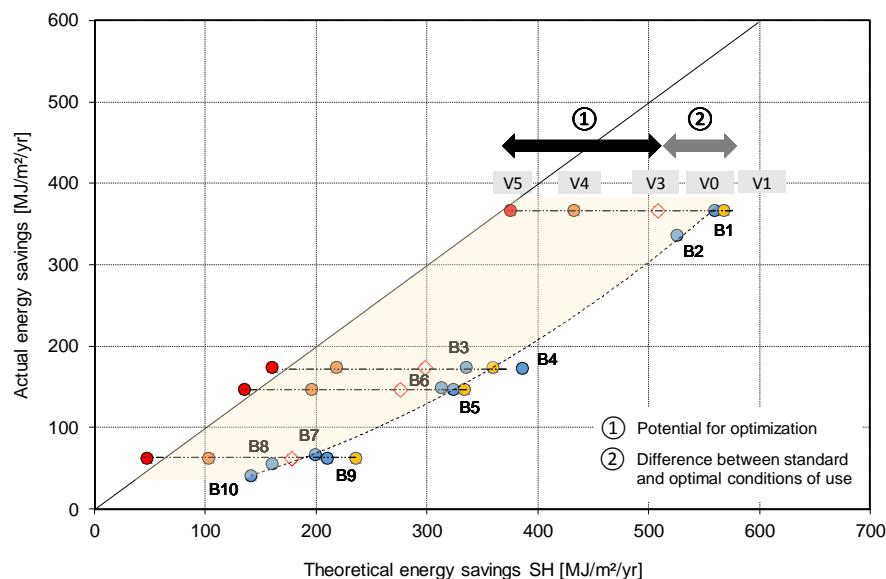


Figure 31. Décomposition de l'écart de performance dans la rénovation en (1) potentiel d'optimisation et (2) différence entre les conditions d'utilisation standard et optimales.

A.7 Bonnes pratiques visant à réduire l'écart de performance

A.7.1 Etudes de cas

Dans cette section nous explorons la possibilité de réduire effectivement l'écart de performance constaté précédemment sur deux études de cas de rénovation HPE (Minergie) et THPE (Minergie-P), réalisées après 2010 (opérations B11 et B12-13 de notre échantillon).

Opération B11

L'opération B11 concerne la rénovation au standard Minergie d'un immeuble (31 logements, 2'482 m² SRE) construit en 1956.

Suite à l'écart constaté entre la consommation normée et réelle du bâtiment rénové, un groupe de suivi a été constitué sur demande du propriétaire, regroupant la régie, les exploitants et des experts dans le domaine de l'énergétique du bâtiment, avec pour mandat d'optimiser le fonctionnement des installations et la consommation énergétique. Un suivi énergétique du système de production de chaleur et de la consommation de chauffage a permis d'identifier et mener à bien les actions d'optimisations énergétiques listées ci-dessous (Flourentzou, 2016) :

- Correction des dysfonctionnements du système solaire thermique.
- Baisse graduelle de la température intérieure des logements à l'aide d'un système de régulation prévisionnelle, avec pour objectif une température intérieure de 21°C.
- Réglage de la courbe de chauffe.
- Equilibrage hydraulique du réseau de chauffage.

Ces actions ont toutes été réalisées, à l'exception de l'équilibrage hydraulique du réseau de chauffage, en projet au moment de l'étude. Comme le montre la Figure 33, ces mesures ont permis de réduire graduellement l'indice de dépense de chaleur du bâtiment (IDC ou Ehww).

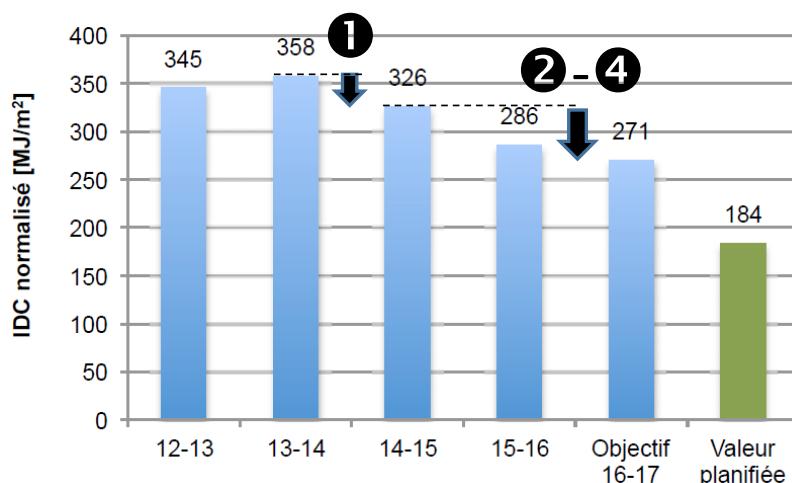


Figure 32. Evolution de l'IDC du bâtiment B11 suite à des mesures d'optimisation: (1) Réglage du système solaire thermique ; (2) Baisse de la température intérieure à l'aide d'un système de régulation prévisionnelle ; (3) Réglage de la courbe de chauffe ; (4) Equilibrage hydraulique du réseau de chauffage (Source : Flourentzou et al., 2016)

Opérations B12-B13

Les opérations B12 et B23 concernent la rénovation au standard Minergie-P de 2 barres d'immeubles (273 appartements, 19'000 m² SRE) construits en 1952. Avant rénovation, les bâtiments consommaient environ 150 kWh/m² de mazout pour le chauffage et la préparation de l'ECS. Entre 2013 et 2014, les bâtiments ont été rénovés au standard Minergie-P ; il s'agissait alors de la plus grande opération de ce type en Suisse.

Cette réalisation a fait l'objet d'un suivi énergétique détaillé (Hollmuller et al., 2017), réalisé dans le cadre d'une subvention du programme P&D de l'Office fédéral de l'énergie (Tornare et al. 2016). Mené en collaboration avec la régie, l'architecte, les concepteurs, les exploitants et des experts en énergétique du bâtiment, ce suivi a permis de mettre en place les réglages et optimisations suivantes :

- Réglage après rénovation de la courbe de chauffage.
- Déblocage d'une vanne de mélange du circuit de distribution de chauffage.
- Réglage des consignes de la récupération de chaleur sur air vicié.
- Optimisation finale de la courbe de chauffage.

Comme l'illustrent les signatures énergétiques (Figure 33), ces mesures d'optimisation ont permis de passablement réduire la demande de chauffage.

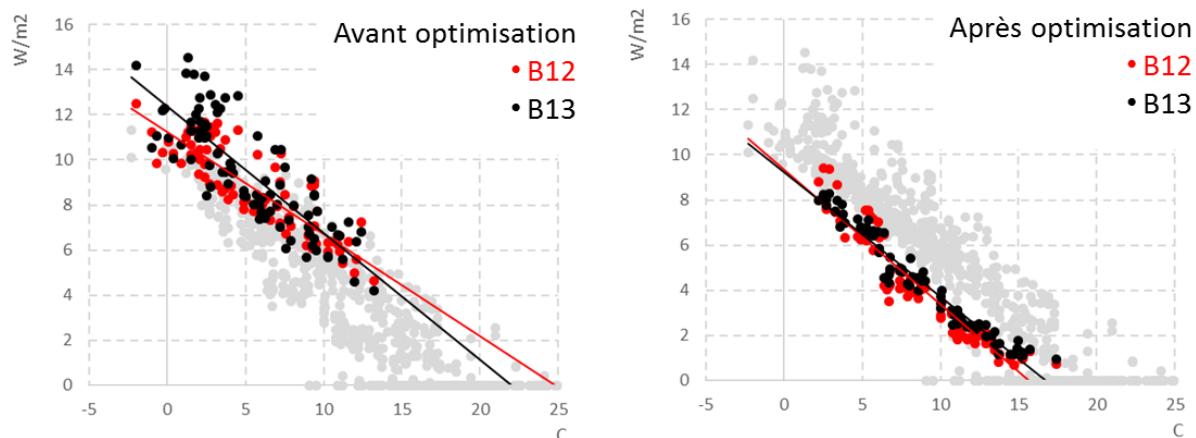


Figure 33. Demandes de chauffage des bâtiments B12 et B13, en fonction de la température extérieure, valeurs journalières, avant et après optimisation (source : Tornare et al., 2016)

A.7.2 Résultats

Dans les deux études de cas, on observe une importante réduction de l'écart de performance, par rapport à celui observé dans les 10 opérations de référence étudiées plus haut (Figure 34). Cette réduction se décompose en deux parties :

- Une Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage énergie (AMOen) lors de la phase de conception et de réalisation des travaux (attention particulière des acteurs du projet au volet énergie, choix d'une approche par rénovation globale visant un très haut standard énergétique, travaux réalisés conformément aux travaux annoncés dans le dossier d'autorisation, recours à des éléments préfabriqués pour la fermeture des balcons en loggias, etc.). Il en résulte une économie réelle sur la demande de chauffage supérieure à ce qui est observé dans les autres cas (Figure 34, points bleus foncés).
- Une Assistance à la Maîtrise d'Usage (AMU) visant à accompagner les locataires durant la phase d'exploitation, accompagnée d'une phase d'optimisation et de suivi énergétique après rénovation, permettant de réduire encore la demande de chauffage et donc l'écart de performance (Figure 34, points rouges).

Grâce à ces mesures d'optimisation, la part effectivement réalisée du potentiel d'économie théorique passe dans les deux cas d'environ 65% à 80% (Tableau 10). Le solde est principalement dû aux valeurs optimistes de la norme SIA pour calculer les économies théoriques, en particulier une température des logements à 20°C, au lieu des 21.5°C acceptables par les locataires.

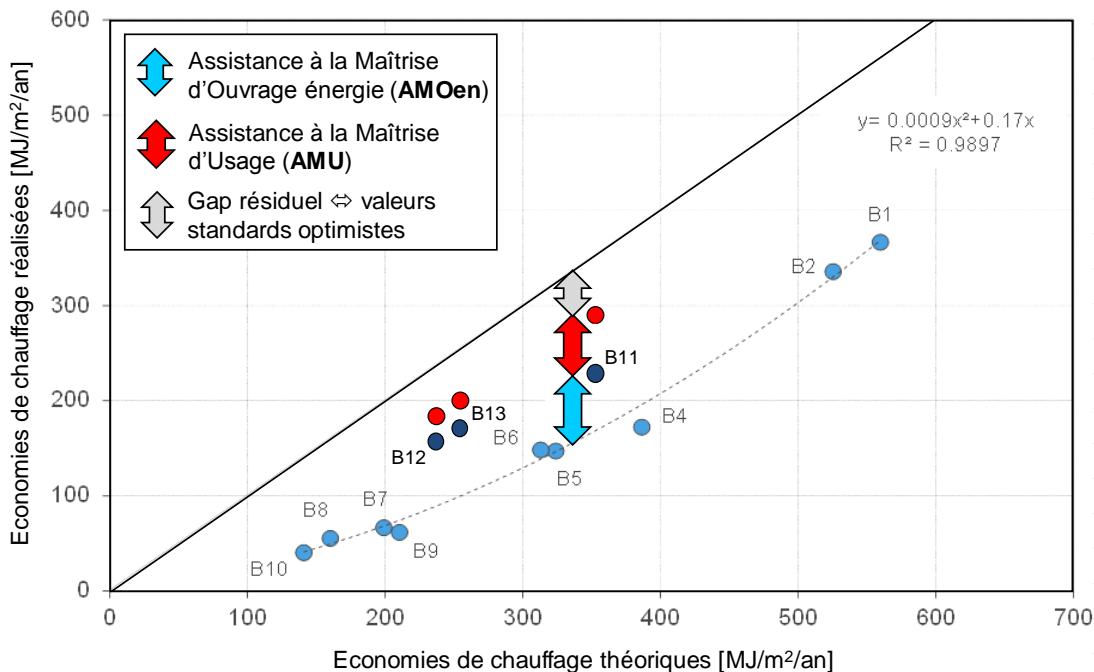


Figure 34. Réduction de l'écart de performance énergétique sur deux études de cas B11 et B12-13 après rénovation : (1) mesures d'optimisation et (2) reste dû à la différence entre les conditions standard d'utilisation et les conditions optimales d'utilisation

Situation après rénovation	Opération B11 (Minergie rénovation)		Opérations B12-B13 (Minergie-P rénovation)	
	Avant optimisation	Après optimisation	Avant optimisation	Après optimisation
Economies réalisées [MJ/m²]	229	291	171	201
Part réalisée = économies réalisée / théorique	65%	83%	67%	79%

Tableau 10. Effet des mesures d'optimisation sur les économies réalisées

A.7.3 Recommandations pour réduire l'écart de performance

Au vu des constats précédents, nous proposons dans cette section quelques recommandations visant à réduire l'écart de performance dans les bâtiments.

- Lors de la phase de planification, distinguer entre les conditions normées d'utilisation (calcul selon les valeurs standards de la norme SIA 380/1), les conditions optimales d'utilisation (celles d'un bâtiment optimisé au niveau énergétique) et enfin les conditions actuelles d'utilisation (celle d'un bâtiment rénové et non optimisé énergétiquement selon les pratiques actuelles observées).
- Après réalisation des travaux, il est important de procéder à une optimisation énergétique de l'exploitation des installations techniques (cf. SIA 2048), ainsi que de sensibiliser les habitants à des comportements adaptés (réglage optimal des vannes thermostatiques, baisse des exigences de températures, ouverture adéquate des fenêtres, moins de stores baissés en journée, ...)
- Plus globalement, il convient de réduire la dégradation de la performance énergétique tout au long du processus de rénovation et d'éviter les ruptures dans la chaîne de responsabilité entre les différentes phases du processus, en ayant recours par exemple à des intégrateurs qualifiés.

De façon plus spécifique, nous proposons à la page suivante (Figure 35) une série de recommandations qui ont été recueillies auprès de divers acteurs professionnels (entre autres les participants du CAS en management de l'énergie de l'Université de Genève) et des chercheurs de notre groupe de recherche. Elles ont été ensuite complétées par des recommandations issues de la littérature.

Cette figure indique, de gauche à droite, l'évolution temporelle du projet (lecture verticale). Les recommandations sont regroupées selon les différentes phases du projet, à savoir l'état des lieux, la conception, la réalisation, la mise en service et l'exploitation. Elles se trouvent également classées par type (lecture horizontale). Elles concernent la performance, l'expertise, la responsabilité, la formation, le suivi et enfin la communication. Par exemple, la quatrième ligne donne les recommandations en lien avec la formation, depuis l'état des lieux jusqu'à l'exploitation du bâtiment. Enfin, dans chaque case sont marqués les acteurs qui seraient principalement concernés par la recommandation.

Les principaux éléments clés sont les suivants :

- Pendant la première phase du projet, le rôle du propriétaire/maître d'ouvrage ainsi que de l'architecte et des ingénieurs est de bien caractériser l'état existant et de cerner les attentes concernant la performance énergétique et les moyens à disposition. La définition d'objectifs de performance énergétique réalistes (conditions optimales d'utilisation), qui sont revus selon l'évolution du projet, est utile et sert de suite comme valeur cible pendant l'exploitation du bâtiment.
- Pendant la phase de conception, il est important que le représentant du maître d'ouvrage cadre bien le projet et définit les rôles et les responsabilités des divers acteurs impliqués, dans une atmosphère de confiance et dans le but d'atteindre une bonne performance énergétique.
- Le plus essentiel dans la phase de construction est de veiller à une bonne qualité d'exécution. Pour ce faire, il faut une bonne communication et coordination entre les acteurs et disposer d'un personnel qualifié.
- La mise en service, qui n'est généralement pas considérée comme phase à part entière, s'avère être un moment clé du processus : trop souvent il y a des ruptures dans la chaîne de responsabilité et dans le transfert de connaissances spécifiques du bâtiment et des systèmes installés. Il est essentiel que la mise en service soit faite en présence des acteurs concernés (concepteurs, futurs exploitants, entreprises, ...)
- Pendant l'exploitation, il est important de faire un suivi régulier, en gardant en vue l'optimisation continue de la performance énergétique. Les contrôles fréquents permettent de garantir le bon fonctionnement et de déceler rapidement d'éventuels dysfonctionnements. De plus, l'assistance à la maîtrise de l'usage s'avère particulièrement intéressante pour sensibiliser les habitants aux bonnes pratiques. Enfin, le feedback entre exploitants et concepteurs ainsi que les retours d'expérience effectués par les groupes de recherche permettent de diffuser les bonnes pratiques.

Recommandations pour diminuer l'écart de performance

Acteurs impliqués en priorité
 P Propriétaire, Maître d'ouvrage
 E Entreprises (constr., exploit.)
 A Architecte
 R Gestionnaire, régie
 I Ingénieur
 U Utilisateurs, locataires

Etat des lieux		Conception		Réalisation		Mise en service		Exploitation	
PERFORMANCE	EXPERTISE	RESPONSABILITÉ	FORMATION	SUIVI	COMMUNICATION	A	I	E	R
P bien cerner les attentes et les moyens , distinguer entre les calculs normés et un objectif réaliste	A favoriser une rénovation globale ou par étapes selon un planning prédefini	I contrôler rigoureusement la qualité de l'exécution , valider la réalisation, actualiser les résultats calculés en cas de changement	R	U	P ajuster continuellement les systèmes et réglages selon les conditions réelles d'utilisation	A	I	E	R
P caractériser l' état existant et identifier la situation énergétique initiale (périmètre, bâtiment, postes de consommation)	A favoriser des solutions simples, efficientes et robustes , prendre en compte le cout global du cycle de vie, réaliser un calcul financier réaliste, intégrer le futur usage du bâtiment	I respecter les spécifications et les détails constructifs , contrôler la conformité des travaux exécutés aux cahiers des charges	R	U	P regrouper lors de la mise en service tous les acteurs concernés , faire des contrôles périodiques pendant la première année d'exploitation	A	I	E	R
P associer les acteurs assez tôt dans le projet	A clarifier les responsabilités et les rôles , élaborer un cahier de charges complet et une stratégie de rémunération liée à la performance	I analyser finement les réponses aux appels d'offre	R	U	P éviter la rupture dans la chaîne de responsabilité entre les acteurs et transmettre la responsabilité à l'exploitant	A	I	E	R
P prendre en compte les expériences tirés des projets précédents et les bonnes pratiques	A veiller à avoir un personnel qualifié et expérimenté (formation continue, ...)	I favoriser l'émergence d'une offre mieux coordonnée et plus performante (accréditation des professionnels, ...)	R	U	P former les gestionnaires de l'énergie aux dimensions techniques, humaines et organisationnelles du management de l'énergie	A	I	E	R
P se renseigner sur le plan de maintenance et d'exploitation des installations et sur l'équipe en charge du suivi	A prévoir une stratégie de mesure et de suivi	I mettre en place le système de mesure pour le suivi énergétique et les alarmes nécessaires pour détecter les dysfonctionnements	R	U	P s'assurer que le suivi est organisé et informer et expliquer les systèmes et réglages, documentation écrite	A	I	E	R
P prendre en compte les feedbacks des usagers et des exploitants	A favoriser l'échange d' informations et les synergies entre les acteurs et créer une atmosphère de confiance , mettre en place une équipe pluridisciplinaire	I s'assurer de l' engagement des acteurs et créer une atmosphère de confiance , mettre en place une équipe pluridisciplinaire	R	U	P s'assurer du bon déroulement de protocoles de mise en service , manuels, infos des fournisseurs, mise à jour des plans et schémas	A	I	E	R

Figure 35. Synthèse des recommandations selon les différentes étapes du projet

A.8 Performances économiques et incidence sur les loyers

A.8.1 Coûts globaux des rénovations

Cette partie est consacrée à l'analyse de la performance économique de l'ensemble des opérations de rénovation de notre échantillon. Nous avons examiné au total 28 opérations : 22 opérations dont les coûts détaillés des travaux figurent dans les dossiers d'autorisation et 6 opérations avec uniquement le coût global indiqué.

La différence avec les 26 opérations analysées précédemment (cf. A.2.2) s'explique comme suit : i) les rénovations B14, B15 et B16 effectuées par étapes (a+b) ont été considérées séparément, ii) les bâtiments rénovés B12 et B13, qui possèdent un seul devis de coût, n'ont été comptés qu'une seule fois dans cette analyse.

Les coûts annoncés sont issus des devis finaux présents dans les dossiers d'autorisation. Ils représentent l'investissement total dans les travaux de rénovation, sans considérer les coûts liés à la surélévation (lot 2, cf. Tableau 3). Ces coûts comprennent les travaux d'amélioration énergétique, les travaux à plus-value non énergétique et les travaux d'entretien et de mises aux normes, y compris les honoraires des acteurs impliqués. La composante énergétique ne représente donc qu'une part du coût global des opérations.

Hors subventions, le coût global des opérations de rénovation varie de manière significative en fonction de la nature des travaux effectués et se situe dans une fourchette comprise entre 175 et 3400 CHF TTC / m^2_{SRE} . La moyenne des 28 opérations s'élève à environ 875 CHF TTC / m^2_{SRE} .

En moyenne, les coûts par type de rénovation sont comme suit :

- 1330 CHF / m^2_{SRE} (N=10), pour les rénovations globales (≥ 3 éléments, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques)
- 700 CHF / m^2_{SRE} (N=15), pour les rénovations façades (1-2 éléments, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques)
- 240 CHF / m^2_{SRE} (N=3), pour les travaux de réfection¹ uniquement.

En moyenne, le coût des rénovations globales s'élève à 60% du coût d'un bâtiment neuf de même typologie, estimé à 2'250 CHF/ m^2_{SRE} (benchmark sur 8 bâtiments résidentiels collectifs réalisés entre 1997 et 2005 à Genève, Zgraggen, 2010).

On note aussi que le coût des travaux de surélévation des 3 opérations (B18, B20 et B21) de notre échantillon s'élève en moyenne à 5250 CHF TTC / m^2_{SRE} additionnelle, soit un coût au mètre carré 6 fois plus élevé que la moyenne des coûts globaux des rénovations (tous types confondus).

Limiter notre analyse économique à l'approche par coût global des rénovations ne présenterait que peu d'intérêt. Il est également important de pouvoir estimer la part des coûts liés aux travaux d'amélioration énergétique et de pouvoir les discuter avec les performances énergétiques prévues et réelles associés. A ce propos, une méthode de décomposition des coûts est proposée dans la partie suivante.

A.8.2 Méthode de décomposition des coûts

La Figure 38 illustre la méthode de décomposition des coûts, en passant d'une classification CFC à celle par élément eCCC-Bât, puis en les répartissant en coûts d'amélioration énergétique, coûts à plus-values non-énergétiques et coûts d'entretien.

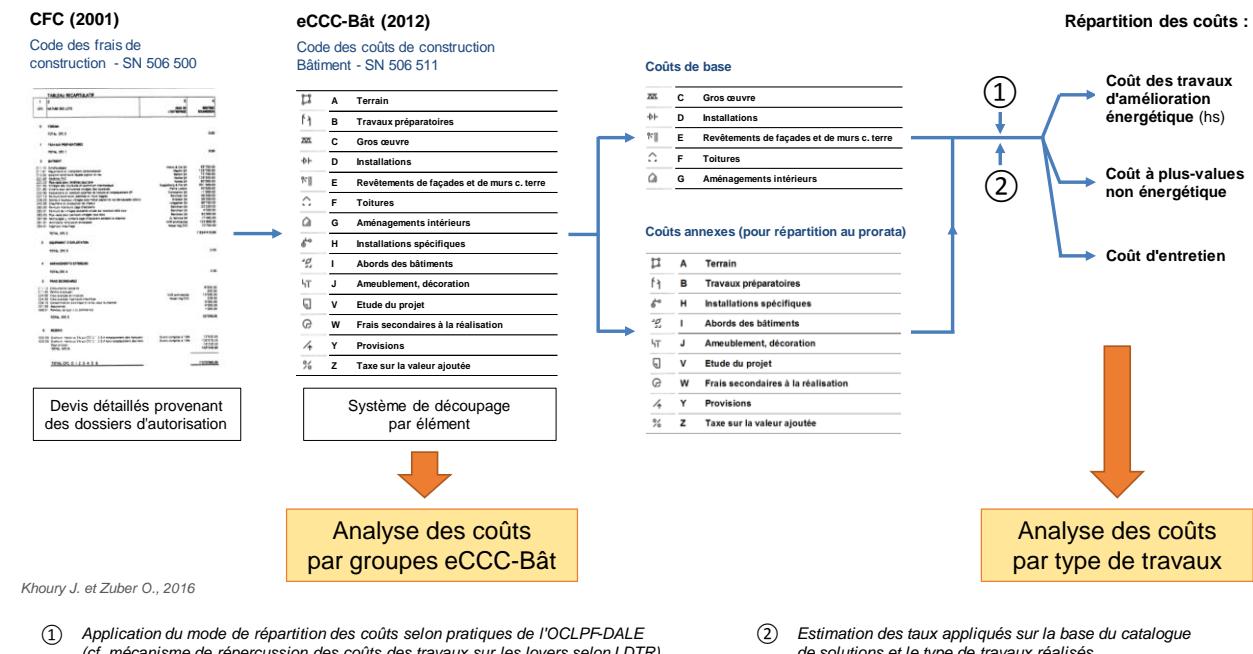


Figure 36. Méthode de décomposition des coûts, en passant de la classification CFC à eCCC-Bât, puis en les répartissant en coûts d'améliorations énergétiques, à plus-values non-énergétiques et coûts d'entretien

Cette méthode de répartition est le fruit d'une réflexion menée avec l'architecte Olivier Zuber et les professionnels de la rénovation. Elle s'appuie également sur les discussions menées avec l'Office cantonal du logement et de la planification foncière (OCLPF). Elle combine ainsi une approche normée (utilisation du standard CRB) et de pratiques réelles appliquées par les services de l'Etat qui se basent sur les mécanismes de répercussion des coûts des travaux sur les loyers. Elle ne se veut pas parfaite, mais propose une méthode complète qui pourrait être utilisée pour réaliser des analyses comparatives ou des statistiques de coûts de la rénovation à grande échelle.

Décomposition par groupes d'éléments

La première partie de la méthode consiste à transposer les coûts présentés dans les dossiers d'autorisation selon le Code des frais de construction (CFC : 2001 – SN 506 500) à une nouvelle répartition selon le Code des coûts de construction Bâtiment (méthode eCCC-Bât : 2012 – SN 506 511). La jointure a été effectuée en utilisant la passerelle « eCCC gate » du standard CRB - Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction (CRB, 2012a et CRB, 2012b).

Le Code des coûts de construction Bâtiment eCCC-Bât est structuré hiérarchiquement et comporte jusqu'à quatre niveaux normés (groupe principal, groupe d'éléments, élément, sous-élément). Les groupes et sous-groupes présents dans les opérations étudiées sont décrits ci-après. Ils sont répartis en deux grandes catégories : travaux de base et travaux annexes.

Travaux de base :

- Groupe C (gros œuvre): radiers, fondations, parois porteuses, structures porteuses de planchers et toitures.
- Groupe D (installations): installations électriques, de chauffage, de ventilation, de distribution d'eau, de transport.
- Groupe E (revêtements de façades et de murs contre terre): revêtements de façades, crépis, isolations thermiques extérieures, façades légères, fenêtres, portes, dispositifs de protection, fenêtres et portes, dispositifs de protection contre le soleil, entretien façade (carbonatation, etc.).
- Groupe F (toitures): couvertures, toitures plates, toitures inclinées, protection contre la foudre, éléments incorporés dans toitures,,.
- Groupe G (aménagements intérieurs): cloisons, portes, revêtements de sols, revêtements de parois, revêtements de plafonds, équipements fixes, prestations complémentaires aux aménagements intérieurs.

Travaux annexes :

- Groupe B (travaux préparatoires): installations de chantier, raccordement aux réseaux, déconstruction d'ouvrages, fouilles, amélioration du sol de fondation, protection d'ouvrages, échafaudages.
- Groupe I (abords des bâtiments): aménagements extérieurs, ouvrages extérieurs, surfaces en dur,
- Groupe V (étude du projet): concepteurs, entrepreneurs, mandants.
- Groupe W (frais secondaires): autorisations, taxes, assurances, garanties, frais de capitaux, restauration, relations publiques, indemnisations.
- Groupe Y (provisions): divers et imprévus
- Groupe Z (TVA).

La méthode normée a été appliquée strictement, à une exception près : nous avons considéré les travaux liés au traitement de la carbonatation des éléments en béton dans le groupe principal E (Revêtements de façades et de murs contre terre) au lieu du groupe C (gros-œuvre). En effet, dans la rénovation ces travaux sont assez fréquents et touchent principalement les éléments en béton de l'enveloppe, raison pour laquelle nous avons décidé de les intégrer au groupe E. Les résultats de la décomposition des coûts par groupe d'éléments sont présentés au point suivant (A.8.3).

Décomposition par type de travaux

La deuxième partie de la méthode consiste à décomposer les coûts selon le type de travaux (ou type de plus-value) :

- travaux à plus-value énergétique
- travaux à plus-value non énergétique
- travaux d'entretien (sans plus-value)

Pour y arriver, nous avons tout d'abord ventilés les coûts des travaux annexes (groupes A, B, ainsi que H à Z) sur les coûts de travaux base (groupes C à G), au prorata de ces derniers.

Ensuite, pour chaque sous-élément des travaux de base, nous avons décomposé les coûts en fonction de leur plus-value, en appliquant les pratiques de l'Office cantonal du logement et de la planification foncière (OCLPF) et en se basant sur le catalogue de solutions retenues dans les projets (voir point A.3.1), le type de travaux réalisés (énergie / non énergie) et l'âge des éléments rénovés. La structure des coûts selon ces 3 types de travaux sera présentée au point A.8.4.

A titre d'exemple, la répartition du coût des travaux d'isolation périphérique des façades est considérée comme suit : 50% comme travaux à plus-value énergétique, 35% comme travaux à plus-value non

énergétique qui prend en compte les bénéfices non énergétiques de l'action entreprise comme par exemple l'amélioration du confort dans les appartements en hiver, et enfin 15% comme travaux d'entretien. Les travaux de traitement de la carbonatation des façades et les travaux d'aménagement intérieurs effectués dans les bâtiments sont considérés comme non énergétiques. Enfin, l'ajout d'une installation solaire en toiture ou d'une pompe à chaleur pour le chauffage du bâtiment est considéré entièrement comme travaux d'amélioration énergétique.

Cette méthode a l'avantage de se baser sur une pratique utilisée par l'Etat. Une méthode plus pointue de décomposition des coûts nécessiterait, ad minima, de pouvoir caractériser l'état de vétusté des divers éléments au cas par cas, ce pourquoi les informations ne sont pas à disposition.

Performance énergétique et coûts associés

Les coûts des travaux énergétiques issus de cette analyse seront ensuite croisés au point A.8.5 avec les performances énergétiques prévues et réelles associées. Enfin, les enjeux économiques des opérations et les incidences sur les loyers seront discutés respectivement aux points A.8.6 et A.8.7.

A.8.3 Répartition des coûts par groupes d'éléments

L'analyse des coûts de rénovation par groupes principales eCCC-Bât montre que sur l'échantillon analysé les coûts liés aux installations (groupe D : 22%) et aux revêtements de façades (groupe E : 24%) constituent en moyenne à eux seuls près de la moitié des coûts engagés dans les rénovations (46%).

A l'exception des aménagements intérieurs (groupe G : 13%), des frais d'études de projet (groupe V : 13%) et de la taxe sur la valeur ajoutée (groupe Z), les autres groupes restent en moyenne en dessous du seuil des 5% des coûts engagés. Il est aussi évident de constater sur la Figure 37 que les coûts liés à l'acquisition des terrains (groupe A), l'ameublement et la décoration (groupe J) et les installations spécifiques (groupe H), bien que répertoriés dans les groupes principaux, ont été nuls.

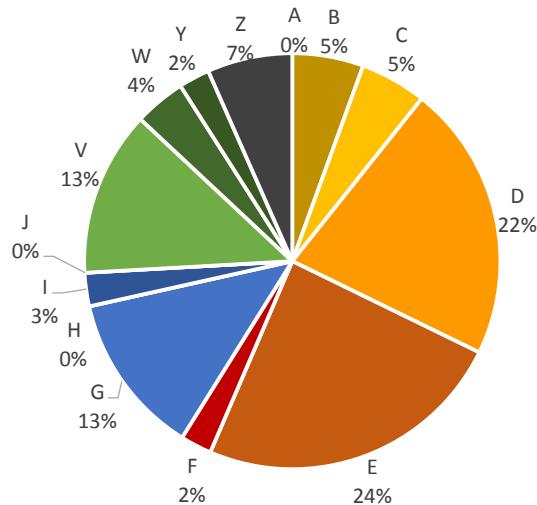


Figure 37. Répartition des coûts par groupes principaux d'éléments
(valeurs moyennes sur un total de 22 opérations de rénovation)

En complément à l'analyse des valeurs moyennes des coûts observés, la Figure 38 donne la répartition en percentiles des coûts par groupes principaux d'éléments (A à Z). Sont indiqués de gauche à droite, le premier décile (D1), le premier quartile (Q1), le second quartile ou la médiane (M), le troisième quartile (Q3)

et enfin le neuvième décile (D9) de la distribution. Cette approche permet de mieux refléter la diversité des solutions retenues et de montrer l'étendue des fourchettes de coûts. Enfin, les cercles donnent les valeurs moyennes pour chaque catégorie.

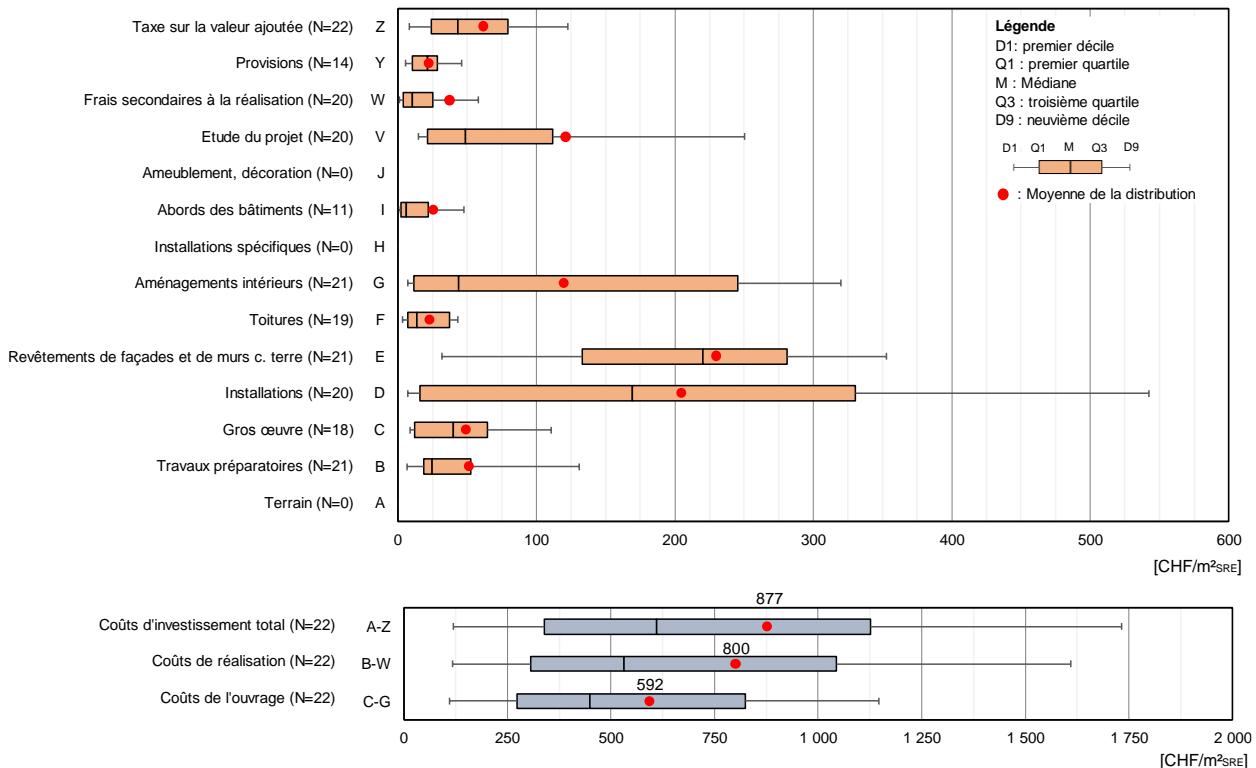


Figure 38. Distribution des coûts des opérations de rénovation par groupes principaux d'éléments eCCC-Bât

Les principaux résultats de cette analyse sont les suivants :

- Le coût de réalisation des opérations (groupes B à W) s'élève en moyenne à 800 CHF/m² et représente 91% du coût d'investissement total. Le solde est dû principalement aux provisions pour imprévus et renchérissement pendant la durée de la conception et de la réalisation des travaux, ainsi qu'à la taxe sur la valeur ajoutée. Dans 50% des cas (1^{er} – 3^{ème} quartile), ces coûts de réalisation varient entre 300 et 1050 CHF/m², la médiane étant de 530 CHF/m².
- Le coût de l'ouvrage (groupes C à G : gros œuvre, installations, revêtements façades, toitures et aménagements intérieurs), s'élève en moyenne à 592 CHF/m² et compte donc pour deux tiers du coût total. Dans 50% des cas ces coûts se situent entre 160 et 825 CHF/m², la médiane étant de 450 CHF/m².
- Le coût des travaux portant sur les installations techniques, les façades et les toitures (groupes D à F) s'élève en moyenne à 437 CHF/m², représentant près de la moitié du coût total. Près de la moitié des opérations ont des coûts qui se situent entre 150 et 490 CHF/m², la médiane étant de 400 CHF/m².
- Parmi les groupes principaux d'éléments analysés, le coût de revêtements des façades et des murs contre terre (groupe E) est le plus élevé en moyenne (230 CHF/m²). Il est suivi en deuxième position par celui des installations techniques (groupe D, 205 CHF/m²), les frais liés à l'étude du projet (groupe V, 122 CHF/m²) et ceux liés aux aménagements intérieurs (groupe G, 120 CHF/m²). Les autres groupes restent en moyenne en dessous de 65 CHF/m².
- La fourchette des coûts observés est relativement large et dépend principalement de la nature des travaux de rénovation réalisés (cf. A.3.1 – catalogues de solutions retenues).
- Les coûts des installations techniques représentent la fourchette la plus large, avec des coûts qui varient entre 10 et plus de 550 CHF/m². A titre d'exemple, la valeur maximale atteint 800 CHF/m² dans le cas d'une rénovation (en projet) visant des critères de très haute performance énergétique

et dont le coût global devrait s'approcher des 3400 CHF/m². Dans ce cas, les bâtiments rénovés seraient équipés de systèmes de ventilation à double flux avec récupération de chaleur à haut rendement, des appareils d'éclairage répondant aux nouvelles normes environnementales et d'une centrale solaire thermique et photovoltaïque en toiture. Ils utiliseront également la chaleur des eaux-usées comme source froide pour les pompes à chaleur afin de couvrir une grande partie des besoins de chauffage.

- La fourchette des coûts de revêtements des façades est également assez large, comprise entre 126 (D1) et 353 CHF/m² (D9). Le constat est similaire pour les coûts d'aménagements intérieurs (groupe G), qui peuvent varier entre une simple réfection de la peinture des pièces et des travaux plus conséquents de réfection des cuisines et des salles de bains qui s'accompagnent généralement de divers travaux de mises aux normes.

A.8.4 Répartition des coûts par type de travaux

La répartition des coûts par type de travaux a été effectuée sur les 22 opérations de rénovation dont les coûts détaillés figuraient dans les dossiers d'autorisation. Les opérations classées par ordre décroissant du coût d'amélioration énergétique sont représentées sur la Figure 39.

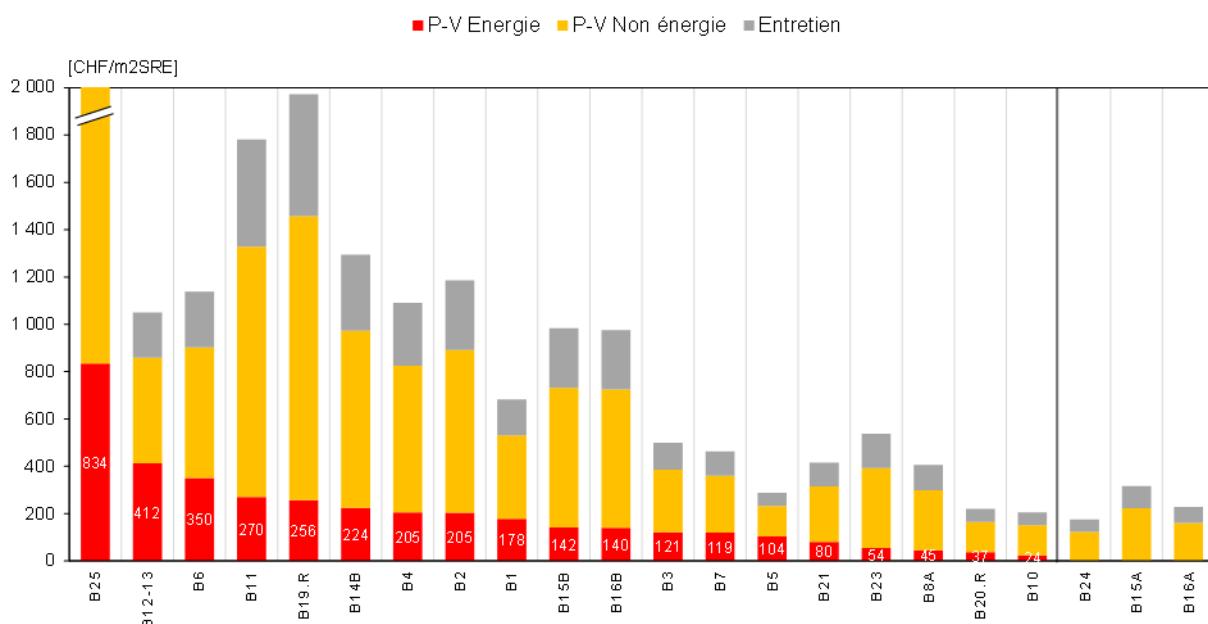


Figure 39. Opérations de rénovations classées par ordre décroissant du coût d'amélioration énergétique (N=22 ; Coût global B25 = 3396 CHF/m²_{SRE}).

A l'exception des trois dernières opérations (B24, B15a et B16a), toutes les autres opérations comprennent des travaux énergétiques. La fourchette des coûts observés est assez large (24 à 834 CHF/m²_{SRE}) et montre bien l'hétérogénéité des travaux réalisés. Près de la moitié de ces bâtiments ont investi entre 100 et 300 CHF/m²_{SRE} pour ce type de travaux.

La part du coût global liée à des travaux d'amélioration énergétique est en moyenne de 20% sur l'échantillon analysé. Cette part baisse à 16% pour les rénovations partielles ou de façades (1 ou 2 éléments de l'enveloppe assainis) et s'élève à 24% pour les rénovations complètes (≥ 3 éléments).

La part restante se répartit comme suit : 70% pour les travaux à plus-value non énergétique et 30% pour les travaux d'entretien (selon pratique actuelle de l'OCLPF). Un ratio 60% / 40% pourrait également être appliqué dans certains cas.

Le tableau ci-dessous donne les coûts moyens des opérations de rénovation complètes, partielles et d'entretien, en fonction du type de travaux (plus-value énergétique, plus-value non énergétique et entretien).

Type d'opération	Nb. op.	Plus-value	Plus-value	Entretien	Total
		Énergie CHF/m ² SRE	non énergie CHF/m ² SRE		
Complète (≥ 3 éléments)	8	322	722	309	1353
Façade ou partielle (1 ou 2 élém.)	11	111	416	178	705
Entretien (sans plus-value énergie)	3	0	168	72	240
Echantillon total	22	173	493	211	877

Tableau 11. Coûts moyens des opérations des rénovations complètes, partielles et d'entretien

A.8.5 Performances énergétiques et coûts associés

Dans cette section, les coûts des travaux à plus-value énergétique calculés dans la partie précédente sont mis en perspective avec les performances énergétiques des opérations de rénovation.

On observe sur la Figure 40 que les opérations de rénovation complètes ou quasi complètes affichent globalement des coûts énergétiques plus élevés que les rénovations partielles. La même tendance s'observe pour les économies de chauffage : Les économies de chauffage théoriques sont plus élevées dans les opérations de rénovation complètes que dans les rénovations partielles. On peut donc conclure que les rénovations complètes sont globalement plus chères en coûts énergie mais engendrent des économies de chauffage plus importantes que les rénovations partielles.

Néanmoins, on constate dans les deux groupes une disparité entre les différentes opérations. Il est intéressant de constater que certaines opérations de rénovation complètes (B1 et B2) ont des coûts assez faibles (de l'ordre de 200 CHF/m²), mais engendrent des économies de chauffage théoriques plus élevées que les rénovations Minergie-P et Minergie qui arrivent en tête de classement en termes de coût énergie.

On ne peut donc pas affirmer avec certitude sur la base de l'échantillon analysé qu'il existe une relation bien établie entre les coûts des travaux à plus-value énergétique et les économies de chauffage théoriques et réalisées.

En fait, les économies d'énergie ne dépendent pas seulement de l'effort consenti pour atteindre le niveau de performance énergétique visé, mais également de la situation énergétique initiale avant travaux qui n'est pas identique entre les bâtiments. A titre d'exemple, les économies d'énergie engendrées par la pose de fenêtres isolantes à triple vitrage sont différentes si les fenêtres étaient en simple ou en double vitrage avant travaux, pour un coût d'investissement identique.

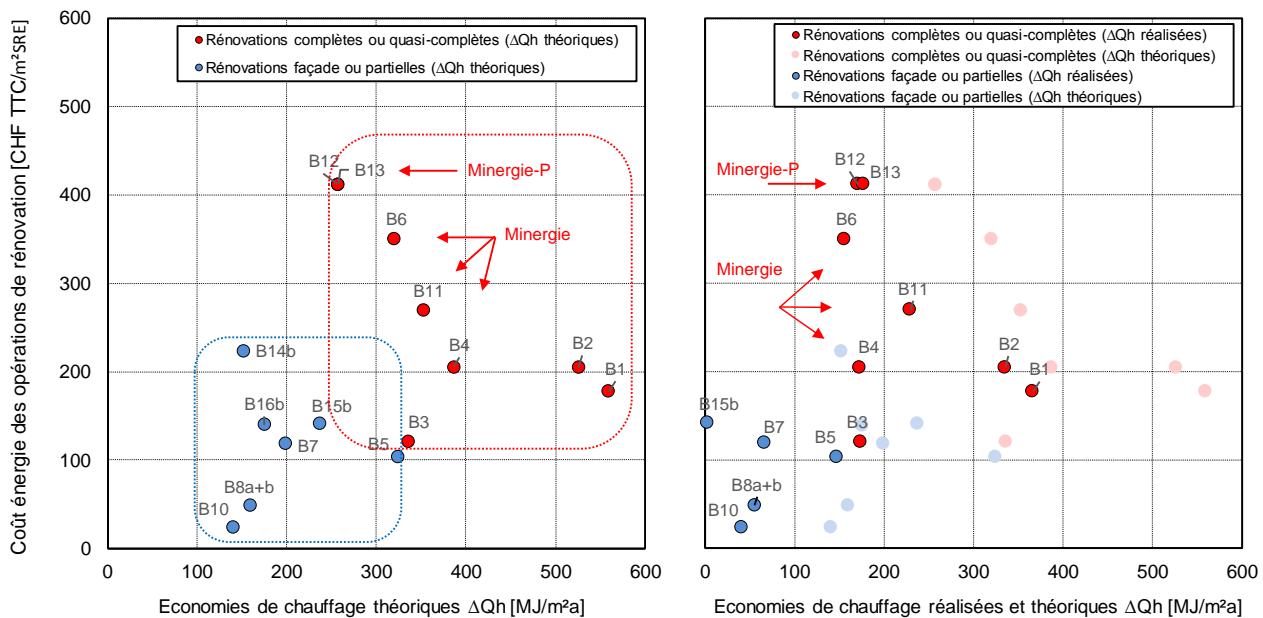


Figure 40. Coûts des travaux à plus-values énergétiques en fonction des économies de chauffage théoriques et réalisées associées (ΔQh)

Afin de s'affranchir de ces disparités, le coût des travaux énergétiques est comparé ci-dessous avec le niveau de performance énergétique après travaux, indépendamment de l'état avant travaux (Figure 41).

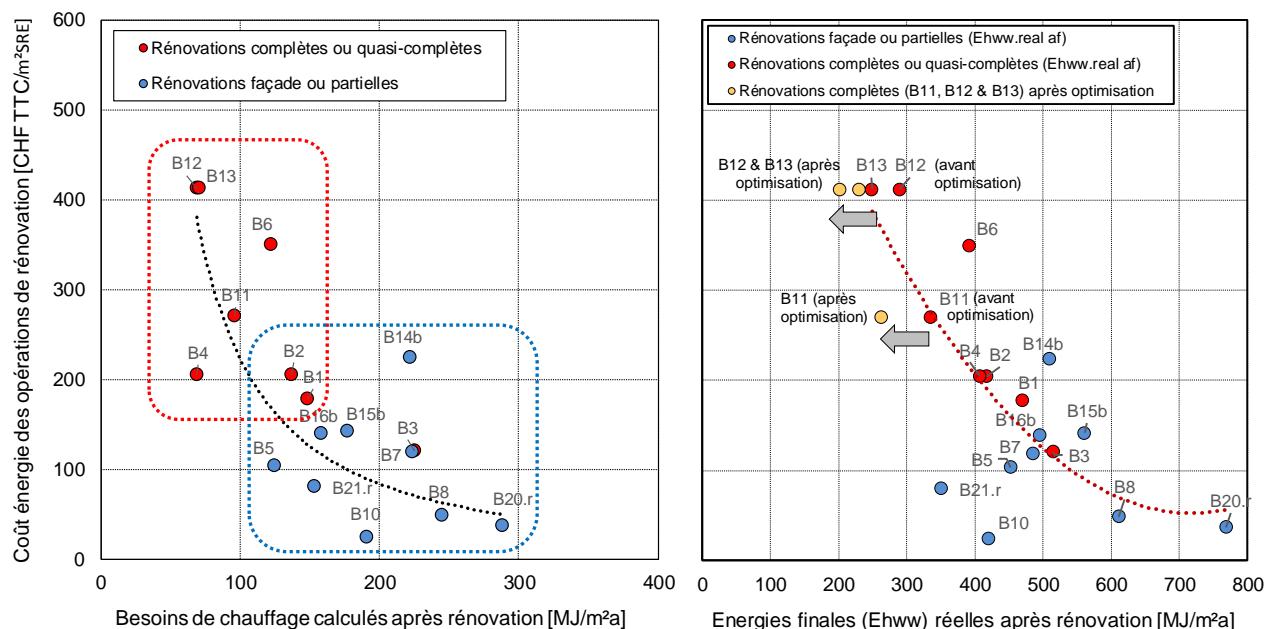


Figure 41. Coûts des travaux à plus-values énergétiques en fonction des besoins de chauffage normés après rénovation (Qh_{norm} , à gauche) et la consommation d'énergie finale réelle après rénovation (Ehww, à droite).

On confirme ainsi que les rénovations complètes ou quasi complètes, bien qu'elles coûtent davantage que les rénovations partielles, ont globalement des besoins normés de chauffage après rénovation (Qh_{norm}) et des consommations thermiques réelles après rénovation (Ehww) moindres que les bâtiments du second groupe.

Les résultats révèlent aussi qu'il existe bien une relation entre le coût des travaux énergétiques et les besoins normés de chauffage après travaux (graphique de gauche de la Figure 41). Cette relation qui semble être confirmée également pour les consommations thermiques réelles après travaux (graphique de droite de la Figure 41) mériterait d'être examinée davantage et consolidée avec d'autres exemples.

Enfin, l'analyse de cet échantillon montre que le surcoût entre les rénovations à haute performance énergétique (Minergie) et celles à très haute performance énergétique (Minergie-P) est en moyenne de 100 CHF/m² environ, pour des économies d'énergies réelles comprises entre 50 et 100 MJ/m². A ce propos, la question se pose naturellement à savoir s'il est justifié de viser des niveaux de très haute performance énergétique, sachant que comme le montre la Figure 41 (graphique de droite), le suivi et l'optimisation énergétique des bâtiments après la fin des travaux de rénovation permet d'économiser à des coûts beaucoup moins près de 100 MJ/m².

A.8.6 Coûts du kWh et de la tonne de CO₂ évités

Le Tableau 12 donne le coût de l'énergie finale (Ehww) économisée ainsi que celui de la tonne de CO₂ évitée par les opérations B1 à B13. L'opération B9 n'a pas été considérée dans cette analyse car l'absence de coûts détaillés ne nous permet pas de déterminer le coût des travaux à plus-value énergétique.

Bât.	Données de base			Coût du kWh évité			Coût de la tonne CO ₂ évitée		
	Annuité	Δ Energie	Δ CO ₂	C brut	C net	C net	C brut	C net	C net
	CHF/an	MWh/an	t/an	ct/kWh	ct/kWh	ct/kWh	CHF/t	CHF/t	CHF/t
B1	22'500	215	57	10.5	8.2	-0.8	394	310	-29
B2	133'100	1'555	314	8.6	6.9	-1.1	424	340	-56
B3	46'500	384	102	12.1	9.9	0.9	456	372	33
B4	41'200	387	130	10.6	7.8	-1.2	316	232	-35
B5	70'100	674	179	10.4	8.2	-0.8	392	308	-31
B6	88'400	411	257	21.5	16.3	7.3	344	260	116
B7	150'100	604	160	24.8	22.6	13.6	936	852	513
B8	49'000	440	117	11.1	8.9	-0.1	420	336	-3
B10	14'800	105	21	14.0	12.3	4.3	695	611	215
B11	36'100	207	55	17.4	15.2	6.2	657	573	234
B12	130'400	530	256	24.6	20.5	11.5	509	425	239
B13	215'300	833	373	25.9	22.1	13.1	577	493	292

Annuité : annuité sur les travaux à plus-value énergie

Δ Energie : économie d'énergie finale

Δ CO₂ : économie de CO₂

C brut : coût brut, non compris économie achat d'énergie et sur taxe CO₂

C net CO₂ : coût net, y.c. économie sur taxe CO₂ (*)

C net CO₂+én. : coût net, y.c. économie sur taxe CO₂ et sur achat d'énergie (*)

(*) aux coûts 2016

Tableau 12. Coût du kWh d'énergie finale et de la tonne de CO₂ évités.

La méthode d'obtention des coûts à plus-value énergétique a été décrite en détail dans le chapitre A.8.2. Elle combine une approche normée (utilisation du standard CRB) et des pratiques réelles appliquées par l'Etat de Genève pour la répercussion du coût des travaux sur les loyers.

Nous avons calculé l'annuité liée aux travaux à plus-value énergétique sur la base des hypothèses suivantes :

- Une subvention à hauteur de 25% des travaux énergétiques.
- Une durée d'amortissement de 30 ans avec un taux d'intérêt de 4%.
- Des frais d'exploitation supplémentaires estimés à 7'000 CHF/an.

L'économie d'énergie finale (ΔE_{HWW}) est celle effectivement observée avant / après rénovation, en tenant compte des corrections climatiques. Elle résulte de l'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe et des systèmes techniques. L'économie de CO₂ se rapporte à cette économie d'énergie. Le cas échéant elle tient également compte du changement de vecteur énergétique (voir chapitre A.4).

Le coût du kWh évité est calculé à trois niveaux :

- En valeur brute, qui correspond à l'annuité des travaux à plus-value énergétique, ramenée à l'économie d'énergie finale.
- En valeur nette, déduction faite de l'économie sur la taxe CO₂.
- En valeur nette, déduction faite de l'économie sur la taxe CO₂ et sur l'achat d'énergie.

La même approche est utilisée pour le coût de la tonne de CO₂ évitée.

Pour le calcul des valeurs nettes, le coût de l'achat d'énergie est fixé à 8 ou 9 ct/kWh (selon le combustible), celui de la taxe CO₂ à 84 CHF/t. Il convient de souligner que ces valeurs, qui sont représentatives de la situation actuelle, sont sujettes à une évolution potentiellement importante. Dès lors, les coûts en valeur nette présentés dans le Tableau 12 sont à prendre avec précaution.

Les résultats montrent que :

- Sur l'ensemble de l'échantillon, le coût brut du kWh d'énergie finale réellement économisée se situe dans une fourchette allant de 8.6 à 25.9 ct/kWh. Vu sous l'angle environnemental, le coût brut de la tonne de CO₂ évitée se situe dans une fourchette allant de 316 à 936 CHF/t.
- Pour les 3 rénovations à haute performance énergétique – Minergie (B4, B6, B11), le coût brut du kWh d'énergie finale économisée se situe dans une fourchette allant de 10.6 à 21.5 ct/kWh, avec une moyenne à 16.5 ct/kWh. Le coût brut de l'économie de CO₂ se situe quant à lui dans une fourchette allant de 316 à 657 CHF/t, avec une moyenne à 439 CHF/t. Après déduction de l'énergie économisée et de la taxe carbone évitée (aux coûts 2016), le surcoût est nul ou de quelques centimes par kWh. Ceci devrait se réduire ou même s'inverser avec l'augmentation de la taxe carbone et/ou une augmentation du coût des combustibles.
- Pour les 2 rénovations à très haute performance énergétique – Minergie-P (B12, B13), le coût brut du kWh d'énergie finale économisée s'élève à environ 25 ct/kWh, et celui de l'économie de CO₂ entre 509 et 577 CHF/t. Après déduction de l'énergie économisée et de la taxe carbone évitée (aux coûts 2016), il reste un surcoût d'une dizaine de centimes par kWh par rapport aux combustibles fossiles (11.5 – 13.1 ct/kWh). Il est à souligner que le coût brut de l'énergie économisée reste inférieur au coût actuel de la chaleur renouvelable offerte sur le marché genevois. Un doublement du prix de l'énergie ou une augmentation de la taxe carbone à environ 350 CHF/tonne ou bien encore une composition des deux rendrait le coût du négo kWh économiquement compétitif.

Sur la base de l'échantillon à disposition, et avec les coûts à plus-value énergétique issus de la méthode utilisée, on en conclut qu'avec le prix actuel de l'énergie et dans le contexte réglementaire en vigueur, les opérations rénovation Minergie sont proche de la rentabilité, alors qu'un effort supplémentaire doit être

consenti pour assurer la rentabilité des rénovations Minergie-P. Par ailleurs, le suivi et l'optimisation énergétique des installations techniques après la fin des travaux de rénovation devraient permettre d'accroître l'efficacité des opérations, d'augmenter les économies d'énergie effectivement réalisées et de diminuer le coût de la tonne de CO₂ évitée, pour le même montant investi dans les travaux énergétiques.

A.8.7 Incidence sur les loyers

La quasi-majorité des rénovations analysées ont engendré une hausse des loyers après travaux pour les locataires. La Figure 42 montre la hausse moyenne des états locatifs en francs par pièce et par an en fonction du loyer moyen avant travaux (graphique de gauche) et des économies d'énergie finales réalisées ΔE_{HWW} en MJ/m² par an (graphique de droite). L'analyse a portée sur 17 opérations. Les rénovations accompagnées de travaux de surélévation (B18, B20 et B21) n'ont pas été considérées car il est difficile de distinguer dans le graphique de droite la part des économies réelles imputées aux travaux énergétiques de celle résultant de la surélévation.

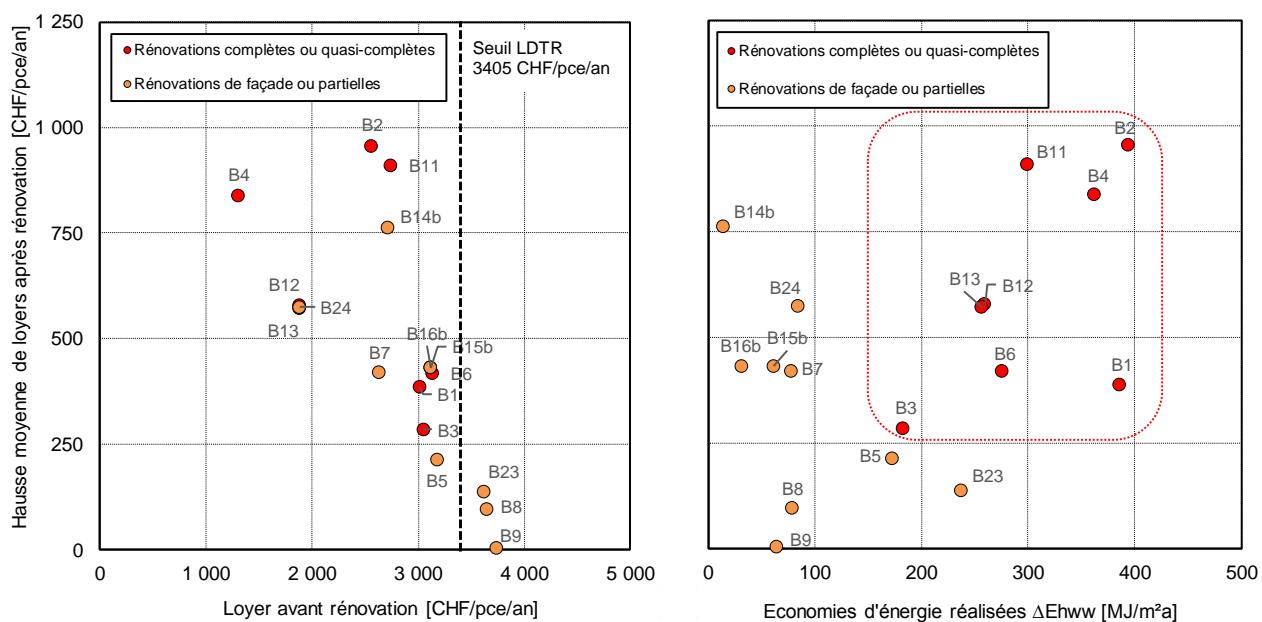


Figure 42. Hausses moyennes des loyers après rénovation en fonction du loyer moyen avant travaux (gauche) et des économies d'énergie finales réalisées (droite).

Les résultats montrent que la hausse moyenne des loyers est comprise entre 95 et 956 CHF/pce/an, à l'exception du cas B9 dont les loyers n'ont pas été augmentés. La hausse de loyer peut résulter de la répercussion de la hausse admissible par les travaux à plus-value non énergétique (appelé aussi « travaux de rénovation »), la hausse admissible par les travaux énergétiques, auxquelles peuvent s'ajouter si nécessaire la Baisse Prévisible des Charges et une contribution énergétique du locataire à hauteur 120 CHF/pce/an. Cette augmentation dépend également du loyer initial et du plafond LDTR qui se situe aujourd'hui à 3405 CHF/pce/an.

On constate d'abord une corrélation entre le loyer moyen avant travaux et la hausse moyenne des loyers (voir graphique de gauche, Figure 42), qui est probablement due au mécanisme de répercussion des coûts des travaux sur les loyers contrôlés en application de la LDTR (art. 15A al.12 et 13 LEn, art 6 al. 3 et art 9 al. 6 LDTR).

Les rénovations ont engendré une forte hausse des loyers les plus bas, sans différence marquée entre les rénovations complètes et partielles (1 ou 2 éléments assainis). A titre d'exemple, les opérations B12 et B13

(rénovation Minergie-P) et l'opération B24 (rénovation partielle) ont enregistré une hausse similaire des loyers (idem pour l'opération B6 de type Minergie et les opérations partielles B7, B15 et B16).

Il ressort aussi que dans les cas B8, B9 et B23 où les loyers avant rénovation dépassaient le seuil LDTR de 3405 CHF/pce/an, les travaux réalisés se sont limités à des travaux de rénovations partielles, avec très peu d'investissement dans les travaux d'amélioration énergétique.

Une forte hausse des loyers induite par des travaux de rénovation partielle (processus de saucissonnage des travaux) ne devrait pas, à notre avis, être permise par le mécanisme actuel de répercussion des coûts. Elle pourrait remettre en cause l'atteinte des objectifs énergétiques fixés par les rénovations par étapes. En effet, la hausse des loyers engendrée dans la première étape de la rénovation risque de saturer le loyer en le rapprochant du seuil LDTR. Cela a pour conséquence de réduire significativement la contribution des locataires à la deuxième étape du projet, rendant ainsi cette étape moins rentable au plan économique et donc plus difficile à réaliser.

Néanmoins, il est rassurant d'observer que dans les cas de rénovations complètes, plus la hausse des loyers est importante, plus importante ont été les économies d'énergies finales effectivement réalisées (cf. graphique de droite, Figure 42). Ce constat ne s'applique malheureusement pas aux rénovations partielles ou de façades.

Sur la base de ces constats, nous pensons qu'il serait important, lors de l'application du mécanisme de répercussion des coûts, de tenir compte du type de rénovation envisagée (rénovation globale, ponctuelle, etc.). Ceci devrait permettre d'éviter le processus d'écrémage qui consiste à plafonner les loyers en réalisant des travaux partiels à faible potentiel d'amélioration énergétique, et de plutôt considérer le potentiel de hausse de loyers comme levier pour déclencher des travaux de rénovation à haute et très haute performance énergétique.

A.9 Autres aspects

Si le recours à divers indicateurs de performance permet d'évaluer la performance énergétique, environnementale et économique des opérations de rénovations, la réussite de ce type de projets dépend de nombreux autres aspects, comme ceux liés à la qualité architecturale et urbanistique des interventions, ainsi que les aspects socio-économiques et organisationnels.

S'agissant des aspects architecture/urbanisme, l'analyse des bâtiments de notre échantillon a permis de mettre en évidence un certain nombre de points qui méritent une attention particulière dans les prochaines rénovations (Weber, 2017). Nous en citons ici quelques-uns.

Prévention de l'unicité de l'enveloppe des grands ensembles résidentiels

Pour assurer la cohésion des interventions dans les grands ensembles résidentiels, en particulier lorsque les allées appartiennent à divers propriétaires, une réflexion en amont du projet et regroupant tous les protagonistes, propriétaires et services de l'Etat est indispensable pour aider à trouver des solutions de rénovations acceptées par tous les acteurs et répondant aux exigences réglementaires.

A titre d'exemple, un groupe de travail a été constitué dans le cadre du projet de rénovation de la Cité du Lignon (opération B26) pour élaborer plusieurs variantes de rénovations (de la plus légère à la plus intensive). Ces variantes acceptées par tous les partenaires de ce projet visent à conserver l'unicité et la qualité de l'enveloppe des bâtiments et à faciliter les démarches administratives aux propriétaires en leur permettant d'obtenir une autorisation accélérée pour rénover (Graf & Marino, 2009). Cette approche n'a pas été retenue par exemple dans le cas du bâtiment B6 (fermeture des balcons en loggia sur 2 allées rénovées), où l'intervention a divisé la façade principale de ce bâtiment composé de 4 allées en deux entités distinctes (Khoury, 2014).

Meilleure connaissance de l'histoire architecturale et constructive du bâtiment

Selon Weber, une meilleure connaissance de l'histoire architecturale et constructive du bâtiment peut faciliter et guider le projet de rénovation et améliorer la lisibilité de l'intervention. Il semble que peu d'architectes tiennent compte de ces aspects lors des rénovations. A titre d'exemple, l'isolation périphérique de l'enveloppe du bâtiment B4, qui a tout son sens au niveau thermique, peut avoir un impact considérable sur l'aspect extérieur de ce bâtiment, entraînant une perte de la qualité des détails de la façade (Figure 43).



Figure 43. Changement radical de la façade entre avant et après rénovation (cas B4)

Celle-ci est due essentiellement aux facteurs suivants, perceptibles par les architectes mais souvent négligées par les ingénieurs thermiciens :

- Diminution de la dimension de vitrages et changement de proportion;
- Remplacement des vitrages à la française par des vitrages oscillants-battants;
- Remplacement des volets par des stores;
- Disparition des encadrements de fenêtres.

De façon générale, une pesée d'intérêt des solutions tenant compte des aspects des coûts, de la réglementation thermique, du confort et de la conservation de la qualité architecturale mériterait d'être menée. A ce propos, des solutions de principe acceptables par les architectes et les ingénieurs (de légères à intensives) en fonction de différentes typologies de façades pourraient aider à guider les partenaires du projet à prendre les bonnes décisions. A ce propos, une première classification de typologie de façade de bâtiments construits dans les années 60-70 et situés au sein de la commune d'Onex (GE) a fait l'objet d'une étude détaillée (Khoury *et al.*, 2015) dans le cadre du projet pilote « Onex-Rénove », initié par la Ville d'Onex et l'Etat de Genève. Ce projet vise à accélérer le rythme des rénovations énergétiques des bâtiments de la Cité nouvelle d'Onex et propose aux maîtres d'ouvrage engagés dans ce processus de bénéficier d'un accompagnement et d'une démarche administrative facilitée pour rénover.

Diminution de la lumière naturelle après rénovation

Lors de plusieurs projets de rénovation énergétique, il est apparu que l'apport de lumière naturelle diminue de manière importante dans les appartements. Cette diminution peut s'expliquer d'une part par une baisse du coefficient moyen de transmission lumineuse des surfaces transparentes (fermeture des balcons en loggias, remplacement des vitrages existants par du triple vitrage, etc.) et d'autre part par la diminution de la surface vitrée (isolation des embrasures, nouveaux cadres plus épais, etc.). La diminution de la lumière naturelle après rénovation - importante pour la santé - pose des problèmes de l'habitabilité et peut engendrer une augmentation de la consommation d'électricité pour l'éclairage des ménages. Les lois sur la construction (LCI) dans les cantons exigent des ouvertures minimales pour assurer l'accès à la lumière naturelle (1/10 à Genève⁹ et 1/8 dans le canton de Vaud), mais ces valeurs devraient être mises à jour et contrôlées par les services de l'Etat (Weber, 2017).

D'autres aspects comme ceux liés à la fermeture des balcons en loggia, ou encore l'intégration d'une ventilation double-flux lors de la rénovation seront discutés dans les parties suivantes du rapport.

⁹ Article 125 du règlement d'application de la loi sur les constructions et les installations diverses.

A.10 Synthèse et conclusions

Ce premier volet de l'étude, qui s'intéresse à la performance réelle des rénovations énergétiques, est fondé sur une analyse comparative d'un ensemble représentatif de grands immeubles d'habitation collectifs construits après-guerre, majoritairement au cours des années soixante, et rénovés depuis 2005 à Genève (rénovation globale ou par étapes de l'enveloppe thermique, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques). Au total, l'échantillon est composé de 26 opérations, regroupant plus de 3'000 logements et totalisant une surface de référence énergétique d'environ 285'000 m². Avant rénovation, ces bâtiments étaient entièrement dépendant des énergies fossiles et consommaient en moyenne pour le chauffage et l'ECS (Ehww) plus de 600 MJ/m² par an.

Ces opérations de rénovation se répartissent comme suit :

- 11 rénovations énergétiques « complète ou quasi-complète » (portant sur au moins 3 éléments de l'enveloppe thermique, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques) ;
- 14 rénovations énergétiques « ponctuelle ou partielle » de l'enveloppe thermique (portant sur un seul ou deux éléments de la façade, avec ou sans la rénovation des systèmes techniques) ;
- 1 rénovation qui se limite à des travaux d'entretien de l'enveloppe, avec remplacement du système technique.

Performances réelles des rénovations

L'évolution de la performance réelle énergétique et environnementale des bâtiments avant et après rénovation a été évaluée à l'aide d'un ensemble d'indicateurs de performance. L'analyse a porté sur les 22 opérations de rénovation réalisées. Les résultats montrent que :

- L'énergie finale pour le chauffage et l'ECS est passée en moyenne de 644 à 465 MJ/m², soit une baisse moyenne de 179 MJ/m² (économies relatives de 29% en moyenne, tous types de travaux confondus) ;
- L'intensité en carbone des agents énergétiques est passé de 260 à 200 gCO₂éq/kWh ;
- Les émissions annuelles de carbone liées à l'exploitation ont baissé en moyenne de 46 à 27 kg CO₂/m². Les émissions évitées sont en moyenne de 19 kg CO₂/m² (baisse relative de 41%, tous types de travaux confondus) ;
- La consommation électrique totale des bâtiments a baissé en moyenne de 6.3% entre avant et après travaux, passant de 36.5 à 34.3 kWh/m². Cette baisse s'inscrit dans la tendance générale observée au niveau cantonal.

Ces résultats sont ensuite comparés à la performance moyenne du parc résidentiel collectif genevois et aux objectifs de réduction à l'horizon 2035 et 2050 du secteur résidentiel suisse selon le scénario NPE de la Stratégie énergétique 2050. Il ressort de cette analyse que seules les rénovations à très haute performance énergétique (Minergie-P) se rapprochent aujourd'hui des objectifs fixés, nécessitant à la fois de moins et mieux consommer.

Ecarts de performance énergétique

La performance énergétique des rénovations évaluée en conditions réelles d'utilisation et d'exploitation a été ensuite comparée avec la performance prévue des projets, calculée en conditions standard d'utilisation selon la norme SIA 380/1. Afin de caractériser l'écart de performance des rénovations énergétiques, nous nous sommes en un premier temps concentré sur les 10 opérations faisant l'objet d'un justificatif thermique par performance globale, sans création de surfaces habitables supplémentaires (surélévation), pour lesquelles des relevés de consommation étaient disponibles sur une moyenne sur 3 ans, avant et après rénovation.

Avant rénovation, la demande réelle de chauffage (Q_h) de ces bâtiments variait entre 708 et 332 MJ/m². Par comparaison avec la valeur annoncée dans les justificatifs thermiques, l'économie de chauffage prévue/théorique liée à la rénovation varie entre 140 et 560 MJ/m². Cependant, dans la réalité la part réalisée de cette économie n'atteint, selon les cas, que 29% à 65% de l'objectif, mettant en lumière un important écart de performance.

En fait, il ressort de cette analyse que plus l'économie théorique est importante, plus la part effectivement réalisée de cette économie est élevée. Ainsi, en visant des économies théoriques de l'ordre de 550 MJ/m², les économies réalisées s'élèvent à près de 365 MJ/m², soit une part mobilisée d'environ 65%. Cette part baisse à 35% en visant des économies théoriques de l'ordre de 200 MJ/m² (observées dans les cas de rénovations partielles, souvent réalisées sans réglage des installations de chauffage).

Par ailleurs, il existe pour cet échantillon une relation statistiquement assez robuste entre les économies de chauffage théoriques et réalisées. A condition d'être corroborée par des exemples supplémentaires, cette relation peut être vue comme une signature des pratiques de rénovation actuelle, incluant l'ensemble du processus de rénovation, depuis l'étape de conception (choix des solutions d'amélioration énergétique et usage des logiciels de simulation), jusqu'à l'usage des bâtiments par les occupants et les gestionnaires de l'énergie.

On déduit de cette signature que si l'on généralisait les pratiques actuelles de rénovation à l'ensemble du parc genevois de bâtiments résidentiels collectifs d'après-guerre, à peine la moitié (42%) du potentiel théorique d'économie de chauffage de ces bâtiments pourrait être atteinte en réalité. Des résultats similaires (46% et 48%) ont été obtenus respectivement en appliquant cette relation à l'ensemble du parc résidentiel suisse et à la totalité du parc immobilier national (toutes catégories confondues).

Facteurs explicatifs de l'écart de performance

Afin de mieux comprendre les raisons de l'écart de performance observé plus haut, nous avons analysé l'effet de l'utilisation des valeurs standards de la norme SIA 380/1 dans le calcul des besoins de chauffage théoriques, par rapport aux valeurs moyennes réelles observées sur l'échantillon. En complément, la sensibilité aux possibles erreurs d'estimation ou d'entrée dans les simulations (choix de la météo, type de régulation, facteur d'ombrage et incertitude sur le calcul de la surface énergétique) a été étudiée. Enfin, d'autres facteurs pouvant influencer la performance énergétique durant la phase de réalisation des travaux et d'exploitation du bâtiment sont discutés.

En un premier temps, l'analyse de sensibilité aux divers paramètres de calcul est effectuée sur 20 opérations de notre échantillon, en utilisant les données constructives figurant dans les dossiers de demande d'autorisation. Sur les 10 paramètres analysés, il s'avère que les deux paramètres les plus déterminants pour l'écart entre demande de chauffage normée et réelle sont la température intérieure et le débit d'air neuf :

- La température intérieure moyenne de 23°C (mesurée avec un pas de temps horaire durant toute la période de chauffage dans six bâtiments rénovés) dépasse largement la valeur standard de 20°C. En moyenne, cela entraîne une augmentation de la demande de chauffage de plus de 30% (soit 11% par degré supplémentaire).
- De même, les débits d'air neuf directs mesurés à l'extraction de la ventilation mécanique s'élèvent en moyenne à 1 m³/m².h durant la période de chauffage (sans considérer la récupération de chaleur, dans les cas où elle existe), et à 1.5 m³/m².h si l'on considère le débit d'air indirect résultant des ouvertures des fenêtres (valeur estimée par les experts), soit largement plus que la valeur standard de 0.7 m³/m².h de la norme SIA 380/1. En moyenne, de telles hausses de débit entraînent une hausse de la demande de chauffage de 25 à 70 MJ/m² (soit une hausse de 17 MJ/m² par 0.2 m³/m².h).

En deuxième temps, nous combinons la variation de ces paramètres, afin de décomposer l'écart de performance caractérisé plus haut. Cette analyse est faite pour 4 des 10 opérations de rénovation analysées, qui représentent bien la dispersion d'économies théoriques observées.

Il résulte de ces simulations que le passage du scénario de référence (20°C , $0.7 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$) à des scénarios en usage réel ($23\text{-}24^{\circ}\text{C}$, $1.3\text{-}1.5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$) permet dans chaque cas d'expliquer l'écart de performance. Ce dernier peut finalement être divisé en deux parties :

- Une Assistance à la Maîtrise d'Ouvrage énergie (AMOen) lors de la phase de conception et de réalisation des travaux, qui permet une économie réelle sur la demande de chauffage supérieure à ce qui est observé dans les autres cas.
- Une Assistance à la Maîtrise d'Usage (AMU) visant à accompagner les locataires durant la phase d'exploitation, accompagnée d'une phase d'optimisation et de suivi énergétique après rénovation, qui permet de réduire encore la demande de chauffage et donc l'écart de performance.

Bonnes pratiques et recommandations

Nous explorons alors, sur la base de deux exemples de rénovation HPE (Minergie) et THPE (Minergie-P), la possibilité de réduire concrètement l'écart de performance observé, grâce à une attention particulière lors de la phase de réalisation, ainsi qu'une série de mesures d'optimisation de la gestion énergétique une fois les bâtiments rénovés. Dans les deux cas, on observe une importante réduction de l'écart de performance, par rapport à celui observé dans les 10 opérations de référence étudiées plus haut. Cette réduction se décompose en deux parties :

- Une approche par rénovation globale visant un haut standard énergétique, avec une attention particulière lors de l'exécution des travaux, qui permet une économie réelle sur la demande de chauffage supérieure à ce qui est observé dans les autres cas.
- Une phase d'optimisation et de suivi énergétique après rénovation, qui permet de réduire encore la demande de chauffage et donc l'écart de performance.

Grâce aux mesures d'optimisation, la part effectivement réalisée du potentiel d'économie théorique passe ainsi dans les deux cas d'environ 65% à 80%. Le solde est principalement dû aux valeurs optimistes de la norme SIA pour calculer les économies théoriques, en particulier une température des logements à 20°C , au lieu des 21.5°C qui semblent acceptables par les locataires.

Finalement, nous proposons une série de recommandations visant à réduire l'écart de performance et à éviter les ruptures dans la chaîne de responsabilité tout au long du processus de rénovation. Ces recommandations ont été recueillies auprès de divers acteurs professionnels et académiques. Elles ont été complétées par des recommandations décrites dans diverses études sur le sujet. Ces recommandations sont regroupées selon les différentes phases du projet, à savoir l'état des lieux, la conception, la réalisation, conclue par la mise en service, et l'exploitation.

Coûts des travaux

L'analyse de la performance économique concerne l'ensemble de l'échantillon. Elle se base sur les coûts détaillés des travaux figurant dans les dossiers d'autorisation. Hors subventions, le coût global (TTC) des opérations de rénovation s'élève en moyenne à 877 CHF/m^2 (SRE).

En moyenne, le coût par type de rénovation est comme suit :

- 1330 CHF/m^2 pour les rénovations complètes
- 700 CHF/m^2 pour les rénovations partielles
- 240 CHF/m^2 pour les travaux de réfection uniquement.

Le coût des travaux portant sur les installations techniques, les façades et les toitures représente en moyenne la moitié du coût total (437 sur 877 CHF/m²). A noter que la fourchette des coûts observés entre les différentes opérations est relativement large et dépend principalement de la nature des travaux réalisés.

Les coûts des rénovations ont été ensuite répartis par type de travaux : travaux à plus-value énergétique, travaux à plus-value non énergétique et travaux d'entretien. Nous avons pour cela utilisé une méthode de répartition des coûts qui combine à la fois une approche normée (utilisation du standard CRB) et de pratiques de répartition appliquées par l'Etat (OCLPF) lors de la répercussion des coûts des travaux sur les loyers. On observe que :

- Les travaux d'amélioration énergétique représentent en moyenne 20% du coût global. Cette part baisse à 16% pour les rénovations partielles (1 ou 2 éléments de l'enveloppe assainis) et s'élève à 24% pour les rénovations complètes (≥ 3 éléments). La part restante se répartit entre travaux à plus-value non énergétique (70%) et travaux d'entretien (30%).
- La fourchette des coûts à plus-value énergétique est assez large (de 24 à 834 CHF/m², selon les opérations), ce qui montre bien l'hétérogénéité des travaux réalisés. Près de la moitié de ces bâtiments ont investi entre 100 et 300 CHF/m² pour ce type de travaux.

Coûts de la performance énergétique et environnementale

En un premier temps, le coût des travaux énergétiques est comparé avec le niveau de performance énergétique après travaux. Sur la base de l'échantillon analysé, on observe que :

- Les rénovations complètes ou quasi complètes affichent des besoins normés de chauffage et des consommations thermiques moindres, mais elles coûtent davantage que les rénovations partielles.
- Il existe bien une relation entre le coût des travaux énergétiques et les besoins normés de chauffage après travaux, qui semble être confirmée également pour les consommations réelles de chauffage et d'ECS après travaux. Néanmoins, on ne peut pas affirmer avec certitude qu'il existe une relation bien établie avec les économies de chauffage théoriques ou réalisées.
- Le surcoût entre les rénovations à haute performance énergétique (Minergie) et celles à très haute performance énergétique (Minergie-P) est en moyenne de 100 CHF/m² environ, pour des économies d'énergies réelles comprises entre 50 et 100 MJ/m². Ce constat mérite d'être mis en perspective avec les économies engendrées par le suivi et l'optimisation énergétique des bâtiments après travaux (économies de près de 100 MJ/m² à des coûts bien moindres).

En un deuxième temps, nous analysons le coût du kWh économisé ainsi que celui de la tonne de CO₂ évitée par les opérations de rénovation (effets de l'amélioration de l'efficacité de l'enveloppe et des installations techniques et du changement de l'agent énergétique). Les résultats montrent que :

- Sur l'ensemble de l'échantillon, le coût brut du kWh d'énergie finale réellement économisée se situe dans une fourchette allant de 9 à 26 ct/kWh.
- Pour les 3 rénovations à haute performance énergétique – Minergie, le coût brut du kWh d'énergie finale économisée se situe dans une fourchette de 11 à 22 ct/kWh. Après déduction de l'énergie économisée et de la taxe carbone évitée (aux coûts 2016), il reste un surcoût nul ou de quelques centimes par kWh. Ceci devrait se réduire ou même s'inverser avec l'augmentation de la taxe carbone et/ou une augmentation du coût des combustibles.
- Pour les 2 rénovations à très haute performance énergétique – Minergie-P, le coût brut du kWh d'énergie finale économisée s'élève à 25 ct/kWh. Après déduction de l'énergie économisée et de la taxe carbone évitée (aux coûts 2016), il reste un surcoût d'une dizaine de centimes par kWh par rapport aux combustibles fossiles. Il est à souligner que le coût brut de l'énergie économisée est proche du coût actuel de la chaleur renouvelable offerte sur le marché genevois. Un doublement du prix de l'énergie ou une augmentation de la taxe carbone à environ 300 CHF/tonne ou bien encore une composition des deux rendrait le coût du négo kWh économiquement compétitif.
- Les conclusions sont similaires pour le coût de la tonne de CO₂ évitée.

Sur la base de l'échantillon à disposition, et avec la méthode de décomposition des coûts à plus-value énergétique pratiquée par l'Etat de Genève, on en conclut qu'avec le prix actuel de l'énergie et dans le contexte règlementaire en vigueur, les opérations rénovation Minergie sont proche de la rentabilité, alors qu'un effort supplémentaire doit être consenti pour assurer la rentabilité des rénovations Minergie-P. Par ailleurs, le suivi et l'optimisation énergétique des installations techniques après la fin des travaux de rénovation devraient permettre d'accroître l'efficacité des opérations, d'augmenter les économies d'énergie effectivement réalisées et de diminuer le coût de la tonne de CO₂ évitée, pour le même montant investi dans les travaux énergétiques.

Incidence sur les loyers

La quasi-majorité des rénovations analysées ont engendré après travaux une hausse des loyers pour les locataires. La hausse moyenne des loyers est comprise entre 95 et 956 CHF/pce/an. Elle peut résulter de la répercussion de la hausse admissible par les travaux à plus-value énergétique et non énergétique, à laquelle peut s'ajouter la Baisse Prévisible des Charges et une contribution énergétique du locataire à hauteur de 120 CHF/pce/an. Cette augmentation dépend également du loyer initial et du plafond LDTR qui se situe aujourd'hui à 3405 CHF/pce/an. Il ressort de notre analyse les points clés suivants :

- Dans les cas où les loyers avant rénovation dépassaient le seuil LDTR, les travaux réalisés se sont limités à des travaux de rénovations partielles, avec très peu d'investissement dans les travaux d'amélioration énergétique.
- Les rénovations ont engendré une forte hausse des loyers les plus bas, sans différence marquée entre les rénovations complètes et partielles.
- Dans les cas de rénovations complètes, plus la hausse des loyers a été importante, plus ont été importantes les économies d'énergies finales effectivement réalisées.

Sur la base de ces constats, nous pensons qu'il serait important, lors de l'application du mécanisme de répercussion des coûts, de tenir compte dorénavant du type de rénovation envisagée (réovation globale, façade, ponctuelle, etc.). A notre avis, une forte hausse des loyers induite par des travaux de rénovation partielle (processus de saucissonnage des travaux) ne devrait pas être permise. Il convient en fait de considérer le potentiel de hausse de loyers comme un levier pour déclencher des travaux de rénovation à haute et très haute performance énergétique et d'éviter autant que possible le processus d'écrémage appliqué par certains acteurs qui consiste à plafonner les loyers en réalisant des travaux partiels à faible potentiel d'amélioration énergétique.

Autres aspects

Si le recours à divers indicateurs de performance permet d'évaluer la performance énergétique, environnementale et économique des opérations de rénovations, la réussite de ce type de projets dépend de nombreux autres aspects, comme ceux liés à la qualité architecturale et urbanistique des interventions, ainsi que les aspects socio-économiques et organisationnels.

A cet égard, une pesée d'intérêt des solutions tenant compte des aspects de coût, des réglementations thermiques et de la conservation de la qualité architecturale et urbanistique mériterait d'être menée. A ce propos, des solutions de principe acceptables par les architectes et les ingénieurs (de légères à intensives) en fonction de différentes typologies de façades pourraient aider à guider les partenaires du projet à prendre les bonnes décisions. Un catalogue d'expérience réussies et de bonnes pratiques de la rénovation devrait permettre d'accélérer le processus d'apprentissage des différents acteurs, et conduira, espérons-le, à des rénovations plus performantes. A ce propos, une première classification de typologie de façade de bâtiments construits dans les années 60-70 et situés au sein de la commune d'Onex (GE) a fait l'objet d'une étude détaillée dans le cadre du projet pilote Onex-Rénove.

PARTIE B1 : Evaluation des performances intrinsèques du système « loggia » en hiver

B1.1 Introduction

Lors de travaux d'assainissement énergétique de l'enveloppe, l'isolation par l'extérieur est en principe la solution à privilégier d'un point de vue énergétique. Elle permet d'assurer une haute performance et d'éviter les ponts thermiques linéaires au niveau des jonctions dalle/mur façade. Cependant, la question se pose toujours de savoir pour quelle solution opter au niveau des dalles des balcons. Or la typologie des façades des immeubles d'habitation d'après-guerre se caractérise souvent par des grandes ouvertures vitrées et des balcons qui se développent sur une partie ou sur l'ensemble des élévations. Ceci est particulièrement vrai dans l'échantillon de bâtiments sélectionnés dans le volet A.

Au niveau de l'isolation thermique des balcons, plusieurs solutions sont en principe possibles, chacune avec des avantages et des inconvénients, que ce soit d'un point de vue énergétique, économique ou de mise en œuvre :

- Isolation par l'extérieur : L'inconvénient de cette solution réside dans le fait que l'isolation est interrompue à chaque niveau par les balcons. La présence de ponts thermiques dégrade la performance de l'enveloppe et peut générer un risque de condensation en face intérieure. Il existe 2 mesures pour y remédier à savoir : soit emballer l'ensemble du balcon (mise en œuvre difficile), soit scier les balcons existants avec possibilité d'ajouter de nouveaux balcons désolidarisés des façades existantes (sur des grands immeubles, solution difficilement réalisable d'un point de vue technique et économiquement non viable).
- Transformation des balcons en loggia froide ou chaude : Pour éviter la première variante, les concepteurs ont tendance à proposer de fermer les balcons par du vitrage en créant un espace supplémentaire appelé loggia ou balcons vitrés. On distingue les loggias froides des loggias chaudes de par la position de l'enveloppe thermique (SIA 416/1/2.2.1.3); selon que la surface qui présente le plus petit coefficient de déperdition thermique (U) se trouve au niveau de la paroi intérieure (interface appartement/loggia, cas d'une loggia froide) ou extérieure (interface loggia/extérieur, cas d'une loggia chaude).

En principe, le fonctionnement d'une loggia consiste d'une part à capter l'énergie solaire passive transmise par rayonnement et à la transférer vers le logement, d'autre part à minimiser les pertes thermiques des espaces chauffés par la création d'une zone tampon. Dans la pratique, l'ouverture des portes fenêtres intérieures ou des fenêtres extérieures des balcons vitrés peut considérablement modifier la performance de telles loggias, avec cependant une différence marquée entre loggias chaude et froide.

Le but de ce volet est de comparer les solutions de loggia chaude et froide, d'une part en termes de fonctionnement et performance intrinsèque, d'autre part en termes d'utilisation faite par les habitants. Nous nous baserons pour cela sur deux études de cas de bâtiments résidentiels collectifs d'après-guerre, analysées dans le volet A, et ayant récemment fait l'objet d'une rénovation thermique complète de l'enveloppe et du système de production de chaleur, avec à la clé la création de loggias.

B1.2 Etudes de cas

Dans cette section nous présentons brièvement les 2 études de cas qui serviront de base à l'étude des loggias (Figure 44) :

- Etude de cas « Gros-Chêne » : rénovation Minergie (opération B6 du volet A)
- Etude de cas « La Cigale » : rénovation Minergie-P (opération B12-13 du volet A)

Les caractéristiques principales des bâtiments et de leur rénovation (au niveau de l'enveloppe et du système de production de chaleur), ainsi que le bilan énergétique (demande et production) sur une année complète de mesure seront présentées ci-après. La caractérisation des loggias froides et chaudes sera faite dans la section suivante B1.3.

Loggia froide (Gros-Chêne)



Loggia chaude (La Cigale)



Figure 44. Exemples de rénovation avec loggias froide (Gros-Chêne) et chaudes (La Cigale).

Note : les résultats concernant l'étude de cas Gros-Chêne sont repris pour l'essentiel de travaux antérieurs, référencés dans le texte.

B1.2.1 Loggia froide : étude de cas « Gros-Chêne » (B6)

Bâtiment et rénovation

Cette étude de cas concerne la rénovation d'un bâtiment résidentiel situé à l'avenue du Gros Chêne à Onex. Les caractéristiques principales du bâtiment sont données ci-dessous :

- Année de construction : 1963 ; année de rénovation : 2008.
- Surface de Référence Energétique (SRE) : 5'357 m².
- 2 allées, 63 logements, 134 habitants.
- Type de rénovation : Minergie.

Au niveau énergétique, la rénovation a porté sur les éléments suivants :

- Enveloppe : fermeture des balcons en loggias froides sur toute la largeur des deux façades principales du bâtiment, remplacement des simples vitrages par des doubles vitrages, isolation de la toiture et du plancher ainsi que des murs pignons et du rez-de-chaussée.
- Ventilation : mise en place d'une ventilation double-flux (VDF) avec pompe à chaleur intégrée (PAC), permettant de remonter la température de l'air pulsé au-dessus de 20°C après passage dans la VDF.
- Production de chaleur : remplacement de la chaudière à mazout par le raccordement au chauffage à distance lié à l'usine d'incinération d'ordures ménagères (CADIOM), installation solaire (100 m² de capteurs) pour la production d'ECS.

Bilan thermique

Cette rénovation a fait l'objet d'un suivi énergétique détaillé (Khoury 2014), dont nous résumons ici les résultats principaux. Le bilan, qui couvre la période du 1/10/2008 au 30/9/2010 (Figure 45), est ramené à une contrainte climatique de 2'507 degré-jours en base 18/12°C (moyenne observée à Genève sur la période 1992-2010). On observe que :

- La demande annuelle de chaleur (107 kWh/m²) provient pour 32% des besoins bruts d'ECS (34 kWh/m², au niveau de la charge du boiler) et pour 68% des besoins nets de chauffage (73 kWh/m², auxquels s'ajoutent 23 kWh/m² couverts par la récupération de chaleur double-flux + PAC).
- Cette demande est couverte pour la plus grande partie par le chauffage à distance (95 kWh/m², 89%), le complément étant fourni par le solaire thermique (12 kWh/m², 11%).
- S'ajoute à cela l'électricité absorbée par la PAC (1.4 kWh/m²), la ventilation double-flux (0.8 kWh/m²) et le solaire thermique (0.1 kWh/m²).

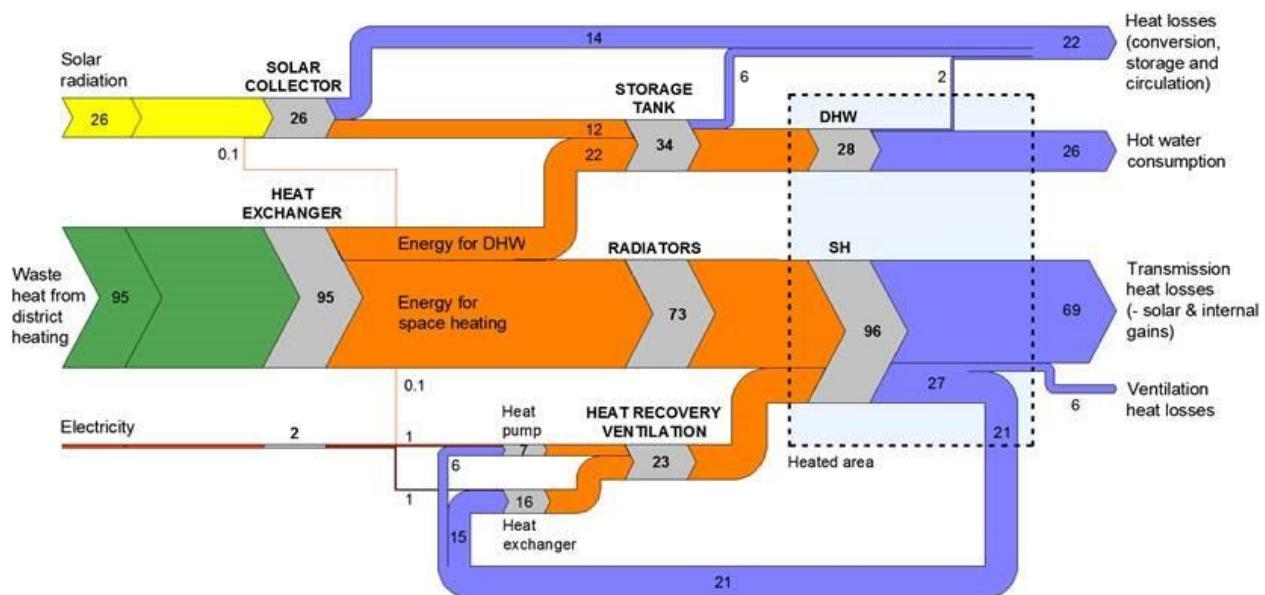


Figure 45. Flux de chaleur annuels (kWh/m².an, avec correction climatique), bâtiment Gros-Chêne, octobre 2008 – septembre 2010 (Source : Khouri et al. 2014).

B1.2.2 Loggia chaude : étude de cas « La Cigale » (B12-13)

Bâtiment et rénovation

Cette étude de cas concerne la rénovation d'un bâtiment résidentiel situé au croisement de la rue de Vermont et de la rue du Vidollet, à Genève. Les caractéristiques principales du bâtiment sont données ci-dessous :

- Année de construction : 1952 ; année de rénovation : 2014.
- Surface de Référence Energétique (SRE) : 19'000 m².
- 2 barres d'immeubles, 13 allées, 273 logements, 458 habitants.
- Type de rénovation : Minergie-P.

Au niveau énergétique, la rénovation a porté sur les éléments suivants :

- Enveloppe : Utilisation d'éléments de façade et de toiture préfabriqués, permettant une isolation extérieure de qualité, avec des interventions de courte durée ; Fermeture des balcons en loggias chaudes, limitant les ponts thermiques, favorisant les gains solaires passifs et offrant un espace tampon utilisable à différentes saisons.
- Ventilation : Mise en place d'une installation de ventilation double flux dans chaque allée.
- Production de chaleur : assurée principalement par une toiture solaire (capteurs solaires non-vitrés, faisant également office de couverture des pans de toiture orientés au sud-est et sud-ouest), couplée à une série de pompes à chaleur (PAC), par l'intermédiaire d'un stock à changement de phase (eau/glace).

Bilan thermique

Cette rénovation a fait l'objet d'un suivi énergétique détaillé (Hollmuller et al., 2017), dont nous résumons ici les résultats principaux. Le bilan couvre la période du 1/6/2015 au 31/5/2016 (Figure 46), caractérisée par une contrainte climatique de 2474 degré-jours en base 20/12°C (3414 degré-jours effectifs, avec une température intérieure en période de chauffage de 22.8°C).

On observe que :

- La demande annuelle de chaleur (66.3 kWh/m^2) provient pour 51% des besoins bruts d'ECS (33.8 kWh/m^2 , au niveau de la charge du boîtier) et pour 49% des besoins nets de chauffage (32.5 kWh/m^2 , auxquels s'ajoutent 17.2 kWh/m^2 couverts par la récupération de chaleur double-flux).
- La production de chaleur (67.3 kWh/m^2) est couverte pour la plus grande partie par le solaire indirect et la PAC (53.6 kWh/m^2 , 78%), suivie du solaire direct (9.5 kWh/m^2 , 14%) et de la chaudière à gaz (5.2 kWh/m^2 , 8%).
- A l'électricité absorbée par la PAC (16.5 kWh/m^2) s'ajoute celle des pompes de circulation (2.4 kWh/m^2 , dont 58% pour la PAC, 4% pour le solaire direct, 4% pour la chaudière, et 33% pour la distribution d'ECS et de chauffage).

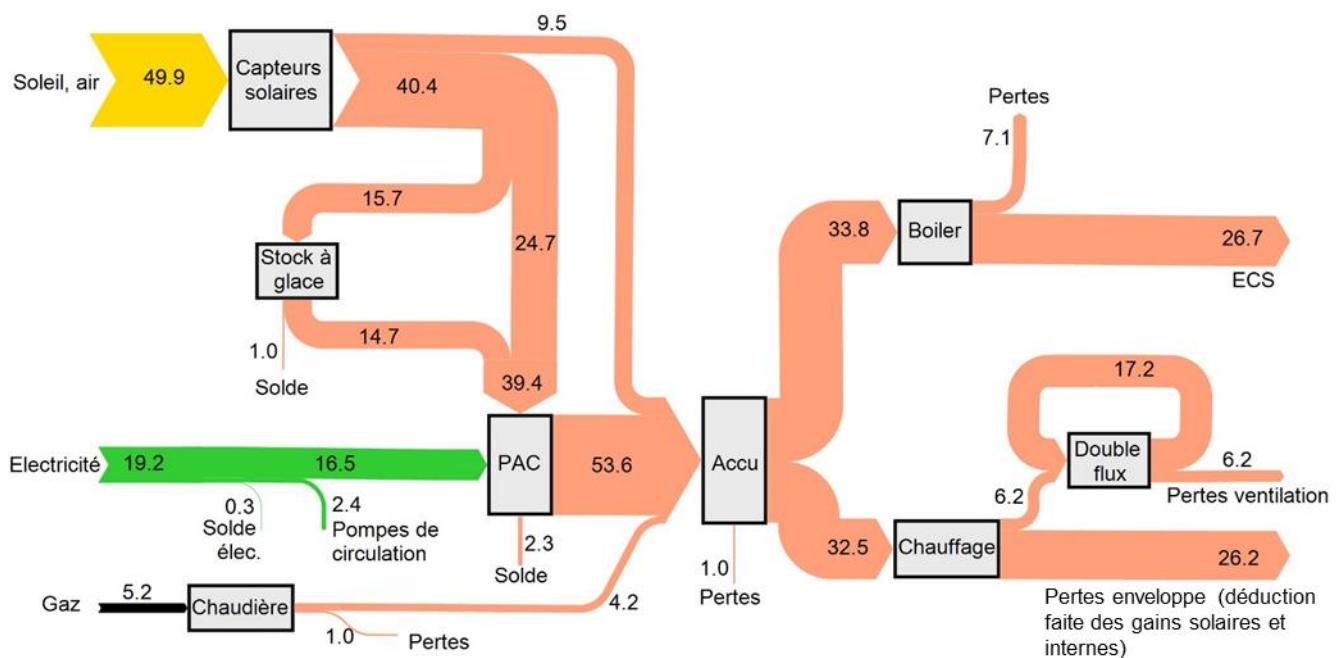


Figure 46. Flux de chaleur annuels ($\text{kWh/m}^2.\text{an}$, sans correction climatique), bâtiment La Cigale, juin 2015 – mai 2016 (Source : Hollmuller & al. 2017).

B1.3 Caractérisation des loggias

B1.3.1 Caractérisation des loggias froides (« Gros-Chêne »)

Dans le cas de Gros-Chêne, la solution retenue pour la fermeture des balcons a été la suivante :

- Paroi interne (interface logement/loggia) : Remplacement des verres simples des ouvertures donnant sur les balcons par des verres isolants doubles avec conservation des cadres en bois existants.
- Paroi externe (interface loggia/extérieur) : Fermeture des balcons par des vitrages coulissants en verre simple, fixés sur les parapets des balcons. Les garde-corps métalliques des balcons qui longent toute la largeur du bâtiment ont été remplacés par des garde-corps vitrés en verre feuilleté. Les parties pleines n'ont pas été isolées.
- Occultation : Mise en place de stores en toile avec manœuvre manuelle, contre la face intérieure des vitrages coulissants des balcons.

Ces loggias représentent 85% des façades du bâtiment.

Les vitrages et principaux éléments opaques ont fait l'objet de mesures in-situ de valeurs U (Khoury, 2014). En tenant compte de la composition et l'emprise des divers éléments, et en ramenant les déperditions de chaleur au niveau du plan de la façade, les valeurs U (ou résistances R) sont les suivantes :

- Paroi interne : $U=1.81 \text{ W/K.m}^2$ ($R=0.55 \text{ K.m}^2/\text{W}$)
- Paroi externe : $U=4.21 \text{ W/K.m}^2$ ($R=0.24 \text{ K.m}^2/\text{W}$)
- Loggia (double paroi) : $U=1.26 \text{ W/K.m}^2$ ($R=0.79 \text{ K.m}^2/\text{W}$)

La paroi interne représentant 70% de la résistance thermique, il s'agit dans ce cas de « loggias froides ». Ceci est visible sur la Figure 47, où l'on voit l'évolution des températures mensuelle médiane de la pièce adjacente à la loggia, de la loggia et de l'air extérieur, mesurées avec un pas de 10 min sur deux loggias orientées sud-ouest. Pour une température extérieure de 0°C, les loggias sont en médiane à 10°C, alors que les logements sont aux alentours de 24°C. Ainsi, la chute de température entre logement et loggia s'élève à environ 60% du différentiel entre logement et extérieur, soit un peu moins que les 70% attendus par analyse des valeurs U. Cette différence pourrait notamment provenir de l'usage que font les habitants des loggias (ouverture partielle des portes fenêtres intérieure, voir analyse plus bas). L'effet de gains solaires stockés directement dans la loggia semble quant à lui relativement secondaire, ainsi qu'en atteste une comparaison avec deux autres loggias orientées nord-est (Khoury, 2014).

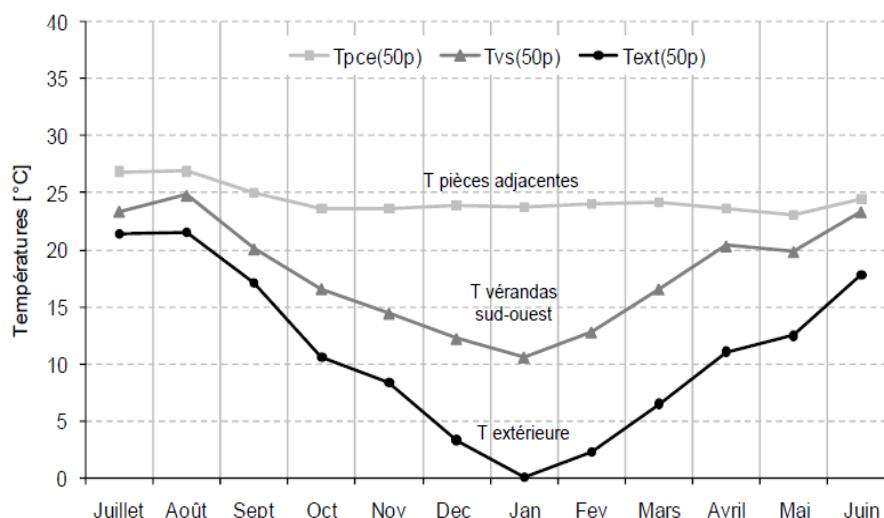


Figure 47. Température mensuelle médiane de deux loggias sud-ouest (Tvs), des pièces adjacentes (Tpce) et de l'air extérieur (Text). Bâtiment Gros-Chêne, juillet 2009 - juin 2010 (Source : Khoury 2014).

B1.3.2 Caractérisation des loggias chaudes (« La Cigale »)

Dans le cas de La Cigale, la solution retenue pour la fermeture des balcons a été la suivante :

- Paroi interne (interface logement/loggia) : Les fenêtres en double vitrages rénovées en 2000 ont été maintenues. Les parties opaques n'ont pas été isolées.
- Paroi externe (interface loggia/extérieur) : Les balcons ont été fermés à l'aide de panneaux préfabriqués pour supprimer les ponts thermiques. Ces panneaux sont en ossature bois d'une épaisseur de 30 cm avec une isolation en laine de roche (22 cm pour les joues, 27 cm pour les faces) et sont revêtus d'une tôle en aluminium. Les fenêtres sont en triple vitrage avec cadres en aluminium. Elles sont rétractables dans le but de permettre un usage polyvalent de cet espace en toutes saisons (balcon en été et loggia en hiver). Ces panneaux préfabriqués sont posés sur la façade existante à l'aide d'un système d'accrochage spécifique permettant de supporter le poids des panneaux.
- Occultation : La protection solaire est assurée par des stores à lamelles intégrées dans la paroi extérieure.

Les loggias (éléments opaques et transparents) représentent respectivement 68% et 71% des façades des bâtiments Vermont et Vidollet (Khimda, 2017).

Les vitrages et principaux éléments opaques ont fait l'objet de mesures in-situ de valeurs U. En tenant compte de la composition et l'emprise des divers éléments, et en ramenant les déperditions de chaleur au niveau du plan de la façade, les valeurs U (ou résistances R) sont les suivantes :

- Paroi interne : $U=1.51 \text{ W/K.m}^2$ ($R=0.66 \text{ K.m}^2/\text{W}$)
- Paroi externe : $U=0.61 \text{ W/K.m}^2$ ($R=1.64 \text{ K.m}^2/\text{W}$)
- Loggia (double paroi) : $U=0.43 \text{ W/K.m}^2$ ($R=2.30 \text{ K.m}^2/\text{W}$)

La paroi interne représente cette fois-ci 29% de la résistance thermique, il s'agit dans ce cas de « loggias chaudes ». Ceci est visible sur la Figure 48, où l'on voit l'évolution des températures journalières de la pièce adjacente à la loggia, de la loggia et de l'air extérieur, pour une loggia orientée sud-est.

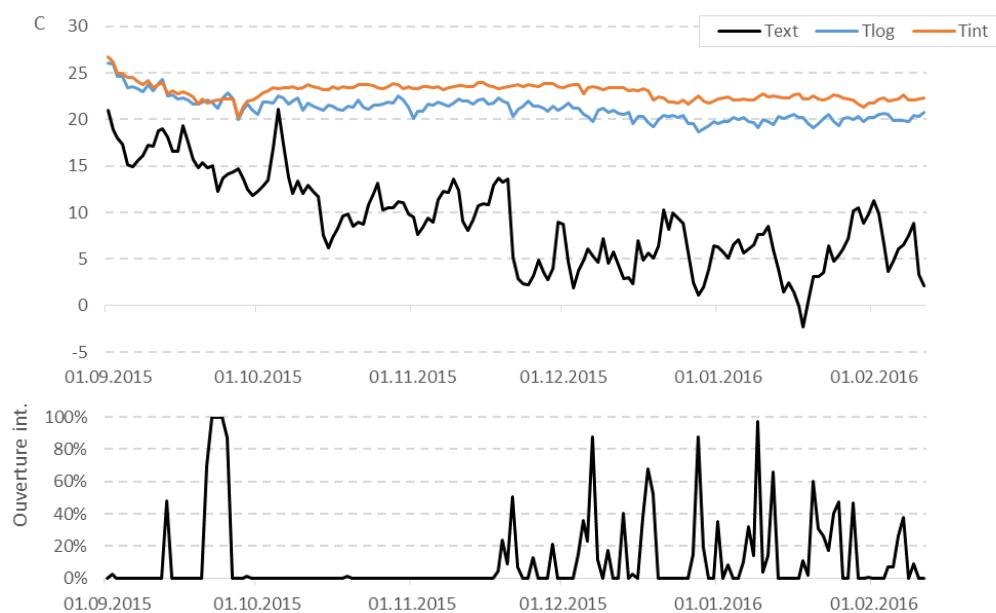


Figure 48. Haut : Température journalière d'une loggia sud-est (Tlog), de la pièce adjacente (Tint) et de l'air extérieur (Text). Bas : Durée journalière d'ouverture de la porte fenêtre intérieure. Bâtiment La Cigale, septembre 2015 – février 2016.

Pour une température externe de 0°C, les loggias sont aux alentours de 17°C, alors que la pièce adjacente est aux alentours de 22°C. La chute de température entre logement et loggia s'élève alors à 20% du

différentiel entre logement et extérieur, à nouveau un peu moins que les 29% attendus par analyse des valeurs U. Comme dans le cas du bâtiment Gros-Chêne, cette différence pourrait provenir de l'usage que font les habitants des loggias (ouverture partielle des portes fenêtres intérieure). A nouveau, l'effet de gains solaires stockés directement dans la loggia semble relativement secondaire, ainsi qu'en atteste une comparaison avec une autre loggia, orientées nord-ouest.

B1.4 Usage et performance des loggias en conditions réelles d'utilisation

B1.4.1 Effet de l'ouverture des fenêtres

Pour l'une et l'autre des études de cas, l'effet de l'ouverture des portes-fenêtres (paroi interne) ou des fenêtres (paroi externe) sur la valeur U de la loggia est illustré sur la Figure 49.

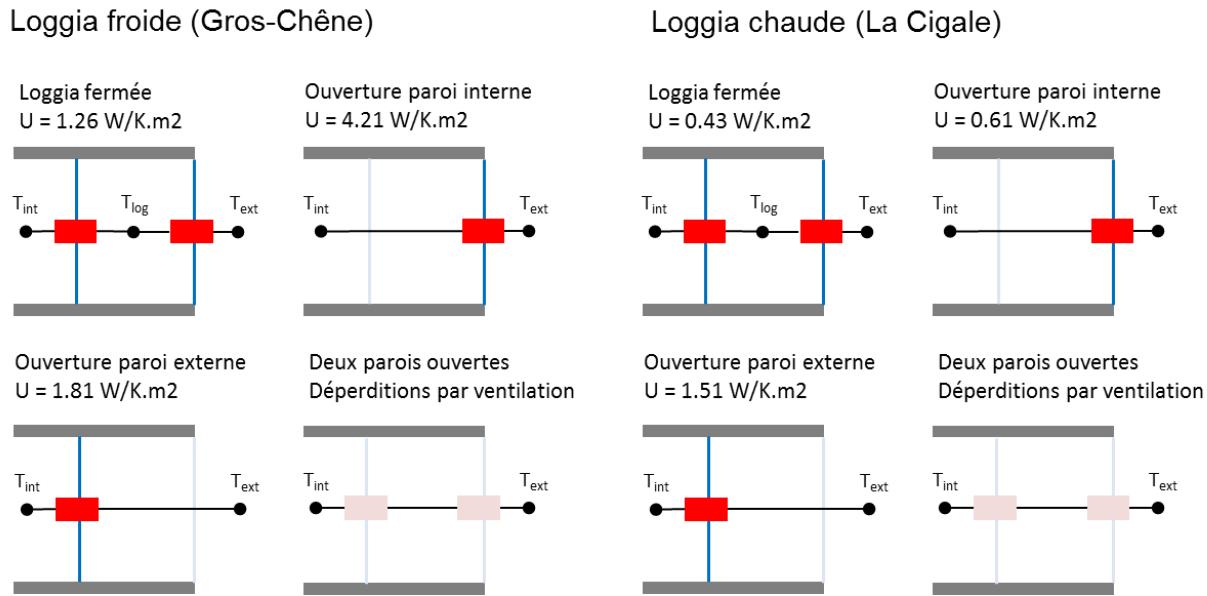


Figure 49. Effet de l'ouverture des fenêtres sur les valeurs U des loggias.

Dans le cas de la loggia froide (Gros-Chêne), l'ouverture des portes fenêtres a pour effet de multiplier les déperditions thermiques de la loggia par un facteur 3.3 (valeur U de 4.21 au lieu de 1.26 W/K.m²). Ce point est d'autant plus sensible que la tentation d'ouvrir les portes-fenêtres pour tempérer et utiliser les loggias est grande, et que ces dernières représentent 85% des façades. A priori moins intéressante pour l'usager, l'ouverture des seules fenêtres extérieures limite quant à elle à un facteur 1.4 l'augmentation de la valeur U de la loggia. L'ouverture des deux parois provoque quant à elle des déperditions de chaleur par ventilation, non quantifiées ici.

Dans le cas de la loggia chaude (La Cigale), la situation est toute différente. L'ouverture des portes fenêtres ne multiplie les déperditions thermiques de la loggia que par un facteur 1.4. L'utilisation continue ou ponctuelle de la loggia comme espace de vie, sans fermeture de la porte-fenêtre, n'est donc pas dramatique, ce d'autant moins que la valeur U de 0.61 W/K.m² reste 2 fois inférieure à celle d'une loggia fermée du bâtiment Gros-Chêne. A contrario, l'ouverture des seules fenêtres extérieures conduit à une augmentation de la valeur U par un facteur 3.5 (pour une valeur U de 1.51 W/K.m², qui reste dans l'ordre de grandeur de celle de Gros-Chêne en situation fermée).

Liées à la localisation de l'enveloppe thermique (paroi interne ou externe de la loggia) les appellations « loggia froide » et « loggia chaudes » prennent ici tout leur sens. Dans les deux cas, l'utilisation optimale consiste à maintenir les deux parois fermées. Il s'agit de la situation considérée par les ingénieurs dans le calcul du bilan thermique. Néanmoins dans le cas de la loggia chaude (qui fait par définition partie de l'espace chauffé), l'ouverture de la paroi interne n'est pas dramatique (du moins avec une paroi externe de qualité, comme c'est le cas à la Cigale). Tel n'est pas le cas pour la loggia froide, qui ne fonctionne bien que si elle est restée séparée de l'espace chauffé.

B1.4.2 Taux d'ouvertures des fenêtres, loggias froides («Gros-Chêne»)

Taux d'ouverture

Dans le cas du bâtiment Gros-Chêne, nous avons analysé l'usage des loggias de la façade sud-ouest au cours des 7 et 12 novembre 2013, entre 8 et 17h. Ces journées sont caractérisées par une température moyenne de 16.1°C (ensoleillement global horizontal de 2.3 kWh/m²), respectivement 5.6°C (2.0 kWh/m²).

L'analyse se base sur une série de photos dans le spectre visible, en pas horaire, qui permet de détecter l'ouverture des portes-fenêtres internes et des fenêtres externes (Figure 50).

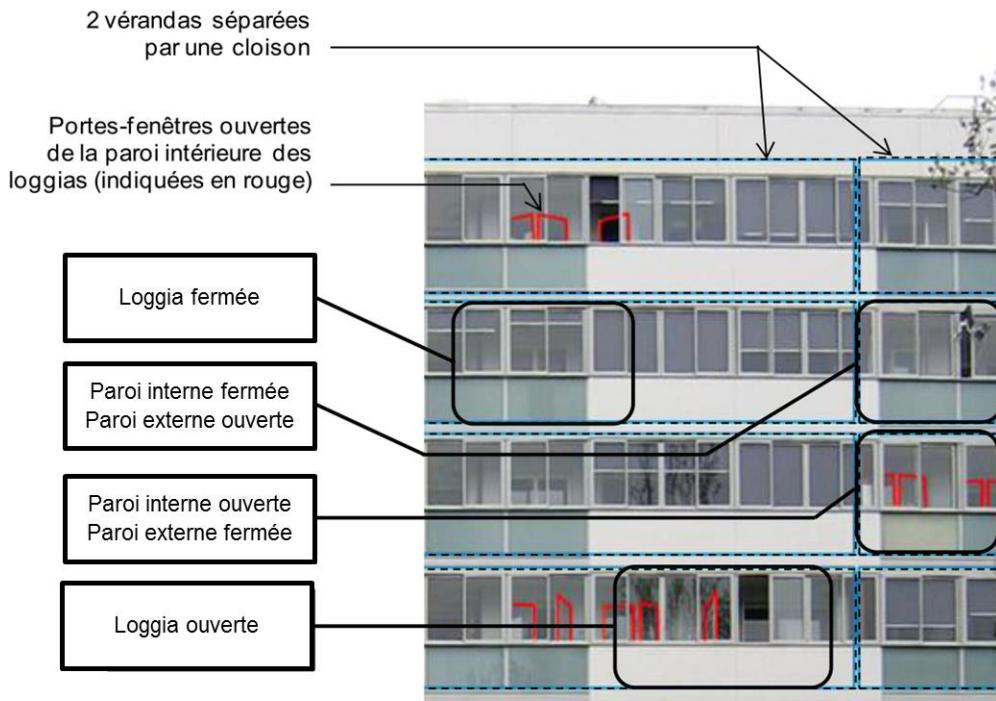


Figure 50. Photo illustrant différentes gestions des loggias sud-ouest du bâtiment Gros-Chêne.

La façade, qui comporte 40 loggias, a été découpée en 5 colonnes verticales (nommées ci-après colonnes A à E) composées chacune de 8 loggias superposées. L'analyse des 18 photos prises durant les deux journées (soit 720 observations) a été réalisée dans le cadre d'un cours à l'Université de Genève. D'après les observations effectuées par les étudiants (Figure 51), 56% des loggias étaient en moyenne totalement fermées ces jours-là, contre 40% avec la paroi externe ouverte et la paroi interne fermée, et 4% dans la situation inverse. En moyenne, le taux de loggia complètement ouvertes est inférieur à 1%. Le graphique de droite montre un taux de loggia fermée à peine plus élevé le 12 novembre que le 7 novembre, malgré une différence de température externe très importante. Dans les deux cas, le taux de fermeture est relativement stable au long de la journée, avec une légère tendance à fermer les fenêtres ouvertes à la tombée de la nuit.

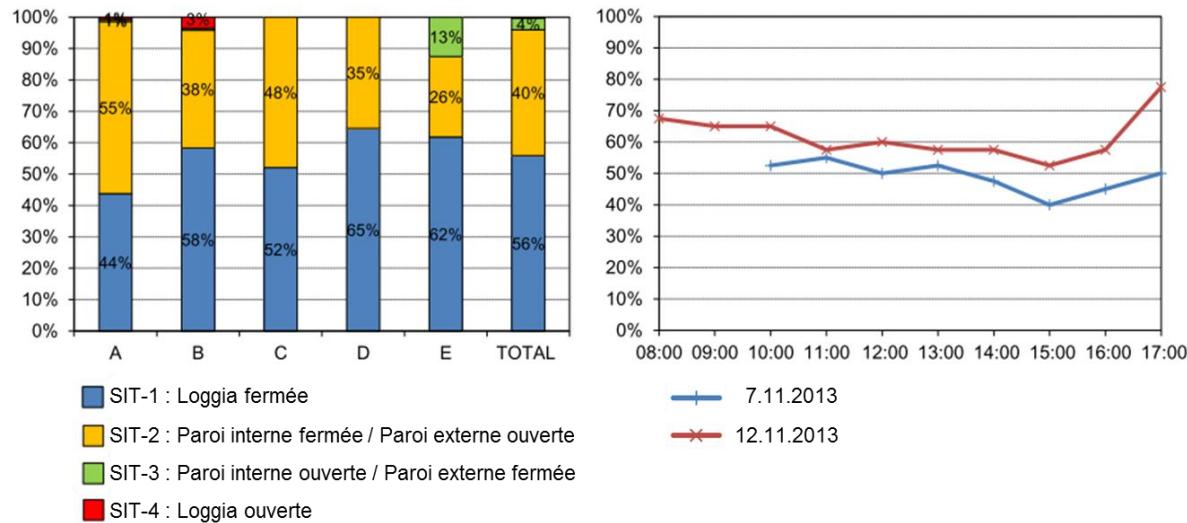


Figure 51. Gestion des loggias sud-ouest du bâtiment Gros-Chêne, 7 et 12 novembre 2013. Graphique de gauche : taux d'ouverture moyen (colonnes A-E et Total). Droite : Evolution du taux de loggias fermées (SIT-1) entre 8h et 17h.

Effet sur la performance

Etant donné les valeurs U associées aux différentes situations d'usage, la valeur U moyenne des loggias au cours de ces 2 journées s'élève à 1.60 W/K.m² (contre 1.26 W/K.m² pour des loggias totalement fermées).

Si l'on considère que le comportement moyen observé durant ces deux journées de novembre est représentatif de celui de l'ensemble de l'hiver, les déperditions annuelles de chaleur à travers les loggias sud-ouest et nord-est s'élèveraient à 49.7 kWh/m² (contre 39.2 kWh/m² avec les loggias totalement fermées). Dès lors, la déperdition supplémentaire de 10.5 kWh/m² correspondrait à 14% des 73 kWh/m² de demande de chauffage mesurée (cf. Figure 45).

Les résultats concernant le comportement observé doivent cependant être interprétés avec prudence du fait de la courte durée de la campagne (2 journées, dont une très clémence) et de la difficulté d'identifier sur les photos les parois internes ouvertes.

Ainsi, d'après les observations effectuées sur place lors de nos visites de suivi et la prise de vue en infrarouge de la façade sud-ouest du bâtiment le 10 février 2012 à 10 heures, lorsqu'il faisait -8°C à l'extérieur, on remarque que le pourcentage de loggias chaudes en gardant les portes-fenêtres intérieures ouvertes (SIT-3) est beaucoup plus important que celui identifié par les étudiants (Khoury, 2014). On constate en particulier une concentration de balcons vitrés chauffés aux derniers étages, malgré le fait qu'un équilibrage hydraulique a été réalisé après la rénovation dans le but de permettre une distribution optimale de la chaleur dans les appartements. Deux raisons peuvent expliquer ce constat : premièrement, il se peut que les occupants des derniers étages utilisent les balcons vitrés comme un espace de vie supplémentaire profitant ainsi de la vue dégagée; deuxièmement, certaines loggias peuvent être utilisées comme un mode de réglage des températures dans les pièces, qui s'avèrent d'après nos mesures élevées dans les étages supérieurs (températures de 24°C au 8e étage contre 22°C au 4e étage).

A ce propos, une utilisation hypothétique de 20% de loggias chaudes (pour les mêmes 56% de loggias fermées) conduit à une valeur U moyenne de 1.98 W/K.m² (déperdition supplémentaire des loggias : 22.3 kWh/m², équivalent à 31% de la demande de chauffage).

B1.4.3 Taux d'ouverture des fenêtres, loggias chaudes (« La Cigale »)

Taux d'ouverture

De façon similaire à Gros-Chêne, nous avons analysé l'usage des loggias de La Cigale grâce à une campagne photographique d'une semaine, du 25 février au 2 mars 2016, entre 4h et 22h. La semaine en question est caractérisée par une température moyenne de 4.9°C (oscillant entre 1.8 et 9.3°C) et un ensoleillement global horizontal moyen de 1.9 kWh/m², dont la dynamique est visible sur la Figure 53 (graphique du bas).

L'analyse se base sur une série de photos dans le spectre visible et infrarouge (Figure 52). Les photos infrarouges permettent de détecter facilement les fenêtres ouvertes ou entre-ouvertes des parois contre extérieures, même lorsque les stores extérieurs sont fermés (Figure 52, la fenêtre du 4^{ème} étage tout à droite) et d'effectuer également l'analyse de nuit. De jour et avec stores ouverts, les photos visibles permettent quant à elles de lever le doute sur des incertitudes d'interprétation. Les observations concernent tant les fenêtres externes des loggias (Figure 52, colonne des 2 fenêtres de gauche), que les fenêtres donnant directement sur les appartements (colonnes des 3 fenêtres de gauche, en léger retrait). Ainsi, pour chaque fenêtre, on constate si celle-ci est « fermée », « entre-ouverte », ou « complètement ouverte ». Note : au niveau des loggias, les photos ne permettent malheureusement pas de détecter l'ouverture/fermeture des portes-fenêtres internes.



Figure 52. La Cigale, photos visible et infrarouge d'une portion de façade, 25 février 2016 à 12h.

Les photos sont prises une fois toutes les deux heures entre 6 et 22h, sur l'ensemble des façades des bâtiments. Sur les 7 jours de mesure, nous avons ainsi 63 photos de chacune des 931 fenêtres, soit un total de 58'653 observations.

La Figure 53 montre l'évolution de la météo et des taux d'ouverture moyen au cours de la semaine. Au niveau de l'entre-ouverture des loggias et des fenêtres d'appartements, il semble y avoir une légère corrélation avec la chute de température et d'ensoleillement des 29 février et 1^{er} mars. Le taux d'ouverture complet, qui ne dépasse jamais 5%, est quant à lui indépendant de l'évolution de la météo. Par ailleurs, surtout au niveau des fenêtres d'appartements, le taux d'ouverture complet a tendance à légèrement augmenter en période diurne, au détriment des entre-ouvertures, qui ont alors tendances à diminuer.

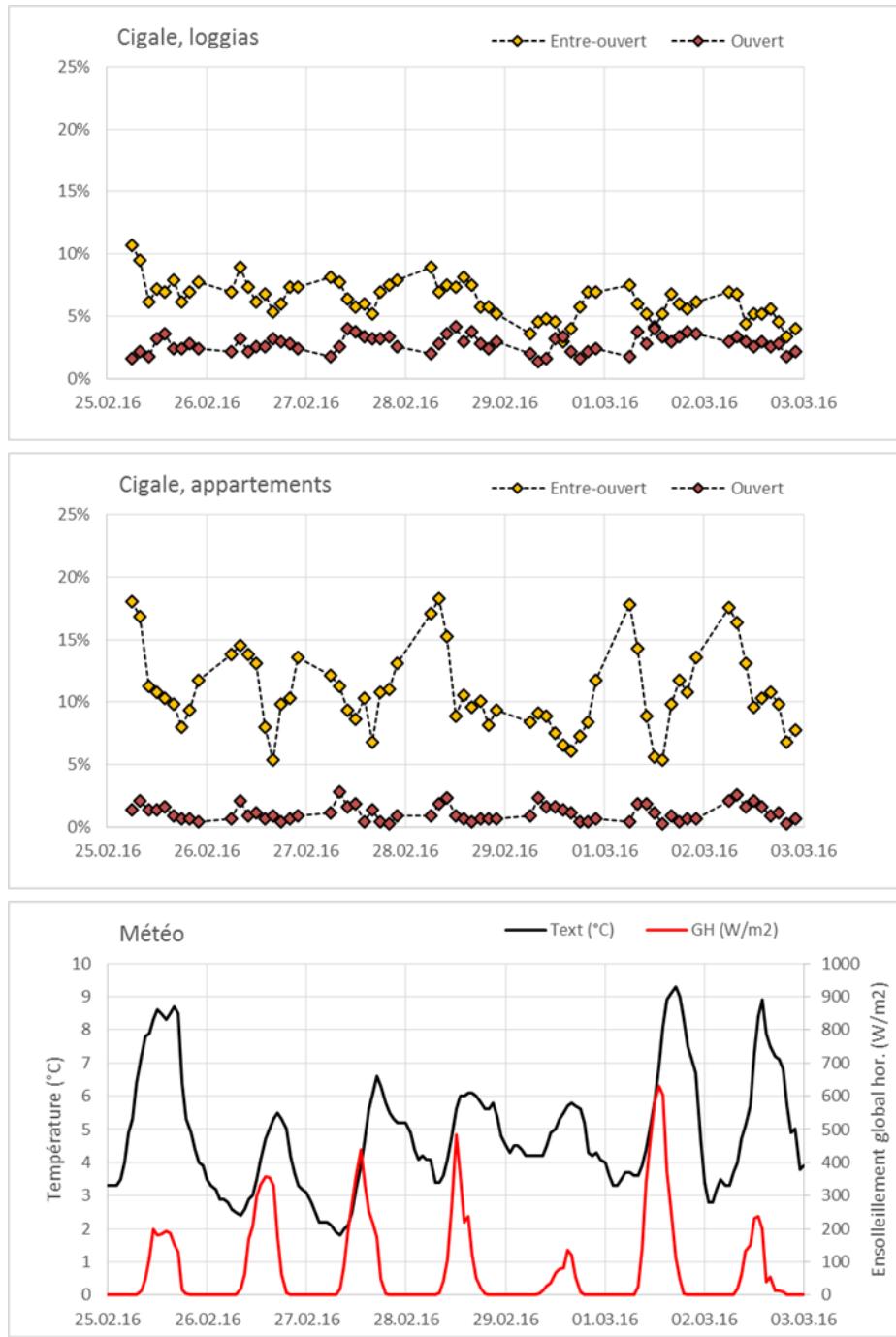


Figure 53. Taux d'ouverture des fenêtres, bâtiment La Cigale, 25 février au 2 mars 2016. Dynamique horaire.

En moyenne sur la semaine, le taux d'entre-ouverture des fenêtres externes est de 7% pour les loggias et de 11% pour les appartements. Le taux d'ouverture complète est quant à lui de 3% pour les loggias et de 1% pour les appartements.

La Figure 54 donne les taux moyens par étage. On observe une nette tendance à maintenir fermées les loggias et les fenêtres du 1^{er} étage, puis une légère tendance à la hausse dès le 2^{ème} étage. A ce stade il est difficile de savoir s'il s'agit d'une façon de traiter une éventuelle surchauffe dans les étages les plus haut, ou plutôt d'un comportement lié à la gestion de la sécurité et du bruit de la rue.

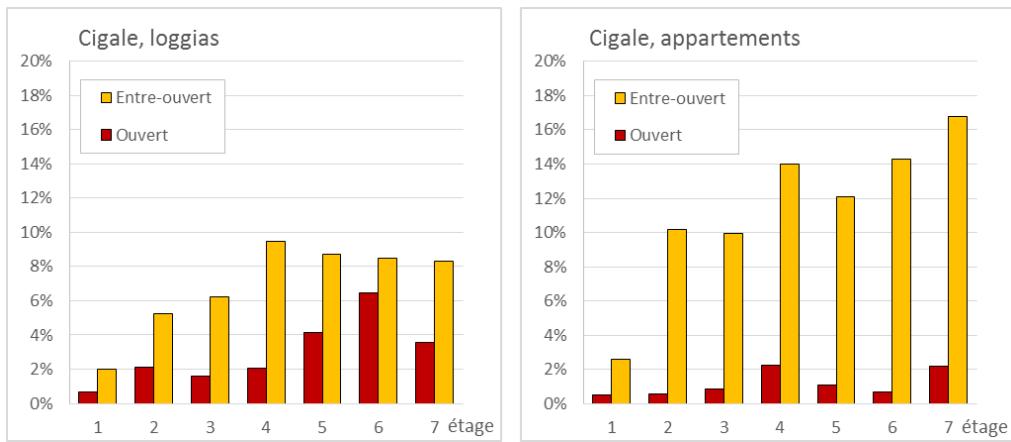


Figure 54. Taux d'ouverture des fenêtres, bâtiment La Cigale, 25 février au 2 mars 2016.

En complément, la Figure 55 indique la distribution des taux d'ouverture sur l'ensemble des fenêtres des 2 blocs de bâtiments (Vermont : 7'343 m² de surface énergétique, façades principales orientées SE et NW; Vidollet : 11'656 m², orientées SW et NE). On remarque une grande similitude entre les 2 bâtiments, tant pour les valeurs moyennes que pour les distributions. Dans les deux cas, moins de 17% des loggias (axe x) sont entre-ouvertes plus de 10% du temps (axe y), et moins de 5% sont complètement ouvertes plus de 10% du temps. Pour les fenêtres donnant directement sur les appartements, environ 30% sont entre-ouvertes plus de 10% du temps, et environ 1% sont complètement ouvertes plus de 10% du temps. Par ailleurs, de rares loggias ou fenêtres d'appartements sont ouvertes ou entre-ouvertes presqu'en continu.

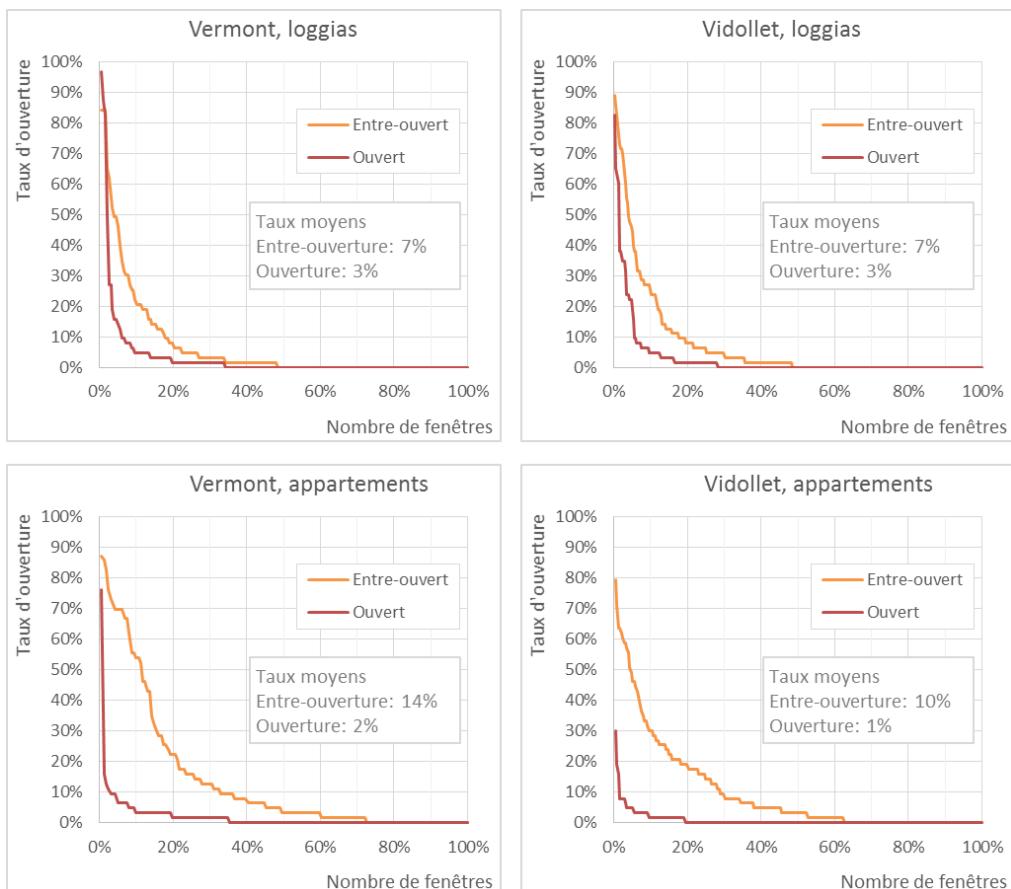


Figure 55. Taux d'ouverture des fenêtres, bâtiment La Cigale, 25 février au 2 mars 2016. Courbes classées.

Effet sur la performance

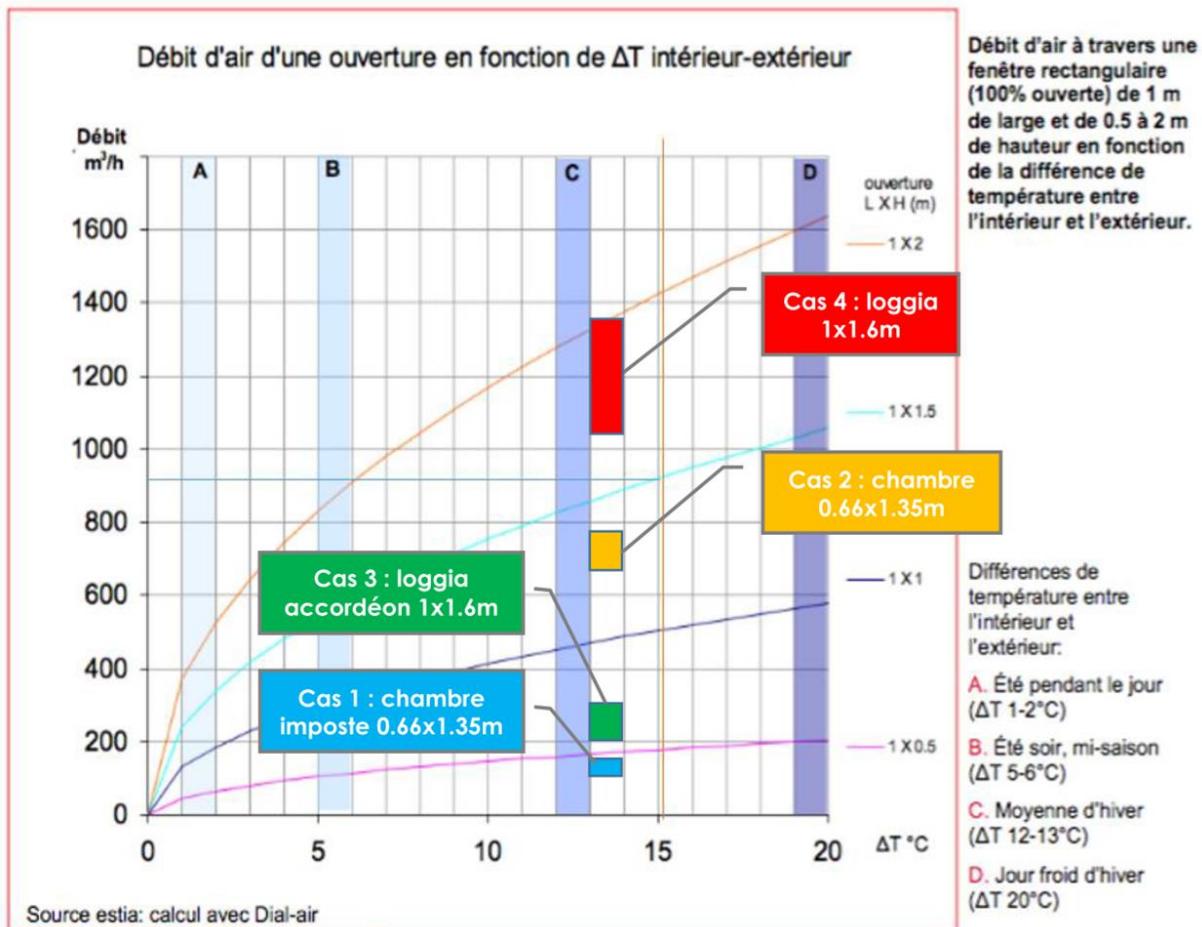
Afin d'évaluer l'effet de l'ouverture des fenêtres sur la performance de l'enveloppe, nous avons fait faire une mesure ponctuelle de débit de ventilation naturelle, par ouverture de fenêtre. Cette mesure spot a été effectuée en date du 13 décembre 2016 entre 14 et 15h (Exenco, 2016), pour une température moyenne extérieure de 7.5°C et intérieure: 20.5°C.

Les 4 situations suivantes ont été mesurées l'une après l'autre, avec dans chaque cas les portes intérieures de l'appartement maintenues ouvertes :

- Cas 1 : Fenêtre sur appartement, entre-ouverte (ouverture d'un vantail en imposte).
- Cas 2 : Fenêtre sur appartement, ouverture complète (ouverture complète d'un vantail).
- Cas 3 : Fenêtre sur loggia, entre-ouverte (5cm d'ouverture latérale).
- Cas 4 : Fenêtre sur loggia, ouverture complète (ouverture complète d'un vantail).

Dans chaque cas, le débit a été caractérisé par des mesures de vitesse d'air en plusieurs points des ouvertures, toutes les secondes durant 30 secondes. Le débit total a été obtenu par la somme des débits partiels, en tenant compte du sens du débit. En effet, l'écoulement est de type convectif, et principalement lié à la différence de température entre intérieur et l'extérieur. L'absence de vent fait que l'effet du vent est considéré nul, et on estime qu'il n'y a pas de différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Il en résulte un débit d'air chaud intérieur sortant par la partie haute de l'ouverture, et un débit d'air froid entrant sur la partie basse de l'ouverture. L'identification de la hauteur neutre, où le débit s'inverse, a été réalisée à l'aide d'un fumigène, permettant de matérialiser la direction de l'écoulement. Cette hauteur neutre a été observée assez variable et s'étendait sur une hauteur variant entre 20 et 30cm. L'absence d'effet de l'ouverture de fenêtre sur le débit de ventilation mécanique a été vérifié, en comparant la vitesse de l'air au niveau d'une bouche de pulsion, fenêtre ouverte et fenêtre fermée.

Sur la Figure 56, les résultats de mesure sont reportés sur un abaque existant (concernant des ouvertures complètes) transmis par Estia SA. Les hauteurs des rectangles de couleur représentent la plage d'incertitude du débit mesuré. Dans les deux cas d'ouvertures complètes (cas 2 et 4) l'ordre de grandeur du débit mesuré est cohérent avec les valeurs de l'abaque.



Cas 1 : Fenêtre sur appartement, entre-ouverte

Cas 2 : Fenêtre sur appartement, ouverture complète

Cas 3 : Fenêtre sur loggia, entre-ouverte

Cas 4 : Fenêtre sur loggia, ouverture complète

Figure 56. Débit de ventilation naturelle par ouverture de fenêtres, bâtiment La Cigale.

En extrapolant ces débits à l'ensemble des appartements tout en tenant compte des taux moyens d'ouverture et entre-ouverture observés plus haut, le débit de ventilation naturelle s'élèverait à $1.91 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, dont 75% via les loggias et 25% via les fenêtres donnant directement sur les appartements. A noter que cette valeur correspondrait au double des $0.97 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ de ventilation mécanique mesurés au cours du suivi énergétique (Hollmuller et al., 2017), soit un taux de ventilation global (mécanique + naturel) de $2.88 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, ce qui est irréaliste.

En effet, en extrapolant sans plus de précaution les $1.91 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ à l'ensemble de la saison de chauffage (3'414 degrés-jours effectifs, avec une température intérieure moyenne de 22.8°C), l'effet de l'ouverture des fenêtres résulterait en une perte thermique de $34.9 + 12.0 = 46.9 \text{ kWh/m}^2$, par les loggias et les fenêtres donnant directement sur les appartements. Ceci représente 1.4 fois la demande de chauffage totale de 32.5 kWh/m^2 , ou encore 1.8 fois la part de la demande de chauffage dédiée aux pertes par l'enveloppe de 26.2 kWh/m^2 (cf. Figure 45). Un tel levier est improbable, puisque la fermeture complète des fenêtres impliquerait à elle seule que la demande de chauffage se réduise à zéro !

A cet égard, il est important de noter que l'observation de l'ouverture des loggias par photo infrarouge ne concerne que la paroi externe des loggias. Dans l'hypothèse où la paroi interne était systématiquement fermée, la perte liée à l'ouverture externe des loggias correspondrait en fait non plus à de la ventilation

naturelle, mais à une perte par transmission avec une valeur U de 1.51 au lieu de 0.43 W/K/m² (cf. chapitre B1.4.1). Au total, la perte par les loggias et les fenêtres donnant directement sur les appartements s'élèverait alors à $4.8 + 12.0 = 16.8 \text{ kWh/m}^2$, ce qui reste compatible avec la demande de chauffage mesurée.

A défaut de pouvoir trancher de façon précise entre ces deux situations extrêmes, nous présentons ci-dessous l'évolution de la perte de chaleur au travers des fenêtres ouvertes et entre-ouvertes (loggias + fenêtres sur appartements), en fonction de la fraction d'ouverture des parois internes des loggias (Figure 57). Jusqu'à environ 30% de taux d'ouverture de la paroi interne, les pertes globales par les diverses fenêtres (transmission et ventilation) restent inférieures ou égales à la part de la demande de chauffage dédiée à l'enveloppe. Afin d'aller plus avant dans cette comparaison, il faudrait tenir compte d'une part des pertes par les éléments opaques de l'enveloppe, d'autre part des gains internes et solaires qui contribuent à contrebalancer ces pertes.

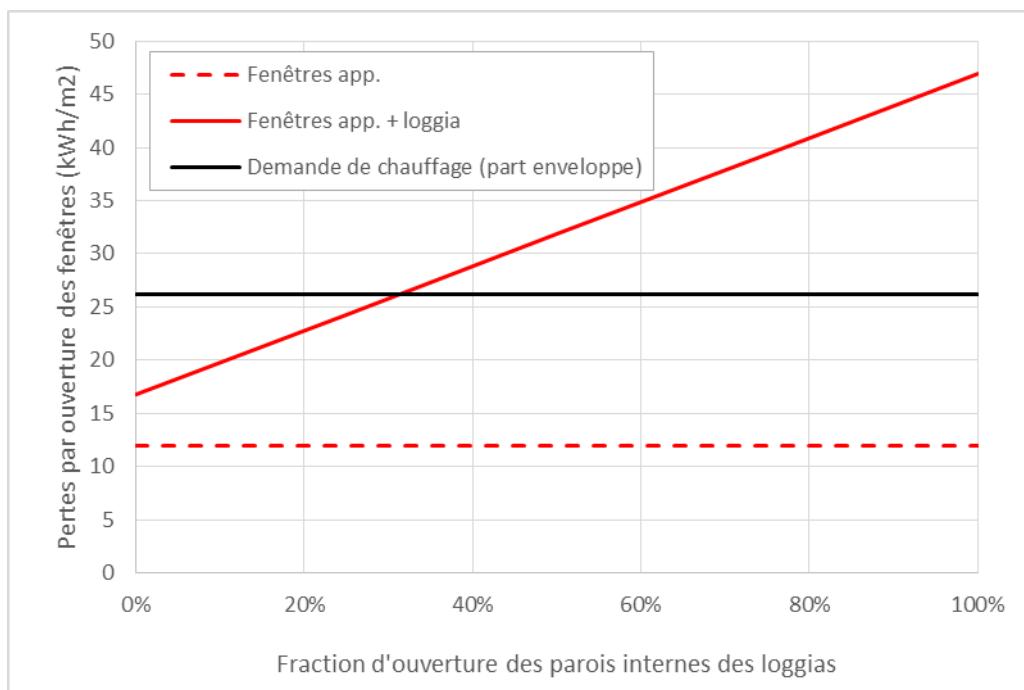


Figure 57. Pertes de chaleur par ouverture des fenêtres (traits rouges) et demande de chauffage (part dédiée aux pertes par l'enveloppe, trait noir), bâtiment La Cigale.

Finalement, nous soulevons les questions méthodologiques et limites suivantes concernant l'analyse ci-dessus :

- Les taux d'ouverture observés lors de la semaine en question ne sont pas forcément représentatifs de l'ensemble de l'hiver. A ce propos, il est probable que les taux d'ouverture diminuent avec la température extérieure, mais il est également acquis que les débits de ventilation unitaires augmentent alors en fonction du différentiel intérieur – extérieur (cf. abaques de la Figure 56).
- Bien que les mesures ponctuelles de débits (fenêtres complètement ouvertes) correspondent assez bien aux valeurs données par des abaques (Figure 56), un degré d'incertitude concerne l'effet simultané de la fermeture des stores (situation régulièrement observée sur les photos, mais non prise en compte lors de la mesure ponctuelle des débits).

B1.5 Mise en perspective des résultats

B1.5.1 Aspects énergétiques

En ce qui concerne nos deux études de cas, on observe des taux d'ouverture des loggias vers l'extérieur passablement différents (40% dans le cas des loggias froides de Gros-Chêne, 10% dans le cas des loggias chaudes de La Cigale). Avec la méthode utilisée, le taux d'ouverture des portes-fenêtres intérieures reste cependant difficile à caractériser, même si des ordres de grandeur plausibles ont pu être avancés. Enfin, l'extrapolation de ces observations à l'ensemble de la saison de chauffage reste sujette à caution.

Par ailleurs, les deux bâtiments se différencient par une qualité d'enveloppe thermique différente, ainsi qu'en atteste les valeurs U intrinsèques des loggias (1.26 versus 0.43 W/K.m²) et la part de la demande de chauffage liée à l'enveloppe (69 versus 26 kWh/m²). Par conséquence, l'impact de l'ouverture des loggias est intrinsèquement différent.

Cela dit, cette étude permet de tirer les enseignements généraux suivants :

- Dans les deux cas, l'utilisation optimale de la loggia consiste à maintenir les deux parois fermées.
- Néanmoins, en situation d'usage réel les occupants peuvent avoir tendance à considérer la loggia comme un espace de vie supplémentaire et à garder ouvertes les portes-fenêtres de la paroi interne. Cette situation est plus critique dans le cas d'une loggia froide, puisque l'enveloppe thermique est dès lors déplacée vers la paroi externe, de moindre qualité.
- Dans la pratique, on observe en fait une combinaison d'usages divers, allant de loggias complètement fermées à des loggias ouvertes sur l'intérieur, sur l'extérieur ou sur les deux.
- A cet égard, l'ouverture des fenêtres extérieures de la loggia s'inscrit dans une discussion plus générale concernant l'ouverture des fenêtres par les habitants. Un tel comportement peut relever de raisons diverses, telle que le besoin de contrôle de l'aération du logement, une façon de contrôler la surchauffe de l'appartement, un besoin d'emprise directe avec l'extérieur, ou une simple habitude.

B1.5.2 Autres aspects

En complément aux aspects énergétiques et comportementaux liés à l'usage des loggias par les occupants, d'autres aspects sont à considérer lorsque la fermeture des balcons en loggias est envisagée. La liste des aspects présentés ci-dessous n'est pas exhaustive. Par ailleurs, ces aspects peuvent être plus ou moins importants, en fonction notamment du projet de rénovation et de la sensibilité du site, ou encore de l'expérience et des objectifs du maître de l'ouvrage.

Aspects confort :

- Bien que n'étant en principe pas chauffée activement, la création de loggia chaude offre un climat confortable une grande partie de l'année, ce qui n'est pas le cas pour les loggias froides.
- Dans les deux cas, la fermeture des balcons peut engendrer une diminution de la luminosité, qu'il convient d'évaluer plus finement en termes de confort visuel et de consommation électrique supplémentaire pour l'éclairage.

Impact architectural et urbanistique:

- Dans les deux cas (loggia froide ou chaude), il y a en principe changement radical de l'apparence des façades existantes.
- Les contraintes patrimoniales doivent être examinées en conséquence.

Aspects organisationnel et de mise en œuvre :

- Le principe de fermer les loggias limite grandement les interventions dans les logements et permet par exemple de faire passer les gaines de pulsions de la ventilation double-flux. Cela est d'autant important que la plupart des rénovations énergétiques sont réalisées en site occupé.
- Au niveau de la gestion du chantier, une bonne logistique et planification en amont est nécessaire lors du choix des procédés en préfabriqué pour la fermeture des balcons en loggias.
- Le procédé de préfabrication permet une meilleure gestion du chantier, ainsi qu'une grande réduction des risques d'accidents et des contraintes du chantier (réduction de la surface de chantier et une meilleure gestion des déchets). L'étude (Khimda, 2017) propose à ce propos une comparaison des avantages des procédés de préfabrication et standard pour la rénovation.

Détails constructifs:

- Le type d'ouverture doit être bien réfléchi, en termes de simplicité d'usage et de maintenance : les fenêtres coulissantes de la loggia froide de « Gros-Chêne » sont plus faciles à ouvrir mais plus difficiles à nettoyer, alors que les fenêtres rétractables de la loggia chaude de « La Cigale » sont plus difficiles à ouvrir mais plus simples à nettoyer.
- Le choix de fenêtres rétractables permet d'ouvrir largement les vitrages de façon à pouvoir retrouver le balcon en été.
- Dans le cas de fermeture des balcons en loggia, la capacité statique des éléments existants à porter un poids supplémentaire du fait d'ajouter la paroi externe doit être examinée.

Aspects économiques:

- Le coût d'une loggia froide est globalement inférieur au coût d'une loggia chaude (en raison du coût spécifique plus élevé des vitrages performants de la loggia chaude et du coût d'isolation des éléments opaques).
- Dans le cas d'une loggia chaude, une étude récente (Khimda, 2017) a montré que le coût du procédé préfabriqué est proche du coût du procédé standard, mais offre plusieurs co-bénéfices non énergétiques, comme par exemple: la garantie d'une production de qualité, un gain de temps intéressant sur les phases de montage et de réalisation, une mise en œuvre rapide avec un minimum de nuisances pour les habitants, etc.
- Subventions : jusqu'en 2016, le programme bâtiment subventionnait le remplacement des verres existants par des verres isolants, mais pas le triple vitrage de la paroi externe qui sert à créer un espace supplémentaire. Ainsi, une loggia chaude était moins bien subventionnée qu'une loggia froide (note : dès janvier 2017 il n'y a cependant plus de subvention au changement des vitrages).

En lien avec les points précédents, les questions suivantes restent par ailleurs ouvertes: Quel peut être l'impact de la création d'une loggia (en particulier loggia chaude) sur la surface locative ? Est-ce que fermer un balcon est considéré comme une plus-value ou une moins-value pour les locataires ?

B1.6 Synthèse et conclusions

La typologie des façades des immeubles d'habitation d'après-guerre se caractérise fréquemment par des grandes ouvertures vitrées et des balcons qui se développent sur une partie ou sur l'ensemble des élévations. Lors de travaux d'assainissement énergétique, la question se pose toujours de savoir pour quelle solution opter au niveau des dalles des balcons et des ponts thermiques associés. Une solution consiste à créer des loggias, c'est-à-dire à fermer les balcons avec du vitrage, permettant par la même de créer un espace supplémentaire. A cet égard, on distingue les loggias froides et chaudes, selon que le plus petit coefficient de déperdition thermique se trouve au niveau de la paroi intérieure (interface appartement/loggia) ou extérieure (interface loggia/extérieur).

Le but de ce volet est de comparer les solutions de loggia chaude et froide, d'une part en termes de fonctionnement et performance intrinsèque, d'autre part en termes d'utilisation faite par les habitants. Nous nous basons pour cela sur deux études de cas de bâtiments résidentiels collectifs d'après-guerre ayant récemment fait l'objet d'une rénovation thermique complète de l'enveloppe et du système de production de chaleur, avec à la clé la création de loggias.

Caractérisation des loggias

Dans le cas du bâtiment « Gros-Chêne » (loggia froide), la fermeture des balcons se caractérise par des fenêtres coulissantes en simple vitrage, alors que le vitrage des portes-fenêtres internes a été remplacé par du vitrage isolant double. Ramenée au niveau du plan de la façade, la résistance thermique de la loggia fermée s'élève à $0.79 \text{ K.m}^2/\text{W}$ ($U = 1.26 \text{ W/K.m}^2$), dont 70% se situe au niveau de la paroi interne. Par conséquence, pour une température des logements aux alentours de 24°C et une température externe de 0°C , on observe une température dans les loggias fermées aux alentours de 10°C .

Dans le cas du bâtiment « La Cigale », la fermeture des balcons se caractérise par des fenêtres rétractables en triple vitrage, pour des portes-fenêtres internes en double vitrage (fruit d'une rénovation précédente). Ramenée au niveau du plan de la façade, la résistance thermique de la loggia fermée s'élève à $2.30 \text{ K.m}^2/\text{W}$ ($U = 0.43 \text{ W/K.m}^2$), dont 29% se situe au niveau de la paroi interne. Par conséquence, pour une température des logements aux alentours de 22°C et une température externe de 0°C , on observe cette fois-ci une température dans les loggias aux alentours de 17°C .

Liées à la localisation de l'enveloppe thermique (paroi interne ou externe de la loggia) les appellations « loggia froide » et « loggia chaudes » prennent donc tout leur sens.

Effet de l'ouverture des fenêtres

Dans les deux cas, l'utilisation optimale de la loggia consiste à maintenir les deux parois fermées. Il s'agit de la situation considérée par les ingénieurs dans le calcul du bilan thermique. Néanmoins, en situation d'usage réel les occupants peuvent avoir tendance à considérer la loggia comme un espace de vie supplémentaire et à garder ouvertes les portes-fenêtres de la paroi interne.

Dans le cas des loggias froides (Gros-Chêne), l'ouverture des portes fenêtres a pour effet de multiplier les déperditions thermiques de la loggia par un facteur 3.3. Ce point est d'autant plus sensible que la tentation d'ouvrir les portes-fenêtres pour tempérer et utiliser les loggias pourrait être grande.

Dans le cas des loggias chaudes (La Cigale), la situation est toute différente. L'ouverture des portes fenêtres ne multiplie les déperditions thermiques de la loggia que par un facteur 1.4. L'utilisation continue ou ponctuelle de la loggia comme espace de vie, sans fermeture de la porte-fenêtre, n'est donc pas dramatique, ce d'autant moins que la valeur U résultante (0.61 W/K.m^2) reste 2 fois inférieure à celle de la loggia fermée du bâtiment Gros-Chêne.

Taux d'ouverture et effet sur la performance

Cas des loggias froides

Dans le cas des loggias froides (Gros-Chêne), le taux d'ouverture des fenêtres a été caractérisé par une série de photos dans le spectre visible, en pas horaire, au cours de 2 journées d'hiver. En moyenne, on observe 56% des loggias étaient totalement fermées, 40% avec la paroi externe ouverte et la paroi interne fermée, et 4% dans la situation inverse. Le taux de loggias complètement ouvertes est inférieur à 1%.

En extrapolant ces résultats à l'ensemble de la saison de chauffage, les déperditions annuelles de chaleur à travers les loggias s'élèveraient à 49.7 kWh/m² (contre 39.2 kWh/m² avec les loggias totalement fermées). Dès lors, la déperdition supplémentaire de 10.5 kWh/m² correspondrait à 14% de la demande de chauffage (73 kWh/m²).

Ces résultats doivent cependant être interprétés avec prudence du fait de la courte durée de la campagne (2 journées, dont une très clémence) et de la difficulté d'identifier sur les photos les parois internes ouvertes. A cet égard, une observation ponctuelle par photo infrarouge indique un pourcentage de loggias chaudes (portes-fenêtres intérieures ouvertes) beaucoup plus important, en particulier aux derniers étages, plus chauds.

Cas des loggias chaudes

Dans le cas des loggias chaudes (La Cigale), le taux d'ouverture des fenêtres a été caractérisé par une série de photos dans le spectre visible et infrarouge, toutes les deux heures, au cours d'une semaine complète d'hiver, en distinguant entre fenêtres « complètement ouvertes » et fenêtres « entre-ouvertes ». L'analyse concerne à la fois les fenêtres externes des loggias, et les fenêtres donnant directement sur les appartements. Dans le cas des loggias, les photos ne permettent malheureusement pas de détecter l'ouverture/fermeture des portes-fenêtres internes. En moyenne, le taux d'entre-ouverture des fenêtres externes est de 7% pour les loggias et de 11% pour les fenêtres donnant sur appartement. Le taux d'ouverture complète est quant à lui de 3% pour les loggias et de 1% pour les appartements.

Afin d'évaluer l'effet de l'ouverture des fenêtres sur la performance de l'enveloppe, nous avons fait faire une mesure ponctuelle de débit de ventilation naturelle, par ouverture de fenêtre, qui ont été comparées à des valeurs d'abaque.

En extrapolant ces observations à l'ensemble de la saison de chauffage, l'effet de l'ouverture des loggias et des fenêtres donnant directement sur les appartements résulterait en une perte thermique de 34.9 + 12.0 = 46.9 kWh/m², ce qui représente 1.8 fois la part de la demande de chauffage liée aux pertes par l'enveloppe (26.2 kWh/m²). Un tel levier est improbable, puisque la fermeture complète des fenêtres impliquerait à elle seule que la demande de chauffage se réduise à zéro !

A cet égard, il est important de noter que l'observation de l'ouverture des loggias par photo infrarouge ne concerne que la paroi externe des loggias. Dans l'hypothèse où 70% des loggias ouvertes sur l'extérieur avaient leur paroi interne fermée, les pertes globales par les diverses fenêtres (transmission et ventilation) restent inférieures ou égales à la part de la demande de chauffage dédiée à l'enveloppe. Cependant, afin d'aller plus avant dans cette comparaison, il faudrait également tenir compte des pertes par les éléments opaques de l'enveloppe, ainsi que des gains internes et solaires qui contribuent à contrebalancer ces pertes.

Enseignements principaux

Cette étude permet de tirer les enseignements suivants :

- Dans les deux cas (loggia chaude ou froide), l'utilisation optimale de la loggia consiste à maintenir les deux parois fermées. Il s'agit de la situation généralement considérée par les ingénieurs dans le calcul du bilan thermique.
- Néanmoins, en situation d'usage réel les occupants peuvent avoir tendance à considérer la loggia comme un espace de vie supplémentaire et à garder ouvertes les portes-fenêtres de la paroi interne. Cette situation est plus critique dans le cas d'une loggia froide, puisque l'enveloppe thermique est dès lors déplacée vers la paroi externe, de moindre qualité.
- Dans la pratique, on observe en fait une combinaison d'usages divers, allant de loggias complètement fermées à des loggias ouvertes sur l'intérieur, sur l'extérieur ou sur les deux.
- A cet égard, l'ouverture des fenêtres extérieures de la loggia s'inscrit dans une discussion plus générale concernant l'ouverture des fenêtres par les habitants. Un tel comportement peut relever de raisons diverses, telle que le besoin de contrôle de l'aération du logement, une façon de contrôler la surchauffe de l'appartement, un besoin d'emprise directe avec l'extérieur, ou une simple habitude.

Autres aspects

En complément aux aspects énergétiques et comportementaux liés à l'usage des loggias par les occupants, lors de la fermeture des balcons en loggias d'autres aspects sont à considérer, en fonction notamment du projet de rénovation et de la sensibilité du site, ou encore de l'expérience et des objectifs du maître de l'ouvrage :

- Aspects de confort thermique et visuel.
- Aspects organisationnel et de mise en œuvre (en lien avec un procédé de fabrication standard ou préfabriqué).
- Détails constructifs (en lien avec le type d'ouverture des fenêtres et la facilité d'usage et de maintenance).
- Impact architectural et urbanistique (en lien avec les contraintes patrimoniales).
- Aspects économiques, en termes de coûts mais également de subventions.

PARTIE B2 : Evaluation des performances intrinsèques du système « PAC sur air vicié »

B2.1 Introduction

Le renouvellement d'air dans les bâtiments est à l'origine de grandes déperditions thermiques. La majorité des immeubles d'habitation existant possède actuellement un système de ventilation de type « extraction simple » qui laisse échapper environ $100 \text{ MJ/m}^2_{\text{SRE}}$ par an, équivalent à une dizaine de TWh au niveau national. La récupération à grande échelle et la valorisation de cette chaleur fatale constitue un important gisement d'économies d'énergie.

Parmi les solutions de récupération figure le système de ventilation double-flux, quelquefois avec récupération additionnelle de la chaleur sur l'air vicié via une PAC intégrée. Ce système est relativement bien connu. Pendant les deux décennies précédentes, le groupe Systèmes Energétiques de l'Université de Genève a pu suivre, analyser et expertiser quelques systèmes de récupération de chaleur sur l'air extrait pour le chauffage de l'air frais. La récupération est réalisée généralement par des échangeurs à plaques.

L'utilisation jointe d'une pompe à chaleur et d'un échangeur double flux (récupération de 50% à 65%) permet de faire passer le taux de récupération sur l'air vicié à environ 80% à 90%. Le COP global annuel de l'installation de ventilation (VDF + PAC) du bâtiment Gros-Chêne rénové en 2008 (Mermoud, Khoury et Lachal, 2012) mesuré dans des conditions réelles d'utilisation atteint 11, induisant une consommation électrique supplémentaire de $8 \text{ MJ/m}^2_{\text{SRE}}/\text{an}$.

Ce type de système qui tend à se généraliser dans les constructions neuves reste peu retenu pour les rénovations, sans doute à cause de son intégration complexe et de sa mise en œuvre onéreuse (coûts résultants d'environ 35 ct/kWh économisé en rénovation, cf. Mermoud, Khoury et Lachal, 2012) contre 25 ct/kWh économisé dans le neuf (Zgraggen, 2010).

En guise d'alternative à la ventilation double-flux, ce volet se propose sur la base de retours d'expériences d'améliorer la connaissance de l'usage et du fonctionnement du système utilisant des pompes à chaleur sur l'air vicié pour le préchauffage de l'ECS dans des grands immeubles d'habitation, placés individuellement ou en série avec une installation solaire thermique.

A notre connaissance, ce système est encore peu répandu, pourtant il paraît à priori intéressant du point de vue énergétique et économique, dans sa capacité à se multiplier dans un processus de phasage des travaux ou de rénovation par étapes des bâtiments.

Une étude sur l'estimation simulée du potentiel de ce type de système (Cabrera et al., 2011) montre que :

- Le taux de couverture de la demande d'ECS, qui tient compte de la contribution électrique de la PAC, serait également de 50%. En présence de préchauffage solaire, la couverture globale s'élèverait presque à 70%, répartis à part égales entre solaire et PAC.
- le taux de récupération sur l'air vicié pourrait être supérieur à 50% ; mais atteindrait 35% en cas de présence de préchauffage solaire (la demande satisfaite par la PAC étant plus faible).
- Le COP de la PAC se situerait environ à 6 sans solaire. Il passe à 5 en présence de solaire (température plus élevée côté condensateur), mais le COP global de préchauffage (solaire + PAC) s'élève alors à 9.

Le retour d'expérience sur deux installations (une avec et une sans installation solaire) réalisées dans des grands immeubles d'habitation rénovés récemment permettra de confronter les mesures en situation d'usage réel aux résultats de simulation ci-dessus. Il s'agira en particulier de :

- Mesurer avec précision les performances énergétiques des installations en question.
- Comprendre le fonctionnement de la PAC et déterminer le COP réel.
- Déterminer le taux de couverture de la demande de chaleur pour l'eau chaude sanitaire.
- Evaluer les performances des deux systèmes (PAC sur air vicié et capteurs solaires) et la consommation électrique des auxiliaires (pompes, etc.).
- Etudier l'aspect coût et acceptabilité sociale par les gestionnaires, propriétaires et utilisateurs.
- Démontrer la viabilité de la solution, bien identifier les facteurs limitant et problèmes, et proposer des solutions ainsi que des améliorations possibles.

B2.2 De la solution à son intégration dans le projet

B2.2.1 Principe de fonctionnement

Il s'agit de récupérer la chaleur de l'air vicié extrait d'un immeuble grâce à une pompe à chaleur pour préchauffer l'eau chaude sanitaire. Un stock de préchauffage de l'ECS permet de valoriser la production de chaleur en ruban et la rendre compatible temporellement avec la demande d'ECS très fluctuante. La Figure 58 montre les 2 alternatives pour récupérer la chaleur contenue dans l'air vicié : le système de ventilation double flux et le système de récupération pour l'eau chaude sanitaire.

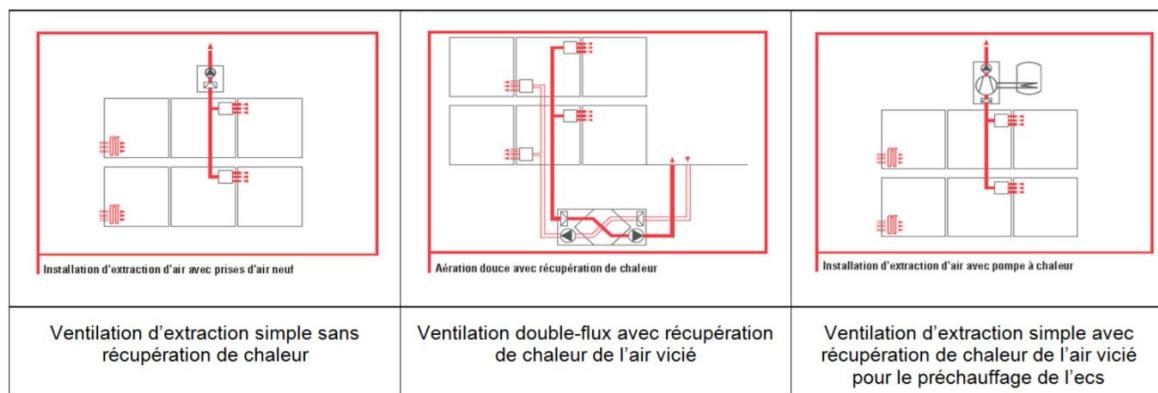


Figure 58. Trois types de ventilation dans les bâtiments (schéma Minergie).

B2.2.2 Présentation des deux études de cas

Un retour d'expérience a été entrepris sur les installations des bâtiments d'habitation suivants, ayant fait l'objet de rénovation par étapes.

Eaux-Vives

Le premier complexe d'immeubles est situé au 10-10 Bis chemin du Frank-Thomas et 24-26 avenue de la Gare-des-Eaux-Vives. Ils sont composés de 13 niveaux hors-sols, totalisant une surface de référence énergétique de 15'760 et 13'822 m². Ces deux immeubles ont subi une rénovation par étapes comme suit :

- 2001-2002 : réfection façades et mise en conformité des garde-corps des balcons - remplacement des ascenseurs (24, 26, avenue de la Gare-des-Eaux-Vives) ;
- 2002-2003 : réfection façades et mise en conformité des garde-corps des balcons - remplacement des ascenseurs (10-10BIS, chemin Frank-Thomas) ;
- 2010-2011 : rénovations des colonnes et alimentations sanitaires – mise en place d'une récupération de chaleur sur air-vicié pour le préchauffage de l'ECS - changements des fenêtres (pour les 2 bâtiments).

Les photos ci-dessous illustrent les bâtiments concernés et la récupération de chaleur qui se fait au niveau de la toiture.



Figure 59. Installations de récupération de chaleur sur l'air vicié pour le préchauffage de l'ECS sans préchauffage solaire (Eaux-Vives).

Ces bâtiments sont actuellement chauffés par le biais d'une chaudière, qui fournit aussi l'appoint d'ECS. Le préchauffage d'ECS est fourni par l'installation de récupération de chaleur sur air vicié (sans préchauffage solaire) posée sur la toiture (voir Figure 59). L'indice de dépense de chaleur en 2010 a atteint 489 MJ/m² pour le 10-10bis et de 523 MJ/m² pour le 24-26.

Le système de récupération de la chaleur de l'air vicié installé à Eaux-Vives se compose de trois parties principales, voir Figure 60 :

1. **Le sous-système d'extraction** de la chaleur de l'air vicié, grâce à un échangeur de chaleur air-eau glycolée. Une pompe d'activation, deux tubes de connexion entre la cave et le toit où se trouvent les tourelles d'extraction et un stock intermédiaire complètent cette partie extractive
 2. **Le sous-système d'adaptation du niveau de température**, constitué principalement par une pompe à chaleur eau glycolée – eau
 3. **Le sous-système de valorisation**, où un échangeur de chaleur permet le transfert de la chaleur issue de la pompe à chaleur pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire tout en isolant hydrauliquement les 2 circuits pour des raisons sanitaires.

Au niveau des habitations, l'extraction de l'air vicié se fait dans les locaux sanitaires, et l'amenée d'air frais par des grilles de ventilation auto-réglables intégrées dans les menuiseries.

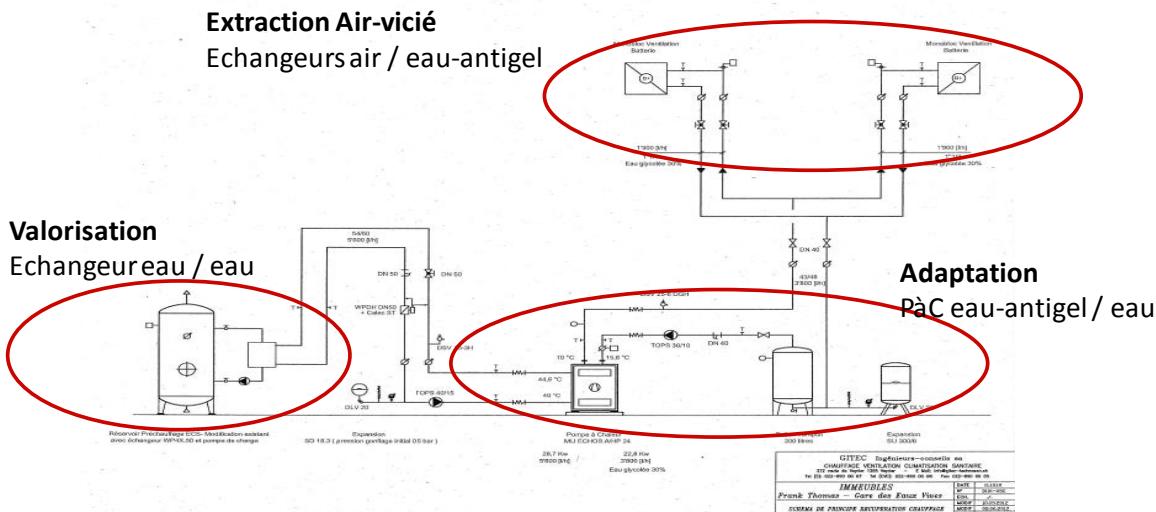


Figure 60. Les trois parties du système installé à Eaux-Vives.

Meyrin

Le second complexe résidentiel est situé à Meyrin, au chemin Salomon-Penay 6-12 & 14-22. Il a été rénové récemment et est équipé d'une installation de récupération de la chaleur sur l'air vicié avec préchauffage solaire. Cet ensemble d'une surface de référence énergétique de 5'108 m² est composé de 3 niveaux hors-sol et alimenté par une chaudière à gaz de 350 kW (pour les 2 barres). L'indice de dépense de chaleur pour l'année 2010 atteint 431 MJ/m². La Figure 61 illustre les bâtiments concernés.



Figure 61. Installation de récupération de chaleur sur l'air vicié pour le préchauffage de l'ECS avec préchauffage solaire (Meyrin).

Ce système, qui a été conçu par le même bureau d'étude que celui d'Eaux-Vives, possède de plus des panneaux solaires thermiques pour préchauffer l'eau chaude sanitaire, en priorité sur le système de récupération, comme le montre la Figure 62.

Comme dans le cas précédent, l'extraction de l'air vicié se fait dans les locaux sanitaires, et l'amenée d'air frais par des grilles de ventilation auto-réglables intégrées dans les menuiseries

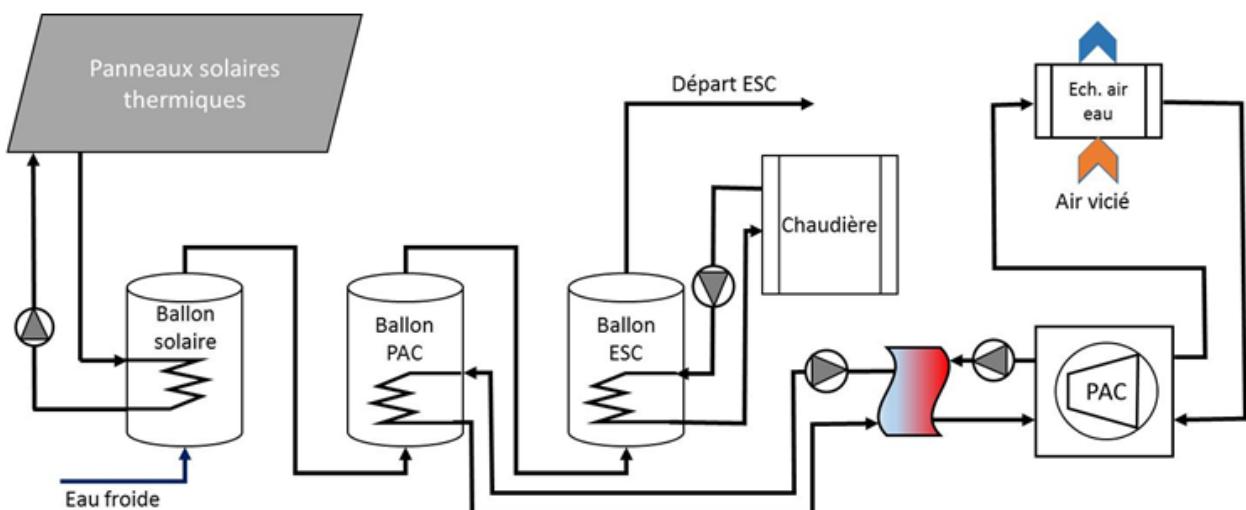


Figure 62. Schéma de principe de l'installation Meyrin.

B2.2.3 Performances prévues (design performance)

Les caractéristiques nominales des deux systèmes sont présentées sur le tableau suivant

Nominal		Unité	Eaux-Vives	Meyrin
Extraction	Débit air vicié	m ³ /h	15'000	5'100
	Taux de renouvellement	V/h	0.4	0.36
	Efficacité échangeur air	-	40%	?
	Stock intermédiaire	L	300	500
	Puissance pompe circulation	W	600	25 – 550
Adaptation Température	Puissance électrique PAC	kW	5.9	3.2
	COP PAC 5°C/35°C		4.9	4.0 - 5*
	Puissance thermique 5°C / 35 °C	kW	28.7	13 -16*
Valorisation	Efficacité échangeur eau/eau		existant	?
	Volume stock	Litres	1000	800
Complément			gaz	gaz + solaire

*) selon schéma technique – caractéristique fabricant

Tableau 13. Caractéristiques nominales des 2 installations.

Dans les demandes d'autorisation, les performances prévues étaient :

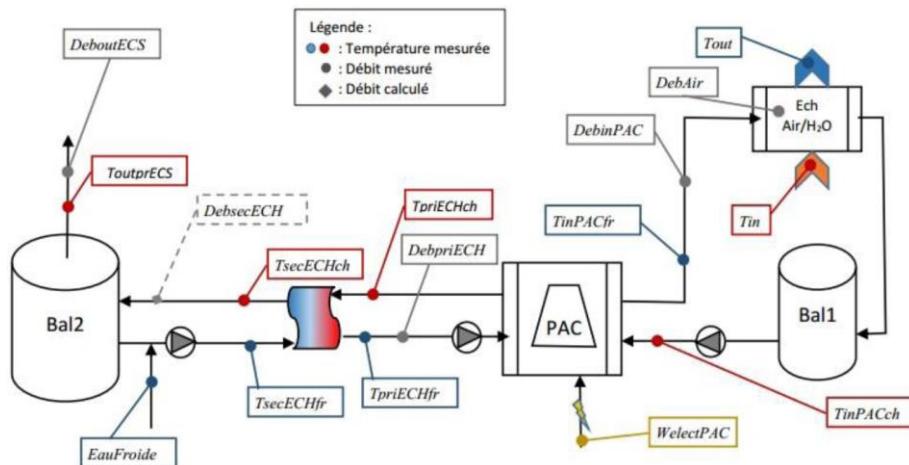
- Pour Eaux Vives, une production annuelle de chaleur de 91'000 kWh, avec un COP de 5 environ. Ceci correspond à une contribution rapportée à la SRE de 22 MJ/m².an, dont 4.5 proviendraient de l'électricité et 17.5 de la chaleur de l'air vicié. Le système devait couvrir 24% de la demande ECS.
- Pour Meyrin une production de 26'500 kWh/an était attendue pour le solaire, soit une contribution rapportée à la SRE de près de 20 MJ/m².an, ce qui équivaut à 25% de la demande ECS. Une contribution proche (29'000 kWh/an) était attendue pour le système de récupération sur l'air vicié, soit un peu plus de 20 MJ/m².an et 27% de la demande ECS. Avec un COP moyen saisonnier de 4, ce sont 7'250 kWh/an d'électricité qui devraient être utilisés pour activer la pompe à chaleur. Au total, un peu plus de la moitié de la demande ECS devait être couverte par les deux systèmes de préchauffage, le solde étant fourni par le gaz.

B2.3 Performances mesurées en conditions réelles d'utilisation

Au niveau des mesures, la première installation (Eaux-Vives) a été suivie en détail pendant plus d'une année, alors que pour la deuxième (Meyrin) nous nous sommes limités à des relevés mensuels des compteurs de chaleur existants, complétés par une campagne de mesures de températures horaire.

B2.3.1 Concept du monitoring

Le système Eaux-Vives a fait l'objet d'un travail de master (Schneider, 2015). Une quinzaine de points de mesures de l'installation Frank-Thomas 24-26 ont été relevés à cadence rapide (10") et intégrées ou moyennées par 5 minutes. La Figure 63 donne la liste et l'emplacement des sondes. La Figure 64 montre quelques photos des sondes. Une série de mesures complémentaires ont été effectuées sur la ventilation grâce à des thermomètres enregistreurs. Les mesures ont été prises du 1er juin 2014 au 31 mai 2016, et l'année de référence pour l'analyse va du 1er décembre 2014 au 30 novembre 2015.



Acronyme	Unité	Description
Tin	°C	Température air extrait
Tout	°C	Température air extrait après récupération chaleur
DebAir	m/s	Vitesse d'air extrait. Problématique, pas utilisé.
TinPACfr	°C	Température à la sortie de la PAC, côté évaporateur
TinPACch	°C	Température à l'entrée de la PAC, côté évaporateur
DebinPAC	m ³ /h	Débit d'eau glycolée circulant dans évaporateur PAC
WelectPAC	W	Puissance électrique alimentant la PAC et pompes
TpriECHfr	°C	Température à l'entrée de la PAC, côté condenseur
TpriECHch	°C	Température à la sortie de la PAC, côté condenseur
DebprimECH	m ³ /h	Débit d'eau circulant dans le condenseur PAC
TsecECHfr	°C	Température à l'entrée de l'échangeur, côté stock ECS
TsecECHch	°C	Température à la sortie de l'échangeur, côté stock ECS
DebsecECH	m ³ /h	Débit d'eau circulant dans le circuit échangeur, côté secondaire
EauFroide	l	Volume d'eau froide entrant dans ECS
ToutprECS	°C	Température eau préchauffée
DeboutECS	m ³ /h	Débit d'eau chaude soutirée

Figure 63. Emplacement et liste des sondes (installation Eaux-Vives).



Figure 64. Photos de sondes (installation Eaux-Vives).

Dans le cas de Meyrin, les relevés mensuels concernent :

- Le compteur de gaz
- La production solaire à l'entrée du stockage
- La production de la pompe à chaleur (PAC) sur air vicié
- La consommation électrique de cette PAC
- Le volume d'eau chaude consommée

Une série de mesures complémentaires ont été effectuées sur la partie eau chaude et solaire grâce à des thermomètres enregistreurs. L'année de référence va du 1^{er} janvier au 31 décembre 2015.

B2.3.2 Résultats de l'analyse du système Eaux Vives

L'analyse de ce système est essentiellement reprise de (Schneider, 2015). Le premier point à relever est le bon fonctionnement général du système, dans le sens d'une quasi-absence de panne : en deux années, seules quelques jours de non-fonctionnement ont été observés en mai 2016, mais le système a été rapidement remis en service.

Fonctionnement général de l'installation

Le fonctionnement du système est illustré sur la Figure 65.

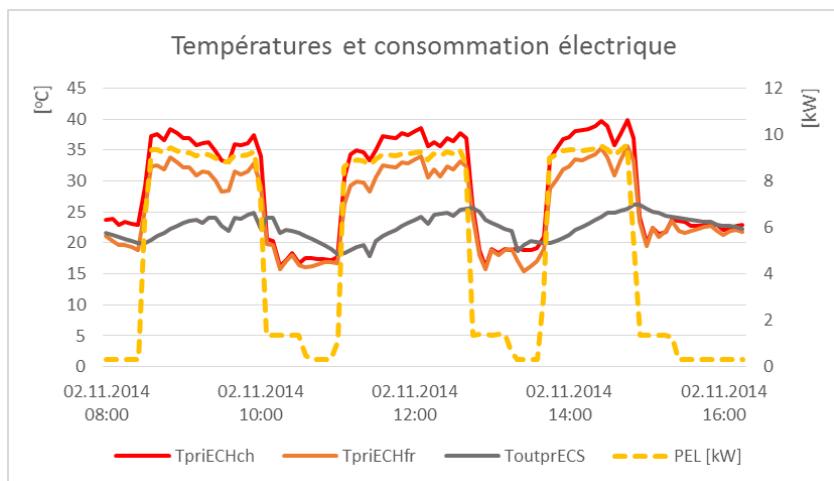


Figure 65. Exemple de fonctionnement typique du système (installation Eaux Vives).

Dès que la température du stock de préchauffage (*ToutprECS*) est en dessous de 19°C, la PAC s'enclenche, ce qui entraîne une augmentation de la puissance électrique qui atteint 9 kW. Cette dernière redescend à 1.3 kW dès que la température atteint 25 °C car la PAC s'arrête. Il reste alors encore trois pompes de circulation en fonction pendant 30 minutes, suite à quoi la puissance électrique chute à 0.33 kW, ce qui correspond à la consommation de la Pompe PAC_{in} qui fonctionne en continu. Le prochain cycle commence lorsque la température du ballon redescend à 19°C. La chaleur ainsi produite à une température de 35°C environ (*TprimECHch*) est ensuite transférée au système de production d'ECS via un échangeur de chaleur. Le complément est assuré par la chaudière.

Mesure du taux de ventilation

Deux approches complémentaires ont permis d'évaluer le débit d'air extrait.

Tout d'abord, et de façon ponctuelle, nous avons estimé le débit en mesurant la vitesse de l'air à la sortie d'un des deux systèmes d'extraction. La Figure 66 montre la grille de mesure constituée de 36 points régulièrement répartis, ainsi que les résultats de quatre mesures successives.



Mesure No.	Débit d'air [m³/s]
1	2.57
2	2.65
3	2.54
4	2.69
Moyenne	2.61

Figure 66. Système de mesure du débit de ventilation et résultats (installation Eaux-Vives).

En prenant comme hypothèse que la deuxième extraction est identique à celle mesurée, nous estimons ainsi le débit extrait à $18'800 \text{ m}^3/\text{h}$ ou $1.4 \text{ m}^3/\text{h m}^2_{\text{SRE}}$. La grande inhomogénéité de vitesse constatée entre les points de grille de mesures rend toutefois cette évaluation incertaine.

Une deuxième mesure, indirecte, a été faite par bilan thermique au niveau de l'échangeur air vicié / eau glycolée, la chaleur récupérée par l'eau glycolée (qui est mesurée) étant égale à la chaleur tirée de l'air vicié, aux pertes dans la tuyauterie près. A partir de la mesure de températures de l'air avant et après l'échangeur, on en déduit le débit d'air vicié (avec pour hypothèse que la vapeur d'eau ne condense pas, voir paragraphe suivant). Le graphique de la Figure 67 est la moyenne agrégée, selon l'heure de la journée, pour des mesures prises entre le 01/09/2014 et le 28/04/2015. Le débit semble ne pas être cadencé régulièrement.

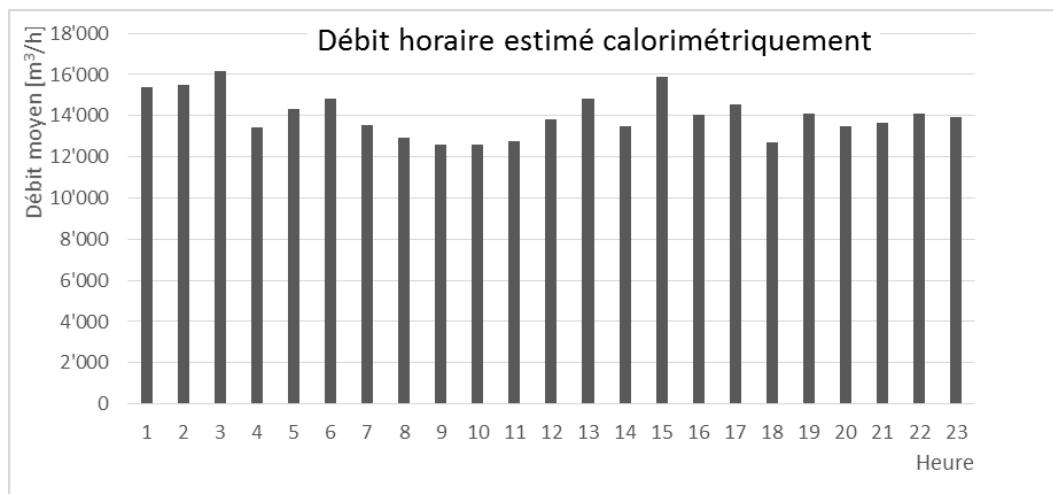


Figure 67. Débit moyen horaire, estimé par bilan thermique, période septembre – avril (installation Eaux-Vives).

La moyenne est de $14'000 \text{ m}^3/\text{h}$ et correspond à un taux de renouvellement d'air de 0.4 h^{-1} . Comme elle est basée sur le flux énergétique entrant dans le système de récupération de chaleur sur l'air extrait et

qu'elle résulte de l'analyse sur une longue période, cette méthode d'estimation a été préférée à la précédente.

Sous-système d'extraction

Comme on peut le voir sur la Figure 68, l'énergie thermique absorbée à l'évaporateur de la PAC abaisse la température de l'eau glycolée (de $TinPACch$ à $TinPACfr$). Cette température est ensuite remontée par le passage dans l'échangeur de chaleur couplé à l'air extrait dont la température baisse (de Tin à $Tout$). La baisse de température de l'air vicié dans l'échangeur est peu importante (6 K environ) et la condensation très peu probable.

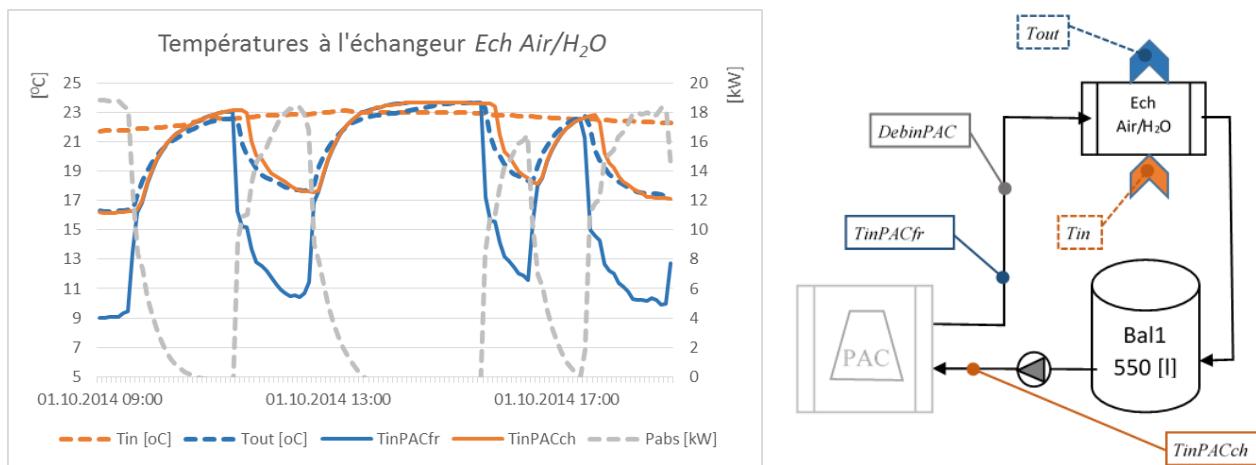


Figure 68. Température et puissance thermique échangée à l'échangeur air/eau (installation Eaux-Vives).

Le volume du tampon $Bal1$ est connu et vaut 300 litres. Il faut y ajouter le volume d'eau contenu dans les tuyaux reliant la chaufferie à la toiture pour avoir une estimation correcte de l'effet tampon de $Bal1$, soit un total de 550 litres.

Sous-système d'adaptation des températures (PAC)

Le modèle de la PAC installée est une MU ECHOS A HP 24 (www.western.nl). La Figure 69 montre l'évolution des températures lors de quatre cycles de fonctionnement.

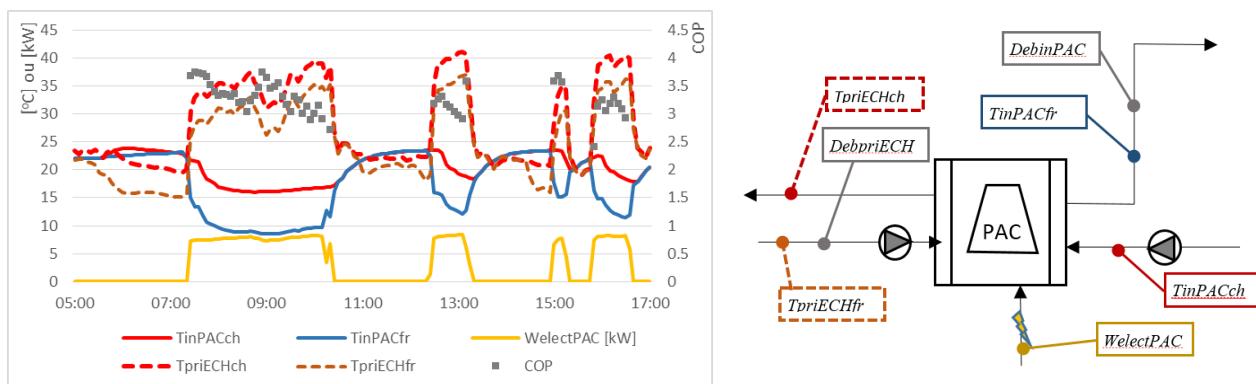


Figure 69. Températures, puissance électrique et COP mesurés sur la PAC (installation Eaux-Vives).

Les caractéristiques techniques du fabricant sont représentées dans le graphique de gauche de la Figure 70. Une relation quadratique entre le COP et la différence de température entre les sorties du condenseur et de l'évaporateur sont mis en évidence dans le graphique de droite de cette même figure.

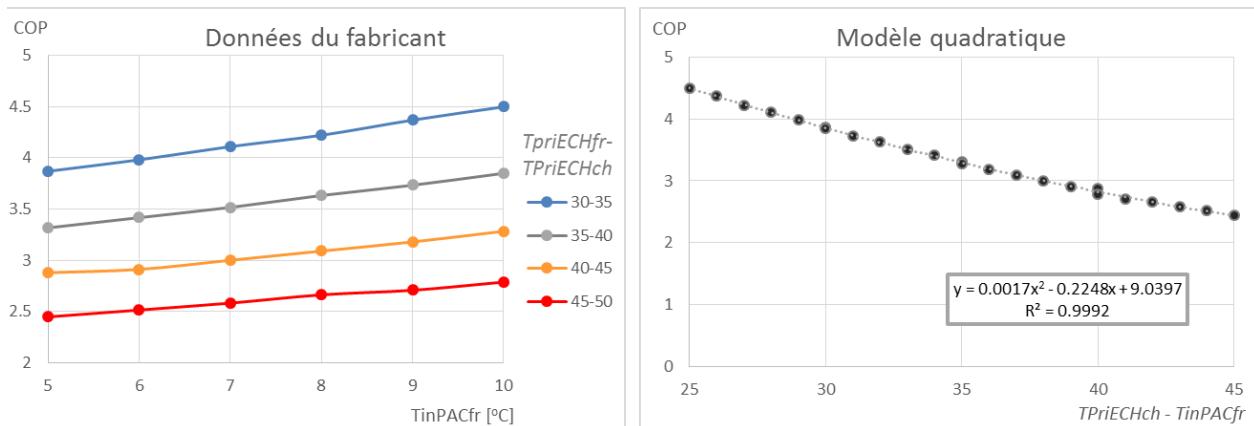


Figure 70. COP en fonction des températures selon tests du fabricant (installation Eaux-Vives).

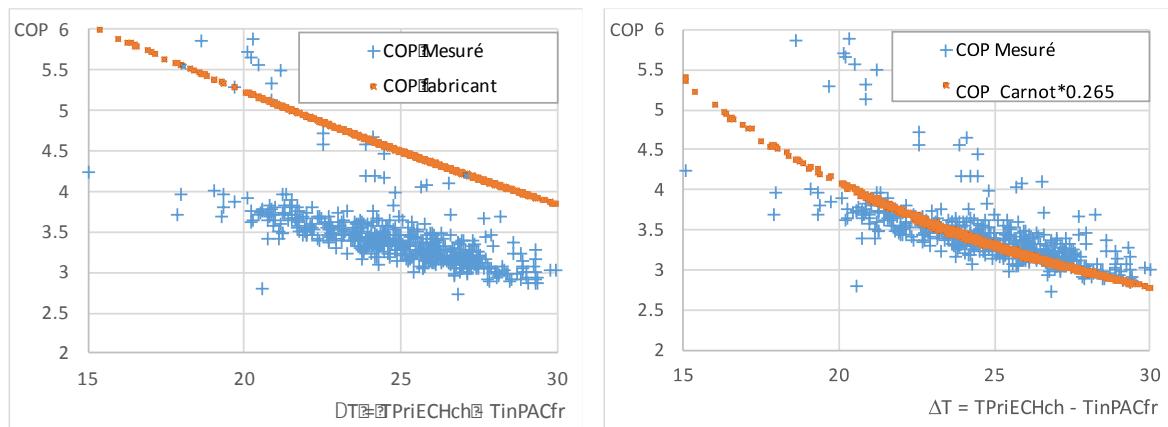


Figure 71. Comparaison des COP mesurés avec ceux donnés par le fabricant (gauche) et avec les COP de Carnot (droite), pour différents écarts de température entrée – sortie (installation Eaux-Vives, basé sur des mesures du 16 octobre au 16 novembre 2014).

Dans la Figure 71 à gauche, la comparaison des COP mesurés avec ceux du fabricant (via le modèle quadratique) montre une différence importante (- 25%). A droite, cette même figure expose la bonne corrélation entre les mesures du COP et le rendement de Carnot, calculé avec les deux températures extrêmes $TinPACfr$ et $TPriECHch$ et réduit par une efficacité technique de 0.265.

Afin de consolider ce résultat, nous avons détecté un ensemble de points où la PAC fonctionne en conditions très proches des conditions standards. Le procédé est illustré dans la Figure 71, avec la détection d'une période allant de 8 h25 à 9 h20.

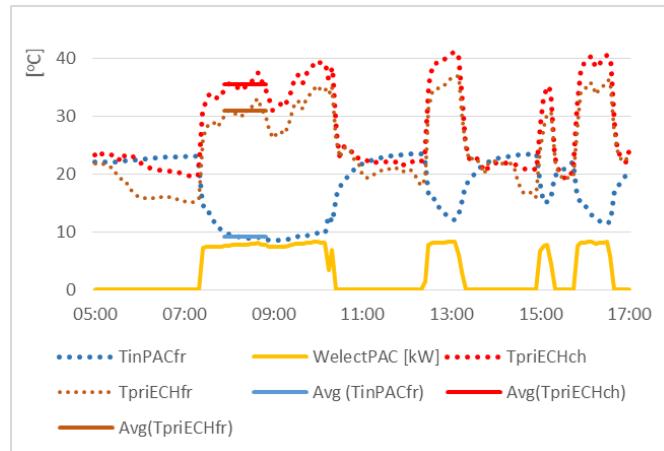


Figure 72. Illustration de la recherche de périodes stationnaires (installation Eaux-Vives).

Pour les périodes identifiées, nous donnons dans le Tableau 14 les performances mesurées et annoncées par le fabricant. La valeur du COP mesurée est systématiquement inférieure d'une unité à celle donnée par le fabricant. Aucune explication convaincante n'a été trouvée à cet état de fait.

Début période	Fin période	AVG TinPACfr [°C]	AVG TpriECHfr [°C]	Q Pac Th mes [kWh]	Q Pac El mes [kWh]	COP Mes	Lab TEvap out [°C]	Lab T Cond In [°C]	Q Pac Th lab [kWh]	Q Pac El lab [kWh]	COP lab
2014-10-24 07:40	2014-10-24 08:35	9.67	30.33	25.89	7.68	3.37	10.00	30.00	24.30	5.40	4.50
2014-10-30 08:25	2014-10-30 09:20	9.72	29.52	26.15	7.57	3.45	10.00	30.00	24.30	5.40	4.50
2014-10-30 08:50	2014-10-30 09:45	9.69	29.99	26.08	7.65	3.41	10.00	30.00	24.30	5.40	4.50
2014-11-30 10:50	2014-11-30 11:45	9.36	30.32	25.38	7.50	3.38	9.00	30.00	23.60	5.40	4.37
2014-12-11 09:25	2014-12-11 10:20	9.17	30.35	25.47	7.54	3.38	9.00	30.00	23.60	5.40	4.37
2014-12-11 09:30	2014-12-11 10:25	9.16	30.31	25.57	7.53	3.40	9.00	30.00	23.60	5.40	4.37
2014-12-12 08:35	2014-12-12 09:30	9.52	29.86	25.69	7.45	3.45	10.00	30.00	24.30	5.40	4.50
2014-12-21 09:40	2014-12-21 10:35	10.13	29.91	25.86	7.58	3.41	10.00	30.00	24.30	5.40	4.50

Tableau 14. Performance de la PAC mesurée et annoncées par le fabricant (installation Eaux-Vives).

Sous-système de valorisation (en aval de la PAC)

La chaleur issue de la PAC est transférée au stock de préchauffage de l'ECS grâce à un échangeur de chaleur. Le modèle installé est un Alfa Laval CB 30-24M. Basé sur les mesures de la période allant du 16/10/2014 au 16/11/2014, l'efficacité est estimée à 50%, en tenant compte du rapport de débit de 2 (Figure 73).

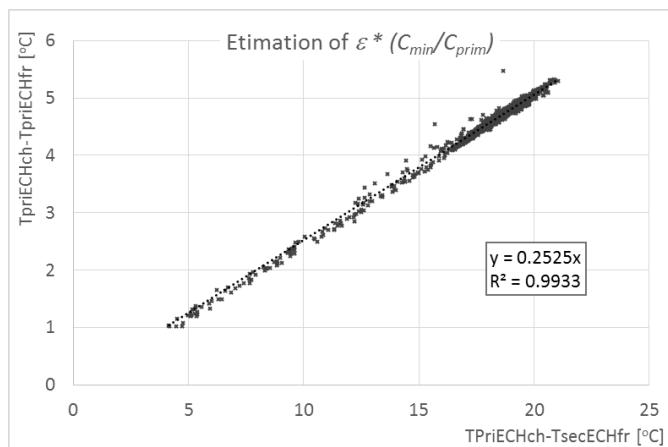


Figure 73. Détermination des caractéristiques de l'échangeur eau-eau (installation Eaux-Vives).

Indicateurs de performance

Les performances globales du système sont définies par le COP de la PAC et le COP du système, qui inclut les pompes de circulation nécessaires au fonctionnement de la PAC. Elles sont montrées sur la Figure 74, sur une base hebdomadaire. Comme attendu, le COP de la PAC diminue lorsque le taux de couverture assuré par la récupération sur air vicié augmente, du fait de l'augmentation de la température de préchauffage ECS. Concernant le COP système, il a une légère tendance à augmenter avec le taux de couverture dans un premier temps, puis il baisse lorsque celui-ci est supérieur à 25%. L'augmentation initiale provient de ce que la performance du système inclut la puissance des pompes auxiliaires, dont une est constamment en marche : cette contribution ruban défavorise les faibles taux de couverture. Dans un deuxième temps, lorsque le taux de couverture augmente, la baisse du COP lié à l'augmentation des températures de travail de la PAC prend le dessus, et le COP système diminue à son tour.

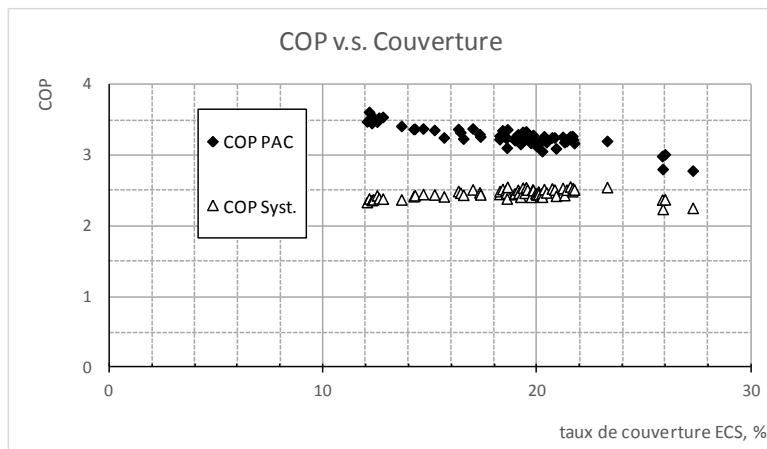


Figure 74. Variation des COP hebdomadaires avec le taux de couverture (installation Eaux-Vives, 1^{er} décembre 2014 au 30 novembre 2015).

Les performances mensuelles sont reportées sur la Figure 75. Les énergies moyennes mensuelles sortant de la PAC ($QPacOut$) et l'électricité l'alimentant ($Weltot$) sont exprimées en MJ/m².an, ce qui permet une base commune, indépendante de la durée du mois. La production issue de la récupération sur air vicié présente un minimum en été du fait de la baisse de consommation estivale et de l'augmentation de la température de l'eau froide incidente. Le taux de couvertures situe entre 20 et 25 %, sauf en été où il peut descendre au-dessous de 15%. Les COP suivent le comportement identifié précédemment.

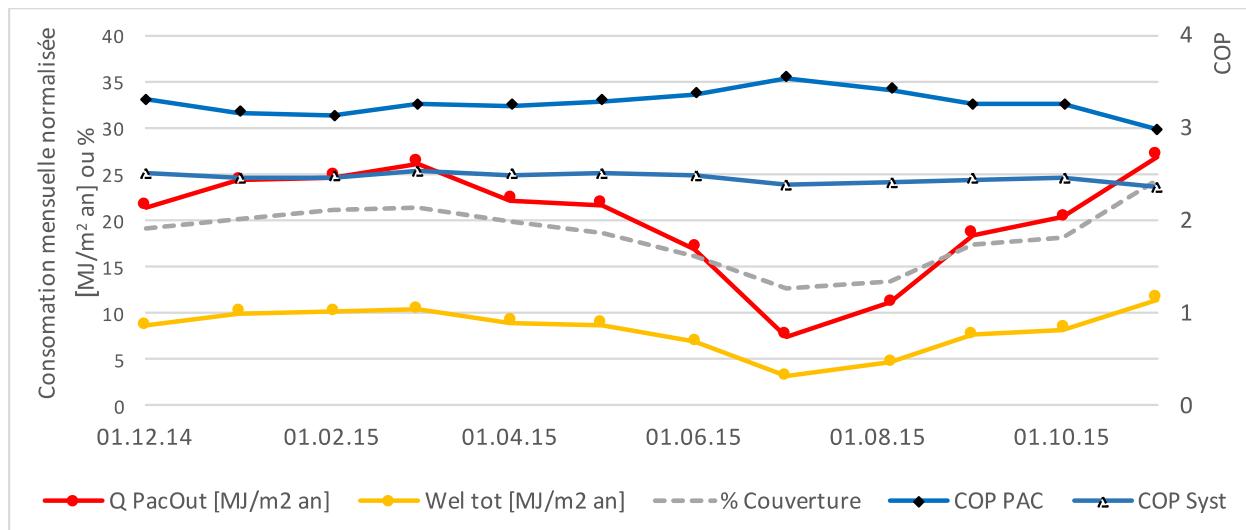


Figure 75. Indicateurs mensuels de performance et couverture (installation Eaux-Vives).

La comparaison des résultats observés et prédicts sont donnés sur le Tableau 15, en valeurs annuelles.

	Mesure			Projet		
	MWh/an	MJ/m ² .an		MWh/an	MJ/m ² .an	
Q ECS tot	410.7	107.0	100%	386.0	100.0	100%
Q PAC out	77.7	20.2	19%	91.0	23.7	24%
Q air	53.6	14.0	13%	72.8	19.0	19%
Q élec PAC	24.1	6.3	6%	18.2	4.7	5%
COP PAC	3.2			4.0		
Q élec sys	31.6	8.2	8%	18.2	4.7	5%
COP Sys	2.5					
Gaz	333.0	86.7	81%	295.0	76.8	76%

Q ECS tot : demande d'ECS

Q PAC out : chaleur sortie de la PAC

Q air : chaleur récupérée sur l'air vicié

Q élec PAC : consommation électrique de la PAC

Q élec sys : consommation de la PAC et des auxiliaires

Tableau 15. Résultats annuels observés et prédicts du système de préchauffage de l'ECS par l'air vicié (installation Eaux-Vives).

En considérant l'électricité comme étant renouvelable, le taux de couverture renouvelable est d'environ 20% (à Genève, 100% de l'électricité est labellisée). Le COP système est inférieur aux prévisions, suite à deux causes :

1. La PAC ne fonctionne pas comme prévu (moins un point de COP)
2. Le choix de ne pas modifier l'échangeur de chaleur entre la PAC et le stock de préchauffage au moment des travaux résulte en une augmentation d'une dizaine de degrés des niveaux de température en aval de la PAC.

Modélisation du système

Dans le souci de tirer un maximum d'informations de cette expérience, nous avons réalisé une modélisation détaillée du système sur la base du logiciel Trnsys, qui permet de paramétrer les composants et leurs liens de façon conviviale. (Schneider, 2015).

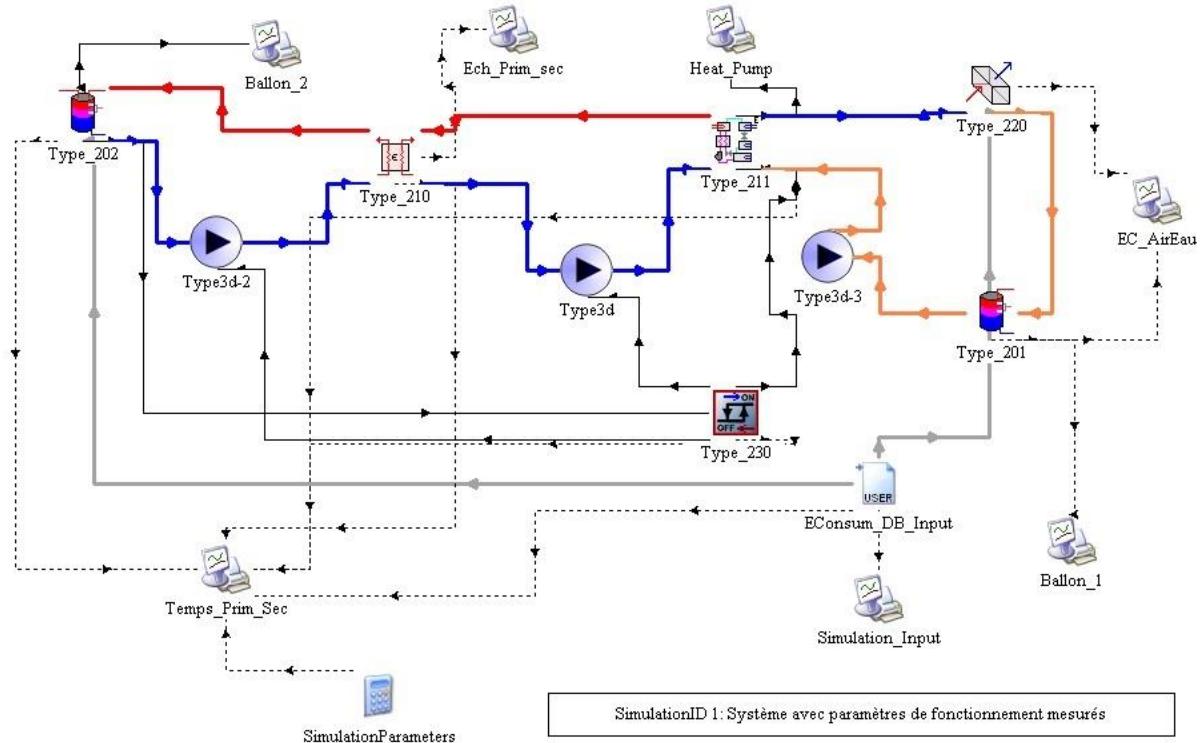


Figure 76. Modèle Trnsys du système de récupération de chaleur (installation Eaux-Vives).

Validation de la modélisation

La Figure 77 permet de comparer les données simulées aux données réelles, pour une journée choisie. Dans le cas de la simulation, les deux premiers cycles de chauffe sont réunis en un seul et le dernier est un peu décalé. Néanmoins les dynamiques des deux systèmes sont similaires.

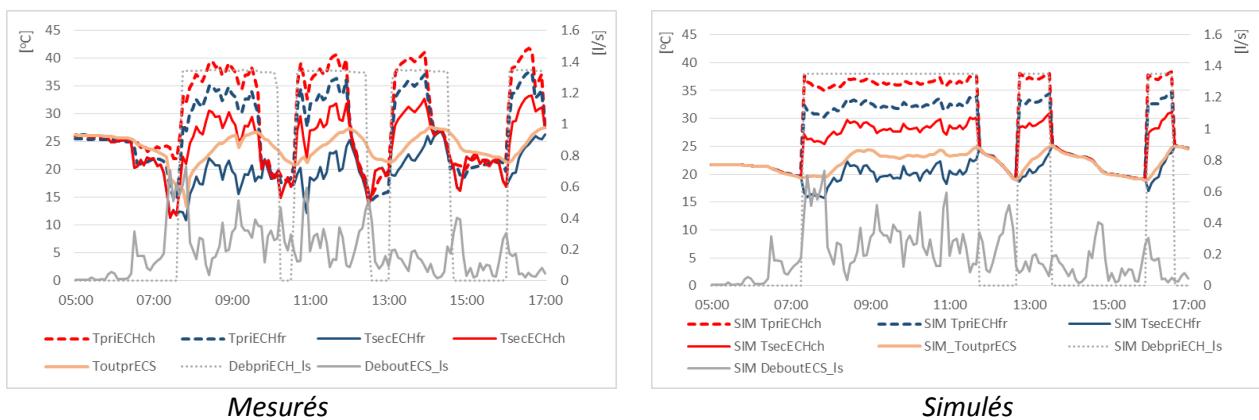


Figure 77. Mesure versus simulation (installation Eaux-Vives, 17 décembre 2014).

Une façon appropriée de valider le modèle consiste à comparer des indicateurs journaliers tel que le COP système, la quantité de chaleur produite et l'électricité consommée.

Les simulations de la Figure 78 sont effectuées par pas de temps de 5 minutes sur quatre semaines, choisies à des périodes différentes pour inclure les effets saisonniers. Les semaines choisies débutent aux dates suivantes : 15/10/2014, 15/12/2014, 15/01/2015 et 15/03/2015. L'accord est excellent.

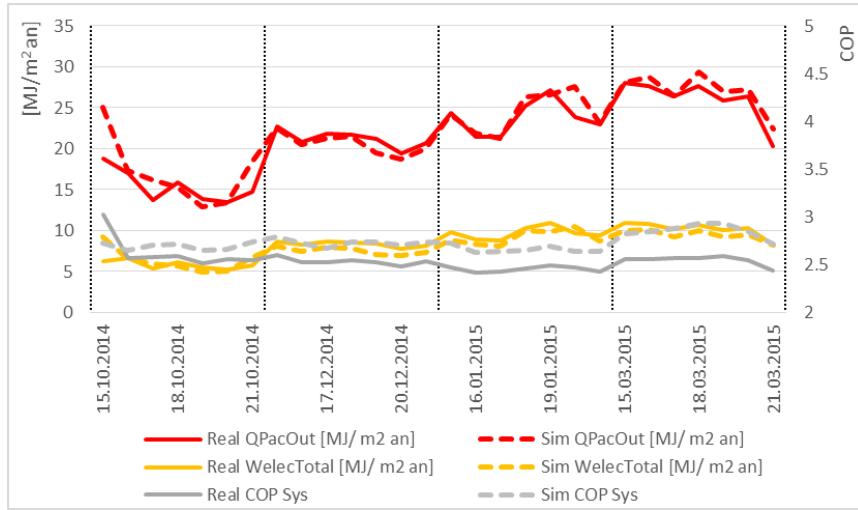


Figure 78. Comparaison des indicateurs de performance entre systèmes réel et simulé (installation Eaux-Vives).

Enfin, sur une base annuelle, les écarts observés sur les indicateurs globaux de performance sont faibles (Tableau 16).

	COP PAC	COP système	Taux de couverture	Température min, sortie PAC (°C)
Mesure	3.2	2.5	19.0%	8.2
Simulation	3.5	2.8	19.7%	8.5

Tableau 16. Validation du modèle de simulation (installation Eaux-Vives).

B2.3.3 Résultats de l'analyse du système Meyrin

Résultats bruts

La différence essentielle entre ce système et le précédent est la présence de 50 m² de panneaux solaires thermiques en amont du stock de préchauffage via la PAC sur air vicié.

Les résultats, basés sur des relevés mensuels, sont montrés sur la Figure 79. Ils concernent principalement la complémentarité entre les deux ressources renouvelables, exprimées ici en données relatives.

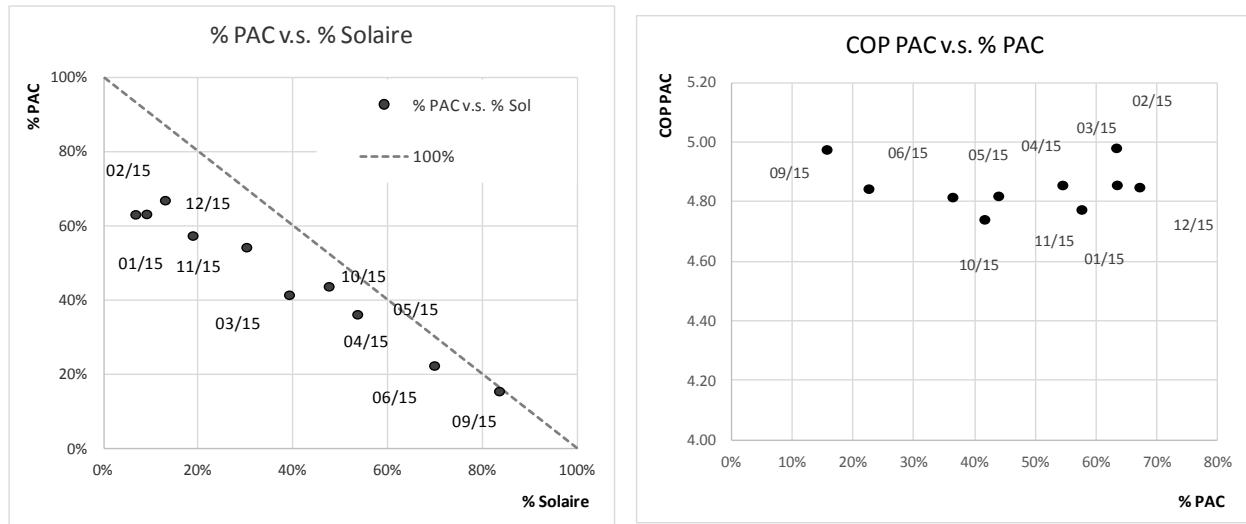


Figure 79. Résultats mensuels, installation Meyrin. A gauche, répartition entre solaire, PAC sur air vicié et gaz. A droite, évolution du COP en fonction du taux de couverture de la PAC sur air vicié.

Sur le graphique de gauche, on remarque une bonne complémentarité entre les deux systèmes : en hiver, où le solaire est peu présent, la PAC est très active et couvre environ 2/3 des besoins. En été, on a la situation inverse. La contribution du gaz varie quant à elle entre 30% en hiver à 0% en été.

Sur le graphique de droite, et contrairement au système Eaux-Vives, le COP PAC reste constant avec le taux de couverture. En hiver, lorsque la PAC est mise le plus à contribution, la température moyenne de fonctionnement n'est pas plus élevée que lors des jours d'été, où la PAC fonctionne occasionnellement et assure le plus souvent le chauffage finale de l'ECS.

L'électricité des pompes auxiliaires n'a pas été mesurée dans ce système. On peut juste préciser que le système (conçu après celui d'Eaux-Vives, par le même bureau d'ingénieur) a été amélioré grâce à des pompes mieux dimensionnées et mieux cadencées. D'un autre côté, le progrès du COP de la PAC diminue la consommation électrique de celle-ci et augmente donc l'impact relatif des auxiliaires. Ainsi, la différence entre le COP PAC et le COP système, qui était de l'ordre de 0.7 pour l'installation Eaux-Vives, ne devrait pas énormément changer.

Au niveau annuel, les principaux indicateurs sont donnés dans le Tableau 17. La comparaison avec les prévisions est également indiquée.

	Mesure			Projet		
	MWh/an	MJ/m ² .an		MWh/an	MJ/m ² .an	
Q ECS tot	85.6	60.3	100%	106.4	75.0	100%
Q Sol	36.7	25.9	43%	26.5	18.7	25%
Q PAC out	36.7	25.9	43%	29.0	20.4	27%
<i>Q air</i>	<i>29.1</i>	<i>20.5</i>	<i>34%</i>	<i>21.8</i>	<i>15.3</i>	<i>20%</i>
<i>Q élec</i>	<i>7.6</i>	<i>5.3</i>	<i>9%</i>	<i>7.2</i>	<i>5.1</i>	<i>7%</i>
COP PAC	4.9			4 *		
Gaz	12.2	8.6	14%	50.9	35.9	48%

Q ECS tot : demande d'ECS

Q Sol : chaleur solaire délivrée au stock de préchauffage

Q PAC out : chaleur sortie de la PAC

Q air : chaleur récupérée sur l'air vicié

Q élec PAC : consommation électrique de la PAC

* Valeur donnée dans la demande d'autorisation de rénovation

Tableau 17. Résultats annuels et comparaison avec les prédictions (installation Meyrin).

De façon générale, les résultats obtenus sont conformes aux prédictions, avec cependant quelques différences :

- La demande réelle d'eau chaude sanitaire est basse et bien inférieure aux normes,
- Le solaire a correctement fonctionné (environ 700 kWh par m² de capteur). Vu la faible demande en eau chaude, il représente plus de 40% de la chaleur pour l'ECS. Notons que les 500 kWh par m² de capteur prévus est une valeur conservatrice, valable pour les maisons individuelles avec une surface de collecteurs solaires de quelques m² et une demande plus fluctuante.
- Le système de récupération étudié a fourni quasiment la même quantité d'énergie que le solaire, avec un COP PAC de 4.9. Cette excellente valeur est due aussi bien à la qualité intrinsèque du matériel qu'à son usage en conditions optimale. Pour une quantité d'électricité très comparable à ce qui était prévue, ceci permet de fournir beaucoup plus de chaleur qu'attendu. Il s'agissait de la deuxième installation effectuée par le bureau d'étude, après celle des Eaux-Vives qui a été analysée plus haut, l'amélioration des résultats est notable.
- Enfin, et par conséquence des points précédents, le complément en gaz est réduit drastiquement et passe de près de 50% de taux de couverture pour Eaux-Vives, à moins de 15% dans le cas présent.

Simulation numérique

La simulation du système Meyrin a été effectuée grâce au modèle développé pour le système Eaux Vives (voir plus haut), avec les adaptations suivantes :

- Les valeurs des paramètres divers sont ceux relevés dans l'installation Meyrin.
- La valeur de la température d'eau froide a été remplacée par la température de sortie du ballon de stockage solaire, mesurée en continu.
- La distribution temporelle de la demande d'eau chaude est celle de l'installation Eaux –Vives, normalisée à la demande mensuelle observée.

Les résultats en valeurs annuelles sont donnés dans le Tableau 18, qui appelle les remarques suivantes :

- Par construction, aussi bien la demande totale que la contribution du solaire sont identiques (input du modèle).
- Le fonctionnement en usage réel du système de récupération est bien reproduit, spécialement les apports annuels très proches de ceux observés.

	Mesure		Simulation	
	MWh/an		MWh/an	
Q ECS tot	85.6	100%	85.6	100%
Q Sol	36.7	43%	36.7	43%
Q PAC out	36.7	43%	36.1	42%
Q air	29.1	34%	28.8	34%
Q élec	7.6	9%	7.3	9%
COP PAC (-)	4.9		4.9	
Gaz	12.2	14%	12.8	15%

Tableau 18. Résultats annuels, mesures et simulation (installation Meyrin).

Complémentarité avec le solaire thermique

Pour mieux cerner la complémentarité entre le solaire thermique et le système de récupération sur air vicié, nous avons simulé l'installation sans collecteurs solaires, c'est-à-dire en considérant comme température d'entrée du stock de préchauffage par la PAC la température de l'eau froide. La comparaison avec le système Meyrin simulé est donnée sur le Tableau 19 :

	Avec solaire		Sans solaire	
	MWh/an		MWh/an	
Q ECS tot	85.6	100%	85.6	100%
Q Sol	36.7	43%	0	0%
Q PAC out	36.1	42%	73.5	86%
Q air	28.8	34%	59.0	68%
Q élec	7.3	9%	14.5	17%
COP PAC	4.93		5.08	
Gaz	12.8	15%	12.2	14%

Tableau 19. Résultats des systèmes avec et sans panneaux solaires (installation Meyrin).

On constate qu'en absence d'installation solaire thermique, le défaut de production solaire pourrait être intégralement assuré par la PAC, dont le COP augmenterait même légèrement, grâce aux températures d'arrivée d'eau plus basse en absence de préchauffage solaire.

Analyse économique

L'évaluation économique du coût de l'énergie s'est focalisée sur l'installation de Meyrin car ce système est le second réalisé par le bureau d'étude, qui a pu ainsi profiter de l'expérience du système précédent.

L'évaluation du coût du kWh économisé a été réalisée également dans la situation où il n'y aurait pas eu de collecteurs solaires. Les quantités d'énergie économisées sont issues du paragraphe précédent.

Concernant les coûts, deux approches ont été utilisées :

- La première, dite « en coût moyen », est basée sur la décomposition des coûts renseignée dans la demande d'autorisation de rénovation, soit 307'500 CHF TTC. On considère ici le système de production d'ECS renouvelable implanté comme un élément de la rénovation thermique du bâtiment, prenant ainsi une partie de l'ensemble des coûts fixes ou partagés (échafaudages, électricité chantier...). Notons que cette façon de faire est très dépendante du contexte de la rénovation (globale, par étape...) et du choix de la clé de répartition pour certaines dépenses partagées.
- La seconde, dite « en coût marginal », ne prend en compte que les coûts additionnels nécessaires à réaliser le système de récupération. Il s'agit donc de la différence entre ce qu'a coûté la rénovation et ce qu'elle aurait coûté si le système en question n'avait pas été réalisé, toutes choses égales par ailleurs. Par exemple, les coûts d'échafaudage et du percement du toit ne sont pas intégrés dans la mesure où d'autres interventions en avaient besoin. Par ailleurs, on ne tient pas compte de l'obligation de produire 30% de la chaleur ECS par du renouvelable et du coût d'un autre système permettant d'y répondre. L'évaluation « en coût marginal » est donc celle de la seule technologie mise en place – mais dans le contexte d'une rénovation spécifique. Ces coûts ont été estimés par l'ingénieur en charge de la conception du système. Ils se montent à 140'000 CHF TTC. La grande différence avec le coût moyen s'explique essentiellement par la non prise en compte des coûts des échafaudages, du percement du toit et de l'installation électrique alimentant le monobloc de ventilation situé sous le toit et qui loge la batterie de récupération.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 20, avec pour hypothèses un taux d'intérêts de 4% et un prix de l'électricité : 23 cts/kWh.

	Coût marginal		Coût moyen	
	Avec solaire	Sans solaire	Avec solaire	Sans solaire
Surcoût (CHF)	140'000	140'000	307'500	307'500
Durée (ans)	20 ans	20 ans	20 ans	20 ans
Annuité (CHF/an)	10'300	10'300	22'630	22'630
Maintenance (CHF/an)	1'500	1'500	1'500	1'500
Électricité (kWh/an)	7'570	14'300	7570	14'300
Coût électricité (CHF/an)	1'740	3'290	1'740	3'290
Coût annuel (CHF/an)	13'540	15'090	25'870	27'420
Economie (kWh/an)	36'700	72'800	36'700	72'800
Coût du kWh (CHF/kWh)	0.37	0.21	0.70	0.38

Tableau 20. Estimation des coûts du kWh économisé en coût moyen et en coût marginal (installation Meyrin).

Les coûts marginaux sont évidemment inférieurs mais le coût moyen représente mieux l'approche globale de la rénovation – qui est plus qu'un simple empilement de solutions issues d'un catalogue et considérées individuellement (voir volet A). La notion de coûts du kWh économisé est donc plus complexe qu'il n'y paraît dès que l'on désire désagréger un coût global en diverses composantes liées à des interventions particulières mais réalisées dans une opération globale.

Il faut prendre cet exercice d'évaluation avec beaucoup de prudence car les coûts des interventions sont très dépendants du contexte. Il montre tout de même que la présence du solaire thermique n'est pas judicieux économiquement parlant.

B2.4 Etude de sensibilité et règle de pré dimensionnement

A partir des connaissances développées plus haut et dans le but de tenter de répondre aux diverses questions posées dans l'introduction, nous avons réalisé deux études par simulation numérique, dans le but de :

1. Etudier la complémentarité entre le solaire photovoltaïque et le système étudié,
2. Ebaucher une « règle du pouce » qui permette de pré dimensionner un système selon les conditions propres du site qui l'abrite et des objectifs fixés – en particulier le taux de couverture du système de récupération par rapport à la demande d'ECS.

Complémentarité avec le photovoltaïque

Afin de mieux cerner la complémentarité entre la récupération sur l'air vicié et le solaire photovoltaïque, nous nous sommes basés sur le cas Meyrin. Deux approches de dimensionnement ont été comparées :

- Un système photovoltaïque de surface 2.5 plus importante que le solaire thermique (120 m^2), qui permettrait d'obtenir une production électrique comparable à la chaleur issue du solaire thermique, pour un coût grosso modo identique.
- Un système photovoltaïque de surface maximum, couvrant presque totalement le toit (580 m^2).

Nous avons pris l'hypothèse d'un rendement du PV de 18%, correspondant aux meilleures installations actuelles, avec un toit plein sud incliné à 35° .

Les résultats sont montrés dans le tableau ci-dessous.

Paramètres					
Surface PV	m ²	0	0	120	580
Surface solaire thermique	m ²	50	0	0	0
Résultats					
COP annuel PAC	PAC	4.9	5.1	5.1	5.1
Taux de couverture ECS via PAC	-	42%	86%	86%	86%
Electricité pour la PAC	MWh/an	7.3	14.5	14.5	14.5
PV, production totale	MWh/an			31.4	151.5
PV, autoconsommation (PAC)	MWh/an			7.0	8.7
PV, solde (cons. bâtiment + injection réseau)	MWh/an			24.3	142.8
Electricité PAC, achat sur réseau	MWh/an	7.3	14.5	7.5	5.8
Taux de couverture PAC via PV	-			49%	60%

Tableau 21. Etude de sensibilité sur la complémentarité entre différents types de captage solaire (installation Meyrin).

Comme vu précédemment, l'absence de solaire thermique permet au système de récupération un fonctionnement tout au long de l'année sans grandement faire varier la bonne performance de la PAC. Un taux de couverture de plus de 80% est atteint. Si on investit dans du solaire photovoltaïque plutôt que thermique, on arrive à couvrir la moitié de l'électricité de la PAC (principalement en été) et les 2/3 de la production électrique solaire sont vendus sur le réseau, ou consommés par d'autres usages du bâtiment. Un usage complet du toit par du photovoltaïque permet d'atteindre un taux de couverture solaire pour l'électricité de la PAC de plus de 60%, avec un surplus conséquent de production d'électricité pour le réseau ou le bâtiment.

Dans la configuration de bâtiment retenue pour cette étude (bâtiment Meyrin, 3 niveaux), la valeur ajoutée du PV par rapport au solaire thermique est donc évidente :

- L'approvisionnement d'électricité depuis le réseau est quasiment identique.
- Le PV permet, pour un investissement semblable, une production d'électricité supplémentaire significative, qui pourrait être absorbée localement pour les communs d'immeubles ou les occupants.

Toutefois, si on considère un immeuble beaucoup plus élevé (comme celui de Eaux-Vives), la surface de toit disponible risque de ne pas être suffisante pour installer le PV nécessaire (2.5 fois plus de surface que la captation thermique). Dès lors, l'avantage du PV serait moins flagrant et resterait à étudier au cas à cas.

Règle de pré-dimensionnement

Pour terminer, nous avons développé une règle de pré dimensionnement de systèmes de récupération de la chaleur de l'air vicié pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire. Pour ceci, nous avons simulé un grand nombre de systèmes de ce type, sans solaire thermique pour l'ECS, et correctement conçu. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les deux études de cas quant aux conditions d'usage de ces systèmes (taux de ventilation, température de l'air vicié et demande d'ECS), quant aux contraintes spatiales et d'intégrations liées à un bâtiment existant et quant au fonctionnement observé des composants.

Les hypothèses retenues pour ces simulations sont les suivantes :

- La demande d'eau chaude annuelle est fixée à 100 MJ/m²
- Une surface par habitant de 55 m² SRE est considérée (valeur observée à Eaux-Vives).
- La température de l'air extrait correspond à celle mesurée dans l'installation Eaux-Vives.
- L'efficacité de l'échangeur de chaleur air / eau vaut 80%.
- La pompe à chaleur est de bonne qualité, comparable à celle installée à Meyrin.
- L'efficacité de l'échangeur eau/eau à la sortie de la PAC vaut 80%.
- Le stock d'ECS dédié au système de préchauffage à partir de l'air vicié n'est pas stratifié.
- La dynamique de soutirage d'eau chaude sanitaire considérée est celle mesuré à Eaux-Vives.
- La consommation électrique des auxiliaires PAC entrant dans le calcul du COP système sont les mêmes qu'à Eaux Vives.

Pour élargir le domaine d'applicabilité de la règle du pouce, nous avons par ailleurs considéré 3 taux d'extraction d'air vicié : 0.38, 0.50 et 0.62 h⁻¹.

Les indicateurs retenus sont le COP de la PAC et le taux de couverture du système. Le COP système n'a pas été retenu dans cette règle de dimensionnement car jugé comme trop dépendant des conditions dans lesquelles s'opèrent la rénovation (longueur et diamètre de la tuyauterie de connexion entre PAC et monobloc d'extraction, possibilités de s'intégrer à la régulation, ...).

Deux paramètres principaux de dimensionnement ont été définis :

- La taille relative du stockage dédié à la PAC (exprimé en litres par habitant)
- La puissance relative de la pompe à chaleur (exprimé en W par habitant).

Les autres paramètres sont de moindre importance **pour autant qu'ils aient été correctement choisis** (particulièrement pour la qualité intrinsèque de la pompe à chaleur et pour les échangeurs de chaleurs).

Sur la Figure 80, les deux indicateurs sont tracés sous forme d'iso lignes, en fonction des deux paramètres de dimensionnement.

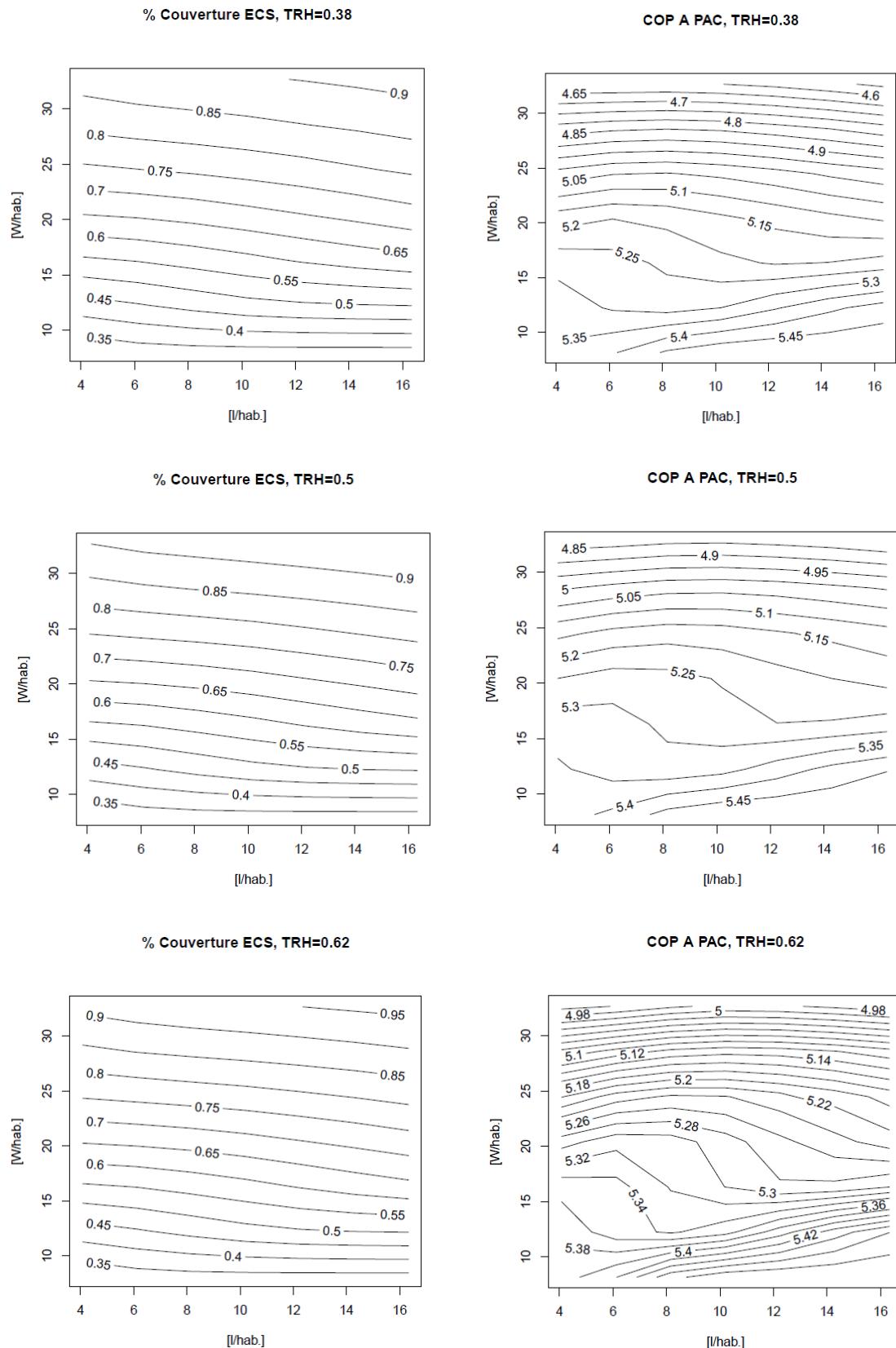


Figure 80. Taux de couverture ECS (gauche) et COP PAC (droite), en fonction de la taille relative du stockage dédié à la PAC (axe vertical) et de la puissance relative de la pompe à chaleur (axe horizontal), pour divers taux de renouvellement d'air (TRH, en h^{-1}).

Par exemple, pour le système Meyrin, le bâtiment abrite 117 personnes, le volume du stockage de 800 litres correspond à une taille relative de 6.8 l / hab. et la puissance de la PAC de 3.2 kW à une puissance relative de 27.3 W/hab. Avec un taux de ventilation de 0.38, on lit dans le diagramme correspondant un taux de couverture de 80% et un COP PAC de 4.9, à comparer aux valeurs mesurées de 86% et 5.1.

Concernant le pré-dimensionnement de systèmes de récupération de chaleur sur air vicié pour le préchauffage d'ECS via une PAC pour, on peut déduire de cette étude les indications suivantes :

- Dimensionner généreusement les échangeurs de chaleur et choisir une PAC de bonne qualité,
- Le volume du stock dédié au préchauffage doit être d'environ 5 litres par habitant; il n'est pas nécessaire de prévoir trop important si le bâtiment est d'une certaine taille.
- La puissance de la PAC est en fait l'élément le plus sensible. A cet égard, une puissance importante (qui permet un grand taux de couverture) a tendance à dégrader le COP (étant donné un préchauffage ECS à plus haute température), et vice-versa. Pour fixer les idées, une puissance de l'ordre de 20 W/hab permet d'atteindre un COP PAC de 5 tout en couvrant plus de 60% de la demande d'eau chaude.
- La présence d'un système PV de taille suffisante pourrait partiellement lever ce conflit, dans la mesure où il permet de viser un haut taux de couverture sans trop impacter l'appel d'électricité sur le réseau.
- Les puissances des auxiliaires, ainsi que leur mode d'enclenchement, doivent être étudiées attentivement, sous peine d'une baisse drastique des performances au niveau du système.

B2.5 Mise en perspective des résultats et potentiel de généralisation

Voici quelques remarques que l'on peut faire en toute généralité, tout en se souvenant qu'elles ne sont basées que sur 2 études de cas :

- En moyenne pour le parc des bâtiments, il y a une bonne adéquation entre la puissance disponible du ruban « air vicié » et la demande d'eau chaude avec un stock tampon de volume raisonnable. Mais il peut y avoir des disparités entre les 2 grandeurs, par exemple dans le cas d'une demande ECS faible et une forte ventilation – ou l'inverse.
- La solution double flux est totalement non dépendante de cet équilibre, mais plus complexe à mettre en œuvre.
- Complémentarité avec le solaire : la production photovoltaïque se couple bien mieux à la récupération sur air vicié que le solaire thermique (à bannir dans ce cas?)
- Au niveau des coûts, il faut regarder chaque projet au cas par cas, cette étude ne permettant pas de donner une réponse générale.

B2.6 Synthèse et conclusions

Le renouvellement d'air dans les bâtiments est à l'origine de grandes déperditions thermiques. La majorité des immeubles d'habitation existant possède actuellement un système de ventilation de type « extraction simple » qui laisse échapper environ 100 MJ/m²/an de SRE, équivalent à une dizaine de TWh au niveau national. La récupération à grande échelle et la valorisation de cette chaleur fatale constitue un important gisement d'économies d'énergie.

Parmi les solutions de récupération figure le système de ventilation double-flux, quelquefois avec récupération additionnelle de la chaleur sur l'air vicié via une PAC intégrée. Ce type de système qui tend à se généraliser dans les constructions neuves reste peu retenu pour les rénovations; sans doute à cause de son intégration complexe et de sa mise en œuvre onéreuse

En guise d'alternative à la ventilation double-flux, nous proposons ici d'améliorer la connaissance de l'usage et du fonctionnement du système utilisant des pompes à chaleur sur l'air vicié pour le préchauffage de l'ECS dans des grands immeubles d'habitation, placés individuellement ou en série avec une installation solaire thermique.

A cet effet, deux études de cas situées sur le Canton de Genève ont été analysées.

Etude de cas « Eaux-Vives »

Cette première étude concerne deux immeubles de 13 niveaux hors sol, totalisant une surface de référence énergétique de 15'760 et 13'822 m², qui ont été rénovés par étape. Sur chacun des immeubles, la récupération de chaleur sur l'air vicié se fait via une pompe à chaleur dédiée au préchauffage de l'ECS, sans solaire thermique.

Les systèmes ont fonctionné sans problèmes durant les 2 années du suivi, mais les performances sont en dessous de ce qui était prévu. Le taux de couverture renouvelable a été de 20% environ, contre 25% prévu dans le cadre du projet. Le COP système observé est inférieur aux prévisions, suite à deux causes :

- La pompe à chaleur ne fonctionne pas comme prévu (COP inférieur aux données fabricant)
- Le choix de ne pas modifier l'échangeur de chaleur entre la PAC et le stock de préchauffage au moment des travaux résulte en une augmentation d'une dizaine de degrés des niveaux de température en aval de la PAC.

La mesure détaillée de ce système a permis de valider un modèle de simulation complet de ce type de système.

Etude de cas « Meyrin »

La seconde étude concerne un ensemble de bâtiments de 3 niveaux hors-sol, rénové récemment et est équipé d'une installation de récupération de la chaleur sur l'air vicié avec préchauffage solaire.

Dans ce cas, les performances mesurées se sont avérées meilleures que ce qui avait été prévu, principalement suite à une consommation d'ECS basse et bien inférieure aux normes. Le solaire a correctement fonctionné (environ 700 kWh par m² de capteur) et, vue la faible demande en eau chaude, représente plus de 40% de la chaleur pour l'ECS. Le système de récupération étudié a fourni la même quantité d'énergie que le solaire, avec un COP de 4.85 au niveau de PAC. Cette excellente valeur est due aussi bien à la qualité intrinsèque du matériel qu'à son usage en conditions optimales. Pour une quantité d'électricité très comparable à ce qui était prévu, ceci permet de fournir beaucoup plus de chaleur qu'attendu. Il s'agissait de la deuxième installation effectuée par le bureau d'étude, et l'amélioration des

résultats est notable. Enfin, et par conséquence des points précédents, le complément en gaz a été réduit drastiquement puisqu'il passe de près de 50% de taux de couverture à moins de 15%.

En complément, une étude par simulation numérique montre qu'en absence d'installation solaire thermique, le défaut de production solaire pourrait être intégralement assuré par la PAC, dont le COP augmenterait même légèrement, grâce aux températures d'arrivée d'eau plus basse en absence de préchauffage solaire.

L'analyse économique de ce système a été réalisée par une double approche : en coût marginal, qui ne prend en compte que les coûts additionnels liés au système, et en coût moyen, qui prend en compte une partie des coûts communs. Les coûts marginaux sont évidemment inférieurs mais le coût moyen représente mieux l'approche globale de la rénovation – qui est plus qu'un simple empilement de solutions issues d'un catalogue et considérées individuellement. La notion de coût du kWh économisé est donc plus complexe qu'il n'y paraît dès que l'on désire désagréger un coût global en diverses composantes, liées à des interventions particulières mais réalisées dans une opération plus globale. L'analyse économique a montré que la présence du solaire thermique n'est économiquement pas judicieux.

Enfin, une série de simulation permet de conclure sans ambiguïté que le couplage avec du photovoltaïque est en principe meilleur qu'avec du solaire thermique, l'approvisionnement d'électricité sur le réseau étant quasiment identique, avec pour avantage une production d'électricité supplémentaire, qui pourrait être absorbée localement pour les communs d'immeubles ou les occupants ou injectée sur le réseau. Toutefois, cette conclusion reste vraie pour des immeubles pas trop élevés (jusqu'à environ une dizaine de niveaux). Au-delà, et selon la configuration de toit et la consommation d'eau chaude spécifique, l'avantage du PV serait moins flagrant et resterait à étudier au cas par cas.

Règle de dimensionnement

Enfin en se basant sur un grand nombre de simulations numériques, nous avons élaboré les indications suivantes pour le pré – dimensionnement de systèmes de récupération de chaleur sur l'air vicié via une pompe à chaleur dédiée au préchauffage de l'ECS :

- Dimensionner généralement les échangeurs de chaleur et choisir une PAC de bonne qualité,
- Le volume du stock dédié au préchauffage doit être d'environ 5 litres par habitant; il n'est pas nécessaire de prévoir trop important si le bâtiment est d'une certaine taille.
- La puissance de la PAC est en fait l'élément le plus sensible. A cet égard, une puissance importante (qui permet un grand taux de couverture) a tendance à dégrader le COP (étant donné un préchauffage ECS à plus haute température), et vice-versa. Pour fixer les idées, une puissance de l'ordre de 20 W/hab permet d'atteindre un COP PAC de 5 tout en couvrant plus de 60% de la demande d'eau chaude.
- La présence d'un système PV de taille suffisante pourrait partiellement lever ce conflit, dans la mesure où il permet de viser un haut taux de couverture sans trop impacter l'appel d'électricité sur le réseau.
- Les puissances des auxiliaires, ainsi que leur mode d'enclenchement, doivent être étudiées attentivement, sous peine d'une baisse drastique des performances au niveau du système.

Références

Bertholet, J.-L., Cabrera, D. et Lachal, B. (2016). Evaluation 2016 du programme éco21. Université de Genève.

Brise pierre, G. (2015). L'accompagnement des habitants : une évidence à déconstruire. In : Les chantiers Leroy Merlin, numéro 11, 2015.

Branco, G. et al. (2002). Analyse thermique de la Cité solaire à Plan-les-Ouates (Genève). Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:38777>

Cabrera, D., Hollmuller, P. et Lachal, B. (2012). Récupération de chaleur sur air vicié Estimation du potentiel de systèmes utilisant des pompes à chaleur comme alternative aux double-flux. Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:23582>

CRB. (2012a). Standards pour la construction eCCC-Bât - SN 506 511 - Code des coûts de construction Bâtiment. Zurich.

CRB. (2012b). Standards pour la construction eCCC-Bât – Complément Code des coûts de construction Bâtiment. Zurich.

van Dronkelaar, C. et al. (2016). A Review of the Regulatory Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-domestic Buildings », in: Frontiers in Mechanical Engineering, 1(January), p. 1-14.

Exenco Sàrl (2016). Mesure de débits d'infiltration, 31 Rue de Vermont, 1202 Genève. Mandat de l'Université de Genève dans le cadre du projet Compare Renove. Genève.

Flourentzou, F., Pantet, S. (2016). Raisons et remèdes de la surconsommation de bâtiments locatifs après rénovation, in : 19. Status-Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt», Zurich, 8-9 September 2016, ETH-Zurich.

Graf, F., & Marino, G. (2009). La cité du Lignon à Genève, étude architecturale et énergétique des enveloppes. Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

Hoffmann, C. et Ménard, M. (2015) Offene Fragen beim Einsatz der SIA 380/1 als Prognoseinstrument bei Bestandsgebäuden.

Hollmuller, P., De Oliveira F., Graf, O., Thiele, W. (2017). Solar assisted heat pump with ice storage for a 19'000 m² retrofitted multifamily building complex, in: CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts – Energy Efficiency from Nano to Urban Scale. Lausanne: CISBAT 2017, 6-8 September 2017.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:97185>

Ineichen, P. et Pampaloni, E. (2017). Ressource solaire de la région genevoise. Université de Genève.

<https://archive-ouverte.unige.ch/unige:92824>.

Khimda Ouendi, H. (2017). L'usage de la technique préfabriquée dans la rénovation thermique des bâtiments. Maîtrise Universitaire en Sciences de L'Environnement. Université de Genève

Khoury, J. (2014) Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs : état des lieux , retours d'expérience et potentiels du parc genevois. Thèse de doctorat. Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:48085>

Khoury, J. et al. (2014). Rénovation Minergie d'un bâtiment résidentiel de plus de 5000 m²: bilan énergétique et financier, in: Status-Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt, Zürich.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:40061>

Khoury, J., Lachal, B., Hollmuller, P. (2015). Analyse typologique et énergétique des bâtiments de la Cité nouvelle d'Onex : dans le cadre de l'accompagnement méthodologique pour la mise en place d'un programme de rénovation thermique de la Cité d'Onex. Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:78639>

Khoury, J., Hollmuller, P., Lachal, B. (2016). Energy performance gap in building retrofit : characterization and effect on the energy saving potential. In: 19. Status-Seminar «Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt». Zurich, 2016.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:86086>

Khoury, J., Alameddine, Z., Hollmuller, P. (2017). Understanding and bridging the energy performance gap in building retrofit. In: Energy Procedia, 2017, vol. 122, p. 217-222.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:97004>

Klein, S. A., Beckman, W. A. et Mitchell, J. W. (2012) « TRNSYS 17, Volume 4 Mathematical Reference », in TRNSYS 17, a TRAnsient SYstem Simulation program. Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison.

Majcen, D. (2016) Predicting energy consumption and savings in the housing stock: A performance gap analysis in the Netherlands.

Menezes, A. C., Cripps, A., Bouchlaghem, D., Buswell, R. (2012). Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap, in: Applied Energy. Elsevier Ltd, 97, p. 355-364. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.075.

Mermoud, F., Khoury, J. et Lachal, B. (2012). Suivi énergétique du bâtiment 40-42 de l'avenue du Gros-Chêne à Onex (GE), rénové selon le standard MINERGIE® Aspects techniques et économiques. Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:23005>

Norfard., L. K., Socolow, R. H., Hsieh, E. S., Spadaro, G. V. (1994). Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a 'low-energy' office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model, in: Energy and Buildings, Volume 21(Issue 2), p. 121-131.

OCEN (2006). Directive pour le calcul de l'indice de dépense de chaleur (ancienne directive). Office cantonal de l'énergie, Genève.

OFEV (2016). Facteurs d'émission de CO₂ selon l'inventaire des gaz à effet de serre de la Suisse. Berne.

PROGNOS (2012). Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000-2050. Basel.

Quiquerez, L. (2017). Décarboner le système énergétique à l'aide des réseaux de chaleur: état des lieux et scénarios prospectifs pour le canton de Genève. Thèse de doctorat. Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:93380>

Reimann, W. et Bühlmann, E. (2016) Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards. Bern.

Schneider, S. (2015). Retours d'expérience sur la valorisation de chaleur extraite sur air vicié pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire. Maitrise Universitaire en Sciences de L'Environnement. Université de Genève.

Schneider, S., Khoury, J., Lachal, B., Hollmuller, P. (2017). Geo-dependent heat demand model of the swiss building stock », in: Sustainable Built Environment Conference 2017 (WSBE17), Hong Kong.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:84240>

SIG (2017). Services industriels de Genève (www.sig-ge.ch)

SITG (2017) Système d'information du territoire à Genève (<http://ge.ch/sitg>)

Struck, C., Benz, M., Dorer, V., Frei, B., Hall, M., Menard, M., Moosberger, S., Orehounig, K., Sagerschnig, C. (2014). Performance Gap in der Schweiz - Brisanz, Ursachen und Einflüsse auf die Differenz von geplantem Energiebedarf und dem gemessenen Verbrauch von Gebäuden, in: 18. Status-Seminar, Zürich.

Thomsen, K. E., Schultz, J. M. et Poel, B. (2005). Measured performance of 12 demonstration projects - IEA Task 13 "advanced solar low energy buildings", in: Energy and Buildings, 37(2), p. 111-119.

Tornare G., Barras G., Elio R., Baud F., Schneider J., Thiele W., Graf O., Hollmuller P., de Oliveira, F., Fell M., Ledon S. (2016). Rapport technique et de communication du projet d'assainissement Minergie-P des immeubles « La Cigale » (GE) – Chauffage par pompes à chaleur solaires couplées à des stocks à changement de phase. Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:92770>

van Dronkelaar, C., Dowson, M., Spataru, C., & Mumovic, D. (2016). A Review of the Regulatory energy Performance Gap and its Underlying Causes in Non-domestic Buildings. In: *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1(17), 1-17.

Weber, W., Lachal, B., Gsponer, A., Guisan, O. (1991). Réhabilitation thermique d'un immeuble de 126 logements, construit en 1962 dans la banlieue de Genève », in: Conférence Internationale Energie solaire et bâtiment (CISBAT'91). Lausanne.

Weber, W. (2017) Evaluation des aspects architecture / urbanisme des rénovations. Mandat de l'Université de Genève dans le cadre du projet Compare Renove. Genève.

Wei, S., Jones, R. et De Wilde, P. (2014) « Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings, in: *Energy and Buildings*, 70, p. 36-44.

De Wilde, P. et Jones, R. (2014) « The building energy performance gap: up close and personal Pieter », in Proceedings of the CIBSE ASHRAE Technical Symposium: Moving to a new world of building systems performance. April 2014. Dublin.

Zero Carbon Hub (2013). Closing the Gap Between Design and As-built Performance - Interim Progress Report. London.

Zgraggen, J.-M. (2010). Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités. Thèse de doctorat, Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:13093>