

Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités

ZGRAGGEN, Jean-Marc

Abstract

La mesure de la performance énergétique des bâtiments révèle un dépassement presque systématique de la consommation par rapport à l'objectif calculé. Le label Minergie, qui représente aujourd'hui le fer de lance des bâtiments à haute performance énergétique en Suisse, soulève naturellement quelques questions : L'objectif de consommation Minergie est-il atteint dans la réalité ? Quelle est la performance de ces bâtiments par rapport aux constructions traditionnelles ? Quel est le coût de l'efficacité énergétique ? Ce travail apporte des éléments de réponse à ces questions par l'analyse approfondie d'un complexe de logements Minergie situé à Genève. Nous avons instrumenté en profondeur un des bâtiments et mesuré pendant quatre ans tous les flux énergétiques ainsi que les conditions météorologiques in-situ. Une analyse énergétique et économique des solutions d'efficacité énergétique mises en œuvre dans ces bâtiments a été réalisée. Ces résultats ont ensuite été mis en perspective avec l'analyse de plusieurs bâtiments similaires de construction traditionnelle.

Reference

ZGRAGGEN, Jean-Marc. *Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités*. Thèse de doctorat : Univ. Genève, 2010, no. Sc. 4218

Available at:

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:13093>

Disclaimer: layout of this document may differ from the published version.



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

**Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance
énergétique : objectifs et réalités.**

Retour d'expérience basé sur le suivi énergétique approfondi
d'un complexe de logements Minergie® (Pommier à GE)

THÈSE

présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de Docteur ès sciences, mention interdisciplinaire

par

Jean-Marc Zraggen

de

Schattdorf (URI)

Thèse N° 4218

GENÈVE

2010



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTÉ DES SCIENCES

**Doctorat ès sciences
mention interdisciplinaire**

Thèse de *Monsieur Jean-Marc ZGRAGGEN*

intitulée :

**"Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance
énergétique : objectifs et réalités"**

La Faculté des sciences, sur le préavis de Messieurs B. LACHAL, professeur titulaire et directeur de thèse (Institut F.-A. Forel), W. WILDI, professeur ordinaire (Institut F.-A. Forel), P. HOLLMULLER, (University of Lisbon - Sustainable Energy Systems – Faculty of Sciences – Lisbon, Portugal), et D. ROBINSON, docteur (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment – Faculté environnement Naturel, Architectural et Construit – Lausanne, Suisse), autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 19 février 2010

Thèse - 4218 -


Le Doyen, Jean-Marc TRISCONE

N.B. - La thèse doit porter la déclaration précédente et remplir les conditions énumérées dans les "Informations relatives aux thèses de doctorat à l'Université de Genève".

*À Maria del Mar, à Anna, à Pablo
et à la mémoire de mes parents...*

*"Escasean quijotes que asuman el deber de convertir el valor de la energía en
virtud y abundan los sanchos que reducen el valor de la energía a su precio"*

Luis Narvarte

Résumé

Le rôle majeur des bâtiments sur l'échiquier énergétique mondial et dans la lutte contre le réchauffement climatique n'est plus à démontrer. L'assainissement énergétique du patrimoine bâti et la construction de bâtiments à haute performance énergétique sont une nécessité.

La mesure de la performance réelle des bâtiments révèle cependant un dépassement presque systématique de la consommation par rapport à l'objectif calculé. Le label Minergie, qui représente aujourd'hui le fer de lance des bâtiments à haute performance énergétique en Suisse, soulève naturellement quelques questions : L'objectif de consommation Minergie est-il atteint dans la réalité ? Quelle est la performance de ces bâtiments par rapport aux constructions traditionnelles ? Quel est le coût de l'efficacité énergétique ?

Ce travail apporte des éléments de réponse à ces questions par l'analyse approfondie d'un complexe de logements Minergie situé dans le quartier du Pommier à Genève. Nous avons instrumenté en profondeur un des bâtiments et mesuré pendant quatre ans tous les flux énergétiques ainsi que les conditions météorologiques in-situ.

Une analyse énergétique et économique des solutions d'efficacité énergétique mises en oeuvre dans ces bâtiments a été réalisée. Ces résultats ont ensuite été mis en perspective avec une analyse de plusieurs indicateurs pertinents menée sur une dizaine de bâtiments similaires de construction traditionnelle.

Les résultats principaux de ce travail sont les suivants :

- Les bâtiments Minergie du Pommier consomment environ 60% de gaz en moins que des immeubles traditionnels pour le chauffage des logements et la production de l'ECS, mais 4.4 fois plus d'électricité. Le bilan en énergie primaire est cependant positif, avec une réduction de 43% des ressources puisées dans l'environnement.
- La demande de chauffage réelle dans les bâtiments du Pommier est 3.5 fois plus élevée que l'objectif calculé. L'écart provient en majorité du comportement des habitants et également de la sous-performance du bâtiment. La divergence entre l'objectif normé et la réalité n'est cependant pas un phénomène réservé aux constructions Minergie, nous l'avons également constatée sur une dizaine de bâtiments standard avec un dépassement moyen de l'ordre de 70%.
- Cet écart n'a rien de surprenant, dans la mesure où la normalisation des mesures corrige les effets liés au climat, mais pas les conditions d'utilisation du bâtiment (habitants et installations techniques). La sous-performance intrinsèque du bâtiment n'est pas non plus prise en compte. Le comportement moyen des habitants déplace le point de fonctionnement normé du bâtiment vers un état où la température intérieure et le taux de renouvellement de l'air sont plus élevés.

- L'exemple du Pommier montre qu'il est possible de construire des bâtiments énergétiquement performants, dont le coût du m² chauffé et alimenté en ECS n'est pas plus élevé que celui d'un bâtiment traditionnel.
- Au prix du gaz actuel (9 ct/kWh) et sans subventions, investir dans l'enveloppe pour économiser un kWh de gaz coûte environ deux fois moins cher que de brûler ce même kWh. Cependant, ces conditions ne permettent pas encore au maître d'ouvrage de répercuter sur les loyers la totalité de l'investissement brut réalisé dans l'efficacité énergétique sans une augmentation sensible des charges des locataires.
- Le déploiement de systèmes actifs peut avoir un impact non négligeable sur la consommation électrique globale. L'assainissement énergétique du parc immobilier devrait faire l'objet d'une stratégie globale et cohérente qui inclut également la problématique électrique.
- La réduction du besoin de chaleur par des systèmes constructifs et techniques se heurte à une limite liée à l'exploitation du bâtiment. Cette limite est symbolisée par le passage entre les sciences techniques et les sciences sociales. **Les ingénieurs et les architectes possèdent le savoir nécessaire pour construire des bâtiments potentiellement performants, mais il est de la responsabilité des habitants d'exploiter pleinement ce potentiel.** Celui-ci réside dans la sobriété énergétique des habitants, que les sciences sociales doivent maintenant exploiter si l'on désire tendre vers des bâtiments encore plus performants.

Remerciements

Je tiens à exprimer ici mes plus sincères remerciements au professeur Bernard Lachal pour sa grande disponibilité, sa formidable richesse intellectuelle et sa chaleur humaine intarissable. Merci de m'avoir appris à regarder le monde différemment.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'admirable esprit d'innovation d'Eric Pampaloni, mon fidèle complice au sein du CUEPE, dont les réalisations techniques relèguent d'un tour de clé à molette le célèbre "Léonard Génie" au rang de bricoleur du dimanche.

Mes sincères remerciements à Messieurs John Lateo et Pierre Bosson de la CIA pour leur engagement dans ce projet, les moyens mis à notre disposition ainsi que pour les très riches échanges que nous avons eus tout au long de celui-ci.

Je remercie également les Services industriels de Genève, et tout particulièrement Monsieur Pascal Abbet, pour m'avoir laissé toute la flexibilité nécessaire à l'accomplissement de ce travail tout en prenant en charge une nouvelle fonction au sein de cette entreprise.

Ce travail n'aurait pas atteint sa maturité actuelle sans la contribution, les avis et les critiques constructives des personnes ci-dessous. Mes profonds remerciements à tous, en espérant n'avoir oublié personne :

Patrick Aeby, Senorhina Al Soufi, Carla Anderegg, Guillermo Baeza, Marcellin Barthassat, Rémy Beck, France Bêche-Doll, Jean-Luc Bertholet, Viviana Bettinelli, Monsieur Bonvin, Reto Campionovo, Eric Colucci, Félix Dalang, Gilles Deperraz, Christine Diesis, Jérôme Faessler, Maurice Fantin, Juan-Carlos Fernandez, Clarice Ferraz, Christian Freudiger, Peter Gallinelli, Myriam Garbely, Robert Gemeli, Carlo Giacomini, Kemal Gulen, Peter Haefeli, Dominique Hirt, Pierre Hollmuller, François Hubert, Pierre Ineichen, Marinette Jaccard, Susana Jourdan, Silvio Kellenberger, Monsieur Keparco, Jad Khoury, Pierre Krummenacher, Thibault Lejeune, Michel Maire, André Mermoud, Jacques Mirenowicz, Olivier Ouzilou, Roberto Pagliuca, Isabel Peñaloza, Jan Perneger, Jean Putallaz, Patricia Python, Gabriel Radulescu, Madame et Monsieur Rata, Darren Robinson, Monsieur Rohner, Claude-Alain Roulet, Alfred Rusterholz, Christophe Schmid, Bruno Schmidt, Ricardo Scollo, Martine Simonet, Emile Spierer, Marc Tillmanns, Pascal Thomann, Cosette Varidel, Pierre-Alain Viquerat, Willi Weber, Walter Wildi, Claude Willemin.

Table des matières

Résumé	iii
Remerciements	v
Acronymes	xi
Introduction générale	xiii
I RETOUR D'EXPÉRIENCE : LES BÂTIMENTS MINERGIE DU POMMIER	1
Préambule	3
1 Suivi énergétique des bâtiments	5
1.1 Introduction	5
1.2 Mandat de suivi et d'analyse énergétique	5
1.2.1 Cadre et objectif du mandat	5
1.2.2 Groupe de suivi	5
1.3 Concept architectural	6
1.3.1 Introduction	7
1.3.2 L'architecture et l'énergie	8
1.3.3 Une nécessaire attention portée aux modes de construction	11
1.3.4 Détail en coupe des façades et consoles des balcons	12
1.3.5 Informations générales	12
1.4 Concept énergétique	14
1.4.1 Présentation du concept	14
1.4.2 Description des systèmes techniques du bâtiment Giacometti	15
1.5 Acquisition des données	19
1.5.1 Stratégie de mesure	19
1.5.2 Description des systèmes de mesure	22
1.5.3 Exemple de mesure	26
1.6 Conclusions	28
2 Analyse énergétique	29
2.1 Introduction	29
2.2 Bilan thermique détaillé	29
2.2.1 Flux énergétiques	29
2.2.2 Efficacité des systèmes de transformation et de stockage	31
2.3 Consommation électrique du bâtiment	32

2.3.1	Mesure dynamique des puissances électriques	32
2.3.2	Profil de charge hebdomadaire	33
2.3.3	Puissances d'appel horaires classées	35
2.3.4	Profil de consommation horaire moyen des logements	39
2.3.5	Structure de la courbe de charge horaire moyenne du bâtiment	40
2.3.6	Puissance réactive	40
2.3.7	Bilan annuel	42
2.3.8	Consommation annuelle des logements	44
2.4	Signature énergétique	45
2.4.1	Gaz (complexe)	45
2.4.2	Électricité	46
2.5	Demande de chaleur	48
2.5.1	Chauffage	48
2.5.2	Eau chaude sanitaire (ECS)	50
2.5.3	Demande horaire classée	50
2.6	Analyse du confort thermique	52
2.7	Analyse de la qualité de l'air	52
2.7.1	Introduction	54
2.7.2	Acquisition et traitement des données	55
2.7.3	Analyse des mesures	55
2.7.4	Conclusions	57
2.8	Conclusions	57
3	Analyse des sous-systèmes	59
3.1	Introduction	59
3.2	Installation solaire thermique	59
3.2.1	Caractéristiques du fluide caloporteur	59
3.2.2	Rendement de conversion	60
3.2.3	Productivité	61
3.2.4	Modélisation des capteurs	63
3.2.5	Couverture solaire de l'ECS	66
3.2.6	Consommation électrique	66
3.2.7	Évaluation de la performance avec l'outil rapSOL-th	66
3.3	Monobloc de ventilation à double flux	69
3.3.1	Simulation de la consommation électrique des ventilateurs	69
3.3.2	Simulation de la consommation électrique de la PAC	72
3.3.3	Profil de charge annuel du monobloc	72
3.3.4	Puissances d'appel horaires classées	75
3.3.5	Performance des ventilateurs	76
3.3.6	Coefficients de performance (COP)	77
3.3.7	Efficacité de l'échangeur de chaleur	79
3.4	Chaudières à gaz et conduites à distance (CAD)	81
3.4.1	Bilan énergétique	81
3.4.2	Rendement des chaudières	81
3.5	Enveloppe thermique	84
3.5.1	Mesure des coefficients U de l'enveloppe	84
3.5.2	Analyse thermographique	88
3.6	Conclusions	89

4	Confrontation des résultats avec les objectifs énergétiques	91
4.1	Introduction	91
4.2	Bilan énergétique calculé versus mesuré	91
4.3	Bilan thermique calculé versus mesuré	92
4.3.1	Demande	92
4.3.2	Production	93
4.4	Demande de chauffage en conditions réelles d'utilisation	94
4.4.1	Valeurs observées versus conditions standards	94
4.4.2	Description des paramètres d'influences	94
4.5	Normalisation du bilan thermique	96
4.6	Bilan énergétique normalisé	98
4.7	Conclusions	98
5	Bilan des investissements réalisés dans l'efficacité énergétique	99
5.1	Introduction	99
5.2	Investissement dans l'efficacité énergétique	99
5.2.1	Présentation des résultats	99
5.2.2	Coût du kWh de gaz économisé (négakWh)	101
5.2.3	Investissement versus économies sur les charges	103
5.2.4	L'électricité du double-flux dans les charges de chauffage ?	104
5.3	Substitution gaz-électricité	105
5.4	Bilan en énergie primaire	107
5.4.1	Facteurs de conversion	107
5.4.2	Présentation des résultats	108
5.4.3	Variante avec concept global électro-thermique	109
5.5	Conclusions	110
II	MISE EN PERSPECTIVE DES RÉSULTATS DU POMMIER	113
	Préambule	115
6	Indicateurs de comparaison	117
6.1	Introduction	117
6.2	Définitions	117
6.3	Indicateurs de performance énergétique	118
6.3.1	Indice de dépense de chaleur IDC	118
6.3.2	Consommation électrique des systèmes techniques	118
6.3.3	Signature énergétique	118
6.3.4	Autres indicateurs	119
6.4	Indicateurs de performance économique	119
6.4.1	Coût d'investissement	119
6.4.2	Charges d'exploitation	120
6.4.3	Autres indicateurs	122
6.5	Commentaire sur la performance technique des systèmes	122
6.6	Conclusions	123

7	Analyse comparative de plusieurs bâtiments	125
7.1	Introduction	125
7.2	Présentation des bâtiments sélectionnés	125
7.3	Performance énergétique	127
7.3.1	Consommation gaz-électricité	127
7.3.2	Signature énergétique	130
7.3.3	Consommation d'eau chaude sanitaire (ECS)	134
7.3.4	Indice de dépense de chaleur (IDC)	136
7.4	Diffusion des solutions Minergie observées	138
7.4.1	Objectif et stratégie	138
7.4.2	Point de situation et tendance	138
7.4.3	Évaluation des enjeux énergétiques	139
7.5	Performance économique	140
7.5.1	Introduction	140
7.5.2	Coût d'investissement et d'exploitation des systèmes	141
7.5.3	Coût global d'exploitation chauffage-ventilation	145
7.5.4	Charges locataires directes et indirectes	147
7.6	Conclusions	148
8	Conclusions générales	151
	Table des Figures	155
	Liste des Tableaux	159
	Bibliographie	164
A	Liste des capteurs	165
B	Mesures bâtiment Giacometti	169
C	Corrections climatiques	171
D	Point de vue du maître d'ouvrage et investisseur du Pommier (CIA)	173
E	Caractéristiques des bâtiments étudiés	177

Acronymes

CAD	Chauffage à distance : circuit de distribution de l'énergie thermique.
CIA	Caisse de prévoyance du personnel enseignant de l'instruction publique et des fonctionnaires de l'administration du canton de Genève.
COP	Coefficient de performance = chaleur fournie / électricité consommée.
DIFC	Décompte individuel des frais de chauffage.
DIFECS	Décompte individuel des frais d'eau chaude sanitaire.
ECS	Eau chaude sanitaire.
ScanE	Service de l'énergie du canton de Genève.
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
SRE	Surface de référence énergétique (selon SIA 416/1).
UC	Unité de consommation ECS = 8.82 MJ/jour (50 l/cap.jour @ 55°C).

Introduction générale

Le patrimoine bâti et l'énergie

Le rôle majeur des bâtiments sur l'échiquier énergétique mondial et dans la lutte contre le réchauffement climatique n'est plus à démontrer. Ce secteur représente plus de 40% de l'énergie primaire consommée dans le monde et est responsable de 24% des émissions globales de CO₂ [1]. En Suisse, plus de 80% des résidences principales sont actuellement chauffées avec des énergies fossiles [2].

C'est également un secteur en pleine croissance. Les investissements réalisés en 2006 au niveau mondial sont estimés à 4'600 milliards de dollars US [3]. Le taux de croissance 2006-2007 se situait entre 2% et 4% pour l'Italie, la France et l'Espagne, tandis que la Chine et l'Inde affichait des taux supérieurs à 8%. La Chine augmente chaque année la taille de son parc immobilier d'une surface équivalente à environ quatre fois celle de la surface bâtie en Suisse [4, 5].

De plus, la taille des nouveaux logements ne cesse d'augmenter. Une étude réalisée par le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) dans plusieurs régions du monde montre que la surface moyenne de plancher par habitant dans le secteur résidentiel a augmenté de 0.6 m² par an entre 1973 et 1998 [4].

L'évolution des matériaux et des systèmes techniques a également permis d'augmenter le découplage entre le climat extérieur et le niveau de confort intérieur désiré. L'expression architecturale s'est alors un peu plus libérée des contraintes liées à une composition intelligente entre climat et bâtiment pour explorer de nouveaux horizons, souvent au détriment d'une plus grande consommation d'énergie. Cet extrait du rapport "Buildings and climate change" du programme des Nations Unies pour l'environnement illustre bien cette tendance [6, page 17] :

In Brazil, commercial buildings constructed in the 1960s and 1970s tend to be more efficient in terms of energy consumption, when compared to newer ones, as they explored a number of passive solutions, such as thermal mass and sunshades, decreasing the need for acclimatization systems. Nowadays, by following global architectural approaches based on glass envelopes, buildings in Brazil tend to overheat during the summer, requiring more energy for their acclimatization systems to cope.

L'évolution des normes en Suisse

Entre 1860 et 1960, la structure de l'habitat était en profonde mutation sous l'influence des réformes de l'hygiène et du concept d'*Existenzminimum* qui prônait la rationalisation de l'espace domestique [7, page 113]. Les énergies fossiles, alors abondantes, accessibles et bon marché, permettaient de mettre à la disposition de toutes les bourses des logements salubres et chauffés.

En 1951, la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) demande de calculer l'isolation thermique "*au plus économique*" si aucune contrainte technique n'est imposée [8]. Jusqu'en 1973, date du premier choc pétrolier, les bâtiments ne seront que légèrement, voir pas du tout isolés. Ce type de bâtiment représente aujourd'hui plus de 60% du patrimoine bâti helvétique [9].

En 1973, la hausse spectaculaire et durable du prix du baril met fin à la croissance débridée des Trente Glorieuses. Ces événements placeront la question énergétique au centre des débats. Dès 1975, la SIA fait ses premières propositions pour une recommandation relative à l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments [10]. En 1977, elle publie la recommandation 180/1 qui prescrit des valeurs minimales de performance pour les éléments de l'enveloppe (anciennement facteur "k" en W/m^2K).

Le deuxième choc pétrolier de 1979 accélère le processus. La SIA augmente les exigences de la recommandation 180/1 et planche sur la future norme 380/1 qui prendra en compte le bilan énergétique global du bâtiment et non plus seulement la performance ponctuelle des éléments. Cette norme est publiée en 1988 et devient vite une référence. L'introduction progressive de ces deux documents dans l'arsenal législatif des cantons permettra de réduire considérablement la consommation énergétique des nouveaux bâtiments [10, 11].

Cependant, le moteur de cet élan va bientôt s'essouffler. Vers le milieu des années 80, le prix du baril redescend fortement et se stabilise : c'est le contre-choc pétrolier. Les efforts consentis vont se relâcher et la norme 380/1 restera inchangée pendant presque 15 ans. Ses exigences seront revues à la hausse une première fois en 2001, au lendemain d'une nouvelle hausse du pétrole. Puis, en corrolaire à l'ascension de l'or noir, elle sera encore mise à jour en 2007, puis récemment en 2009.

Cette stagnation de la contrainte se reflète sur l'indice de consommation des nouvelles constructions à Genève qui n'a pas évolué entre 1986 et 2000 [12]. Une étude portant sur les immeubles de logement suédois constate également une décroissance de l'indice énergétique entre 1970 et 1985, suivie d'une stagnation de celui-ci jusque dans les années 2000 (étendue de l'étude) [13].

Le développement des bâtiments performants

En parallèle à l'évolution des normes de la construction, des solutions innovantes se développent pour ceux qui désirent aller plus loin que la norme.

Dès 1990, de nombreux programmes sont lancés en Suisse pour traiter la problématique de l'énergie dans les bâtiments (Ravel, Pacer, Pi-Bat, Énergie2000, etc) [10]. Mais c'est en 1994, sous l'impulsion de Ruedi Kriesi, que prend forme le premier concept intégré de bâtiment à haute performance énergétique : "Minergie". Ce standard représente une synthèse économiquement acceptable des diverses solutions d'efficacité énergétique proposées à cette époque. Associé à une stratégie marketing intelligente, il connaît rapidement le succès et l'association Minergie est officiellement fondée en 1998.

Le label Minergie est octroyé sur une base volontaire. Il fixe un objectif en terme d'énergie primaire pour le chauffage et la ventilation, tout en laissant une grande latitude sur les moyens mis en oeuvre pour l'atteindre. L'objectif annoncé est une valeur pondérée entre les différents vecteurs énergétiques utilisés. À l'instar des normes, cet objectif évolue au cours du temps [14].

Le mouvement est général et de nombreux labels similaires voient le jour dans différentes parties du monde. Aujourd'hui, on peut construire selon "Passivhaus" en Allemagne [15], "LEED" aux États-Unis [16] ou "Effinergie" en France [17] pour n'en citer que quelques uns. Les exigences peuvent différer fortement d'un label à l'autre, mais l'objectif intrinsèque de ces démarches reste le même : baisser l'impact environnemental des bâtiments.

Sous la pression d'une population toujours plus concernée par les flambées récurrentes du baril et par le réchauffement climatique, les États prennent aujourd'hui des mesures qui tendent à accélérer le déploiement de l'efficacité énergétique dans les bâtiments. On peut citer, entre autres, la volonté suisse de mettre en oeuvre un véritable "plan Marshall" de la rénovation des bâtiments [18], ou l'objectif "zéro énergie" de l'Europe, qui demande aux nouveaux bâtiments construits dès 2019 d'avoir une consommation en énergie primaire inférieure ou égale à leur production propre d'énergie [19].

La performance énergétique sous la loupe : objectifs et réalités

L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments s'est naturellement accompagnée d'un intérêt croissant pour la mesure de leur consommation réelle.

La confrontation de la mesure avec l'objectif calculé révèle, dans la majorité des cas, une consommation réelle de chauffage plus élevée que prévue [20, 21, 22, 23, 24, 25]. Les principales origines de ces différences sont une température intérieure plus élevée, un taux de ventilation plus élevé (étanchéité moins bonne, ouverture des fenêtres) ou une sous-performance des systèmes techniques.

Un autre exemple intéressant concerne l'étude récente de Newsham et al. [26]. Ils ont analysé la consommation énergétique d'une centaine de bâtiments commerciaux et institutionnels certifiés LEED aux États-Unis. L'ensemble de l'échantillon consomme moins que des bâtiments standards, mais l'étude révèle que 28% à 35% d'entre eux consomment en revanche plus d'énergie que des bâtiments standards. De plus, il n'y a pas de corrélation forte entre les efforts portés sur l'aspect énergétique du concept (crédit LEED) et la performance réellement mesurée.

Le label Minergie n'offre guère plus de garantie que l'exemple ci-dessus. En effet, ce label est octroyé sur la base d'un formulaire administratif qui, lui-même, se base sur les calculs de la norme SIA 380/1. Or, une étude menée en Suisse Romande sur l'application de cette norme a révélé que dans 75% des cas, la demande de chaleur calculée était largement sous-estimée [27]. Bien sûr, l'octroi du label s'accompagne d'une visite in-situ pour vérifier le bien fondé de la déclaration. Mais il ne faut pas oublier que la construction d'un bâtiment reste un processus profondément artisanal et que seul un suivi détaillé de l'exécution pourra garantir une mise en oeuvre fidèle du concept énergétique établi.

Cadre et présentation de ce travail

Le label Minergie, qui représente aujourd'hui le fer de lance des bâtiments à haute performance énergétique en Suisse, soulève naturellement quelques questions :

- L'objectif de consommation Minergie est-il atteint dans la réalité ?
- Quelle est la performance de ces bâtiments par rapport aux constructions traditionnelles ?

– Quel est le coût de l'efficacité énergétique ?

La construction des bâtiments Minergie du Pommier représentait une excellente opportunité pour apporter des éléments de réponse à ces questions. Nous avons décidé de réaliser un suivi énergétique approfondi de ces bâtiments, afin de tirer un maximum d'enseignement de cette réalisation exemplaire.

L'étude d'un objet soumis aux contraintes locales facilite grandement la diffusion des résultats parmi le tissu économique régional. Cette approche permet aussi d'alimenter la communauté scientifique avec un retour d'expérience approfondi (4 ans de mesures) comme on en trouve peu dans les publications.

Ce travail est organisé en deux parties. La première partie analyse en profondeur la performance énergétique et économique d'un des trois bâtiments du complexe du Pommier. Puis, dans la seconde partie, ces résultats sont mis en perspective par rapport à la performance de neuf autres bâtiments de logements de taille similaire. Huit sont de construction conventionnelle (SIA 380/1) et un est Minergie.

Première partie

**RETOUR D'EXPÉRIENCE : LES
BÂTIMENTS MINERGIE
DU POMMIER**

Préambule

Cette première partie concerne l'analyse en profondeur des bâtiments Minergie du Pommier.

Le premier chapitre présente le cadre du mandat de suivi énergétique, le concept architectural, les systèmes techniques et la mise en place du monitoring.

Le deuxième chapitre présente une analyse énergétique globale du bâtiment sélectionné : bilan thermique, signatures énergétiques et profil des demandes de chaleur. Le confort thermique est abordé et le résumé d'une étude sur la qualité de l'air est également présenté.

Le troisième chapitre analyse en profondeur la performance de l'installation solaire thermique et celle du système de ventilation à double-flux. La performance des chaudières à gaz et de l'enveloppe thermique est également évaluée.

Le quatrième chapitre confronte les résultats obtenus avec les objectifs énergétiques.

Le cinquième et dernier chapitre de cette première partie présente le bilan économique et énergétique des solutions d'efficacité énergétique qui ont été intégrées dans le concept du Pommier.

Chapitre 1

Suivi énergétique des bâtiments

1.1 Introduction

Ce chapitre est consacré au mandat de suivi énergétique qui est à l'origine de ce travail de thèse. Une brève présentation du mandat précède la description du concept architectural et du concept énergétique. La stratégie d'acquisition de données et la description des systèmes de mesure viennent finalement compléter ce chapitre.

1.2 Mandat de suivi et d'analyse énergétique

1.2.1 Cadre et objectif du mandat

La Caisse de prévoyance du personnel enseignant de l'instruction publique et des fonctionnaires de l'administration du canton de Genève (CIA), investit un bon tiers de sa fortune sociale dans l'immobilier. Avec plus de 7000 logements, la CIA est le plus grand propriétaire de logements à Genève. En 2004, elle décide de construire un complexe de 117 logements au standard Minergie dans le quartier du Pommier à Genève. Il s'agissait de la première réalisation Minergie de cette envergure en Suisse Romande.

Le ScanE a décidé de mandater le Cuepe pour effectuer un suivi énergétique approfondi de ces bâtiments sur une période de 4 ans. L'objectif principal de ce mandat était de tirer un maximum d'enseignements de cette réalisation exemplaire. Cette étude a permis d'évaluer la performance des solutions intégrées tant sur le plan énergétique que sur le plan économique.

Une analyse de la qualité de l'air intérieur a également été réalisée par le service cantonal de toxicologie industrielle et de protection contre les pollutions intérieures (STIPI)[28]. Un résumé de ce rapport, reprenant les principaux éléments et résultats de cette campagne de surveillance, est présenté à la section 2.7, page 52.

1.2.2 Groupe de suivi

Un groupe de suivi a également été mis sur pied. Il était composé des acteurs principaux : maître d'ouvrage, service cantonal de l'énergie, architectes, ingénieurs et régisseur. L'objectif de cette démarche était de faciliter l'optimisation du système, d'assurer le transfert des résultats de la recherche vers la pratique et de prendre en compte, dans ce programme de recherche, l'avis des

Nom Prénom	Entreprise	Fonction
Lateo John	CIA	Chef division immobilière
Bosson Pierre	CIA	Chef services travaux
Maire Michel	CIA	En charge du dossier Pommier
Gulen Kemal	CIA	Coordination énergie
Barthassat Marcellin	MeCol	Concept architectural
Rusterholz Alfred	MeCol	Direction du chantier
Freudiger Christian	ScanE	Financement de l'étude
Schmidt Bruno	SB technique	Concept technique CVS
Radulescu Gabriel (jusqu'à mai 06)	SB technique	Concept technique CVS
Scollo Ricardo (dès juin 07)	SB technique	Suivi du dossier Pommier
Hubert François	Enerbat	Maintenance CVS
Dalang Félix	STIPI	Étude sur la qualité de l'air
Fernandez Juan-carlos (jusqu'à déc.06)	Régie Brolliet	Régisseur
Bêche-Doll France	Régie Brolliet	Régisseur
Simonet Martine	Régie Brolliet	Régisseur
Schmid Christophe (dès juin 07)	Régie Brolliet	Régisseur
Lachal Bernard	Cuepe	Responsable du projet
Weber Willi	Cuepe	Expertise architecturale
Haefeli Peter	Cuepe	Expertise architecturale
Pampaloni Eric	Cuepe	Support technique monitoring
Zraggen Jean-Marc	Cuepe	Coordination, mesures et analyses

TAB. 1.1 – Composition du groupe de suivi

praticiens.

Ce groupe s'est réuni neuf fois entre mai 2004 et juin 2008. À chaque séance, un tour de table permettait aux acteurs concernés de remonter les informations pertinentes qu'il possédait sur l'ensemble bâtiment-locataires. Puis, les résultats des mesures et l'avancement des analyses étaient présentés et discutés.

La liste des personnes qui ont aimablement participé à ce suivi est présentée dans la Table 1.1.

Ces échanges ont été très enrichissants. Par leurs remarques constructives, les participants de ce groupe nous ont aidés à faire un pas dans la compréhension des bâtiments à haute performance énergétique. Nous leur en sommes extrêmement reconnaissants. Le point de vue de la CIA, en tant que maître d'ouvrage et investisseur du Pommier, est présenté à l'annexe D.

1.3 Concept architectural

Cette section 1.3 reprend intégralement des extraits d'un article écrit par Marcellin Barthassat, architecte SIA-FAS et co-auteur du projet [29]. Certaines figures détaillées et leurs commentaires associés ont été fournis par Peter Haefeli pour compléter cette vue d'ensemble.

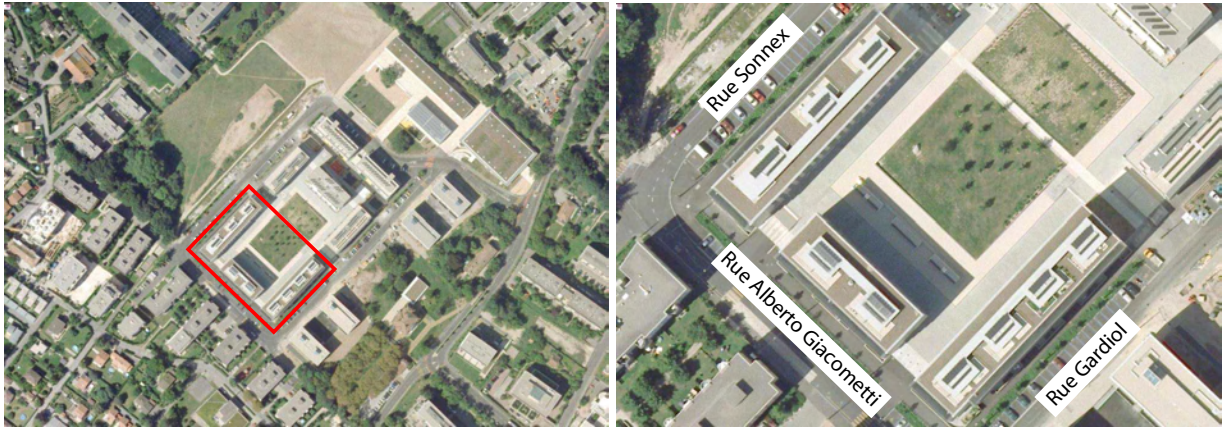


FIG. 1.1 – Situation du complexe dans le quartier du Pommier à Genève (photos récentes).



FIG. 1.2 – Façade nord-est (gauche) et sud-ouest (droite) du bâtiment central "Giacometti".

1.3.1 Introduction

La réalisation de trois immeubles qui ont obtenu le label Minergie (117 logements avec commerces et bureaux) s'inscrit dans l'édification d'un nouveau quartier sur l'ancien site de la Campagne Gardiol. Ce quartier, situé au nord-ouest de la ville proche de la zone des organisations internationales, est l'une des réalisations importantes en zone de développement pour le logement de notre canton.

La CIA, qui est à l'origine du projet, pilote l'ensemble de cette réalisation en partenariat avec le Département de l'aménagement, de l'équipement et du logement (DAEL) ainsi qu'avec la Commune du Grand-Saconnex. Ce nouveau quartier comprendra, à terme, 650 logements, des activités commerciales et de bureaux, une école primaire et un centre communal (voir Figure 1.1).

Les trois immeubles labellisés Minergie sont issus d'une procédure de concours d'architecture qui s'est déroulée en 2000. Dès l'énoncé du concours, la CIA s'est préoccupée de promouvoir des logements de qualité, de porter une attention au traitement de l'espace public et une ouverture en faveur d'énergies alternatives. C'est dans cette optique que le lauréat du concours (association entre Metron à Brugg et Collectif d'architectes BBBM à Carouge) a proposé, en collaboration avec le bureau SB Technique, un concept d'énergie renouvelable (pour environ 45 % de la production totale) combiné avec une production d'énergie non renouvelable au gaz (pour environ 55 %).



FIG. 1.3 – Gauche : duplex ; toiture végétalisée. Droite : bâtiment Gardiol, façade nord-ouest.

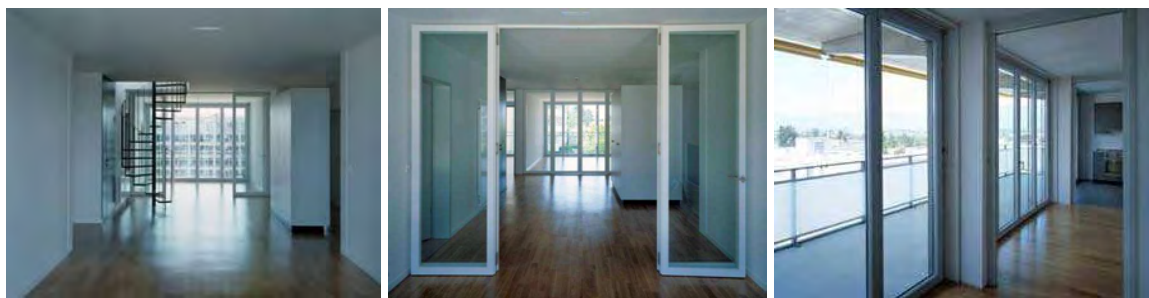


FIG. 1.4 – Vues intérieures des logements

1.3.2 L'architecture et l'énergie

Si l'implantation des bâtiments était imposée par un Plan localisé de quartier (PLQ) relativement contraignant, le projet a tenté de tirer profit, le mieux possible, de l'épaisseur importante des immeubles fixée par le PLQ à 15.30 mètres. Celle-ci a conditionné l'organisation du plan-logement.

Les architectes ont opté pour un plan traversant (typologie) pour tous les logements avec un hall central qui puisse s'additionner à la cuisine et au living et offrir ainsi un espace subdivisé ou ouvert (à choix) sur toute la profondeur de l'immeuble. Il ne restait plus qu'à prévoir des baies vitrées généreuses sur l'ensemble des façades qui ont été combinées avec des balcons-coursives côté rue. C'est dire que dans cette situation la relation entre plan, façades et énergie a représenté une préoccupation constante du groupe interdisciplinaire composé d'architectes et d'ingénieurs.

Les relations établies par ce projet entre les rues et la cour à travers les cages d'escaliers - traitées comme autant de passages - ainsi que la mise à disposition d'une série d'espaces communs autour du square renforcent le caractère urbain et collectif de cet ensemble. Chaque entrée gère différemment les hauteurs entre les accès extérieurs et les niveaux des cages d'escaliers. Sur le plan spatial, cette contrainte donne à la base des immeubles une diversité des niveaux appréciable.

Pour réaliser "Minergie" il faut aussi en être convaincu soi-même ! Ce concept énergétique a demandé de la part des architectes une grande attention et une précision importante dans la phase

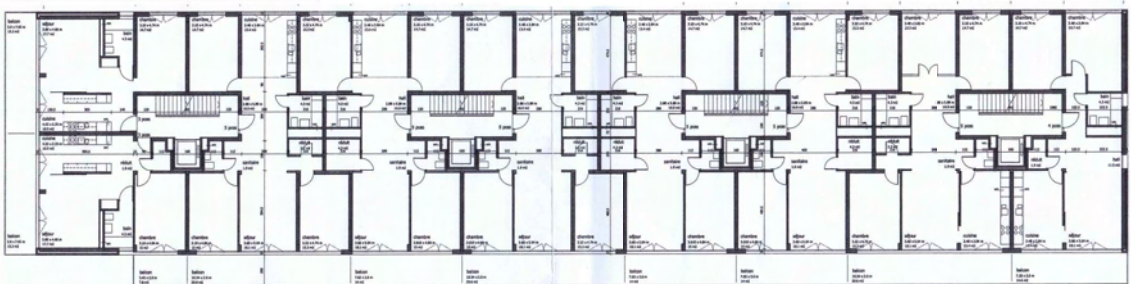
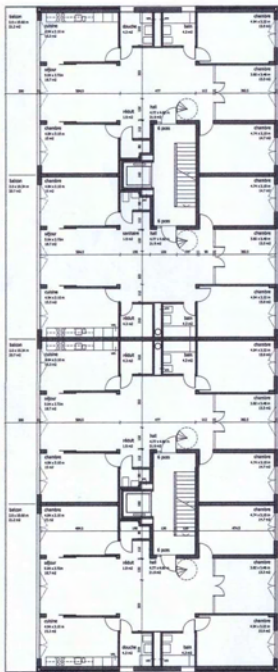
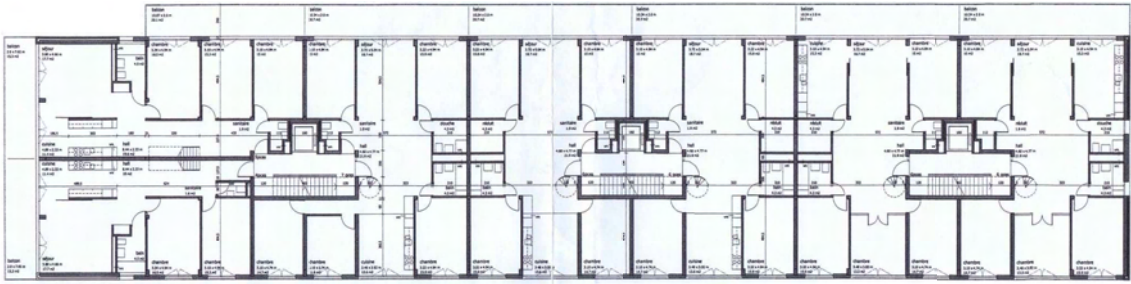


FIG. 1.5 – Répartition et typologie des logements.

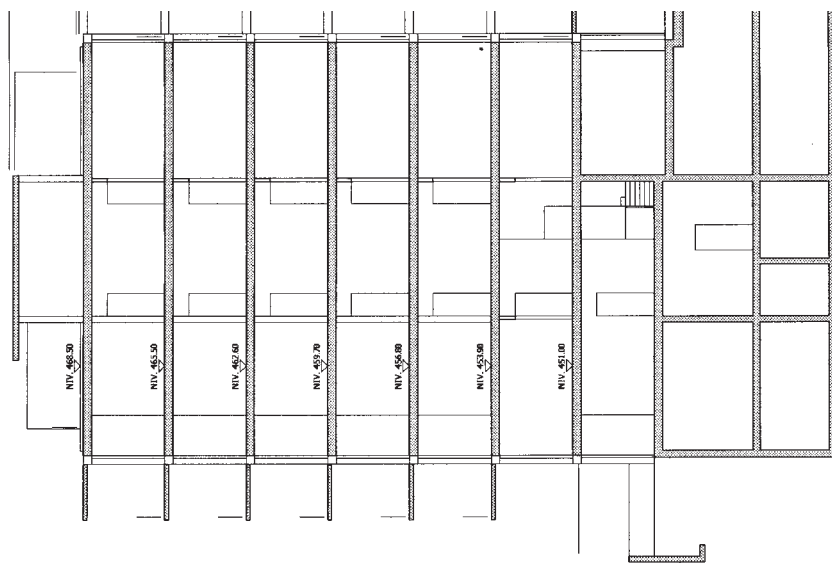
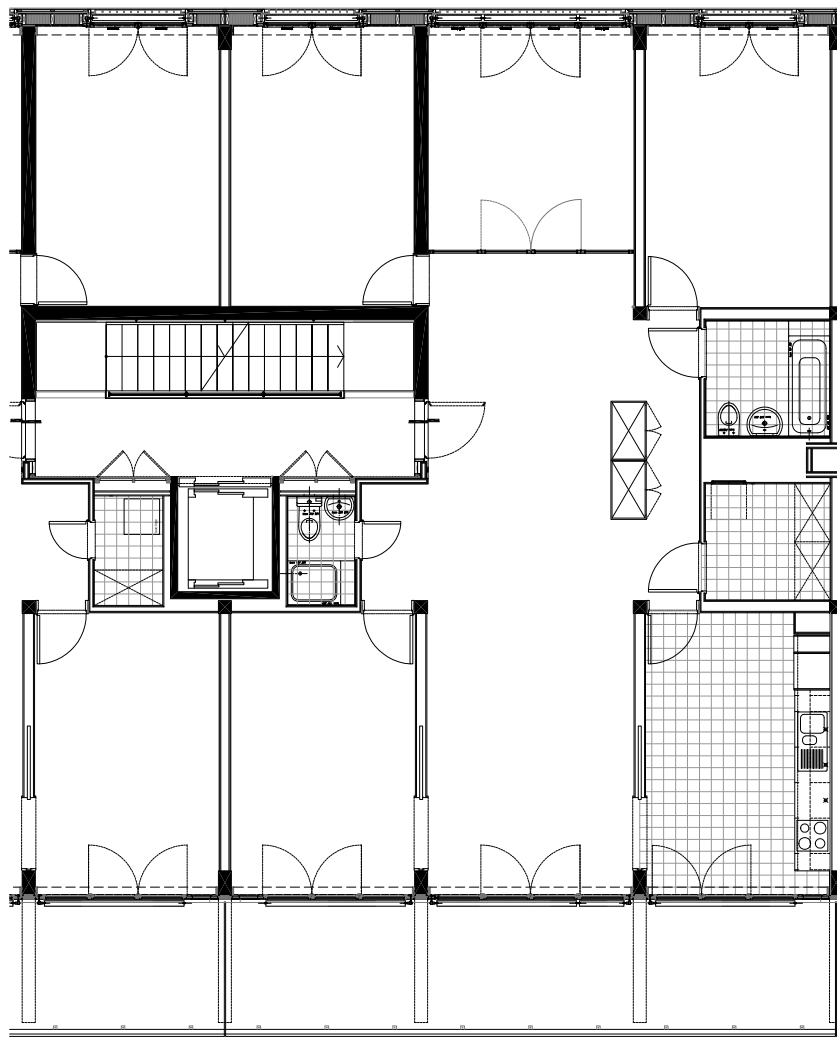


FIG. 1.6 – Coupe longitudinale des bâtiments (bas) et typologie des logements (haut)



FIG. 1.7 – Structure ponctuelle des bâtiments.

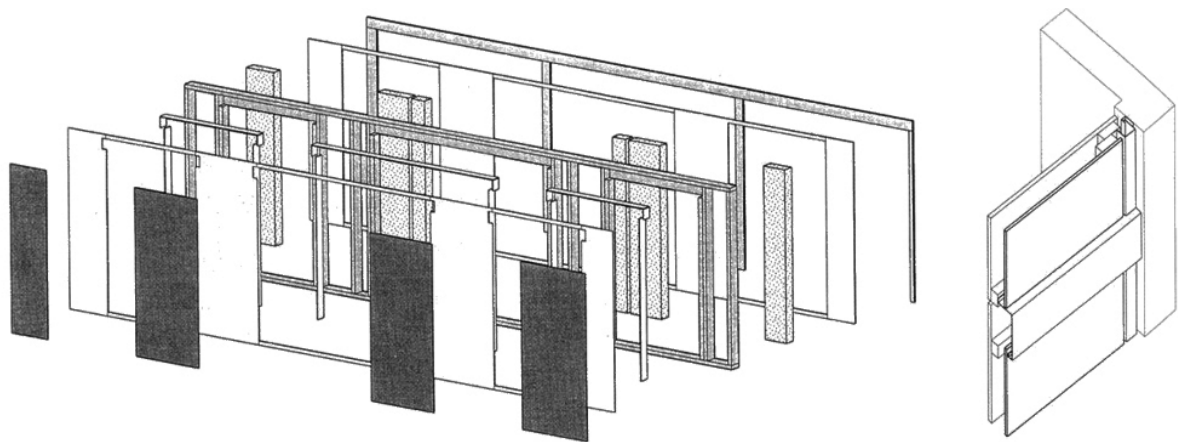


FIG. 1.8 – Composition structurelle des éléments de façade préfabriqués

d'exécution, qui ne peut être dissociée du projet d'ensemble. En effet, la structure, l'organisation des espaces, la transparence, le style ou encore les espaces extérieurs doivent être traités avec un grand soin, tout au long des étapes du projet, de l'exécution et de la maîtrise des coûts. De cette maîtrise d'oeuvre dépendent, non seulement l'entretien futur de l'ouvrage, mais également la vie et le confort des habitants.

1.3.3 Une nécessaire attention portée aux modes de construction

La maîtrise d'oeuvre se décompose en quatre catégories principales : la structure ou l'ossature (assurer la pérennité de l'ouvrage, qualifier les espaces), l'enveloppe composée de la façade et de la toiture (isoler, protéger, relier), les aménagements intérieurs (définir et relier les espaces) et les équipements (chauffer, ventiler, éclairer, alimenter en eau et en énergies). C'est donc dans ces parties d'ouvrage que des choix de matériaux ainsi que des techniques constructives spécifiques ont été effectués.

Ainsi la structure est en béton armé, avec un système d'appui ponctuel depuis le rez-de-chaussée (voir Figure 1.7). Une bonne partie des éléments de béton est préfabriquée. L'enveloppe est basée sur le principe d'une façade ventilée, composée d'éléments en bois et fibrociment (voir Figure 1.8), de fenêtres en bois-métal et d'une toiture isolée en verre cellulaire puis végétalisée.

L'aménagement des logements est organisé de manière traversante sur la trame de la structure. Les cloisonnements sont composés de panneaux en plâtre-cartonné, avec portes de communication. Les revêtements sont traités avec des matériaux tels que : plâtre, chape ciment, bois de chêne, grès-céramique, peinture, papiers peints, etc. Les installations de distribution de la chaleur ainsi que les gaines de ventilation, sont intégrées dans les gaines techniques (visitables) et les épaisseurs des dalles en béton. L'intégration de ces multiples conduites dans le "corps" de la structure béton ou les cloisons nécessite, par ailleurs, de grandes précautions pour éviter des points faibles en isolation acoustique, particulièrement entre les logements.

A part une complication réelle de coordination des installations techniques (ventilation, chauffage, sanitaires et électricité), l'objectif d'atteindre le standard Minergie n'a pas changé notre [architectes] façon de concevoir les rapports entre architecture et construction. Seules les dimensions varient. Il faut bien sûr gérer les épaisseurs isolantes, les normes, leurs conséquences, les amortissements. Il s'agit d'un long montage entre une vingtaine de métiers différents sur le chantier avec des ressources humaines et matérielles à coordonner. Il faut anticiper des savoir-faire dans la manière d'assembler, d'ajuster, pour finalement donner une architecture parmi d'autres, dont l'appréciation dépendra de la qualité fonctionnelle et rationnelle qui qualifie en partie l'esthétique apparente.

1.3.4 Détail en coupe des façades et consoles des balcons

La Figure 1.9 donne les détails en coupe des trois types de façades principales composant les bâtiments. Les consoles de support des balcons ont fait l'objet d'un traitement ponctuel pour réduire les ponts thermiques (mandat Cuepe). Ces dernières sont illustrées à la Figure 1.10.

1.3.5 Informations générales

La liste des intervenants principaux est dressée ci-dessous et les caractéristiques générales des bâtiments sont présentées dans la Table 1.2.

Maître d'ouvrage	CIA caisse de prévoyance, Division immobilière
Architectes	Groupe ME.COL/ Metron & Collectif d'architectes
BBBM Ingénieurs civils	Mantilleri & Schwarz société d'ingénieurs SA
Ingénieurs thermiciens	SB Technique
Ingénieurs sanitaires	Technosan SA
Ingénieurs électricité	Dumont & Schneider
Conseiller en acoustique	F.Lançon & J.Schaad
Suivi énergétique	Université de Genève - CUEPE
Années de réalisation	octobre 2001 à décembre 2004

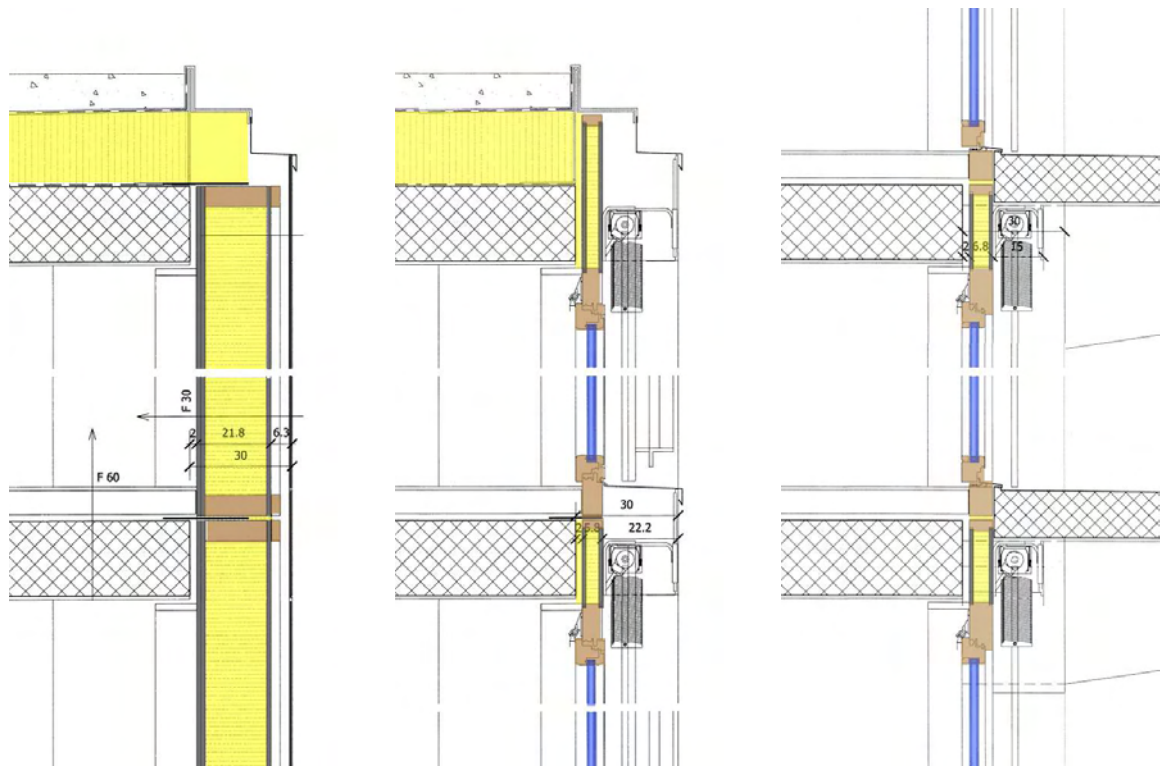


FIG. 1.9 – Détail en coupe des façades opaques (gauche), vitrées sans balcon (milieu) et vitrée avec balcon (droite)



FIG. 1.10 – Consolés de support des balcons.

Caractéristiques du bâtiment	Sonnex	Giacometti	Gardiol	Total	Unité
Surface de référence énergétique (SRE)	8'107	4'605	8'203	20'915	m ²
> logements	-	-	-	17'520	m ²
> surface commerciale	-	-	-	3'395	m ²
Volume chauffé net	18'972	10'681	19'026	48'679	m ³
Surface de l'enveloppe	6'467	3'857	6'396	16'720	m ²
Nombre d'appartements	35	24	58	117	app
Nombre de pièces	200	152	263	615	pièce
Coût total de l'ouvrage	-	-	-	52'155'610	CHF TTC
État locatif (2006)	-	-	-	4'401'480	CHF/an
Surface enveloppe / SRE	0.80	0.84	0.78	0.80	m ² /m ²
Cube SIA				100'855	m ³
SRE logements / pièce	-	-	-	28	m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	-	-	-	2494	CHF/m ²
Coût de l'ouvrage / Cube SIA	-	-	-	517	CHF/m ³ SIA
État locatif / SRE	-	-	-	210	CHF/m ² an

TAB. 1.2 – Caractéristiques générales des bâtiments du Pommier

1.4 Concept énergétique

1.4.1 Présentation du concept

Le concept énergétique global est représenté à la Figure 1.11. Le bâtiment central (Giacometti) abrite deux chaudières à gaz. Un réseau de conduites à distance (CAD) permet de distribuer la chaleur aux cinq sous-stations réparties dans les trois bâtiments formant le complexe.

Chaque sous-station est composée d'une cuve de stockage thermique intégrant un ballon d'ECS, d'une installation solaire thermique pour le préchauffage de l'ECS et d'une installation de ventilation à double-flux équipée d'une pompe à chaleur sur air vicié (voir Figure 1.12). Cette dernière peut travailler en mode air-air, en fournissant la chaleur sur l'air pulsé, ou en mode air-eau, en fournissant la chaleur dans la cuve de stockage thermique.

En période de chauffage et pendant les entre-saisons, les chaudières sont actives et la pompe à chaleur fonctionne prioritairement en mode air-air pour garantir une température de pulsion de 21°C au départ du monobloc. La distribution de chaleur en période de chauffage est réalisée par des radiateurs équipés de vanne thermostatique. En été, les chaudières sont arrêtées et l'ECS est produite uniquement à partir du solaire thermique et de la pompe à chaleur. Le CAD se remet en route automatiquement en cas d'insuffisance de la production d'ECS. L'ECS est distribuée à une température constante de 45 °C au moyen d'un mitigeur.

Dans le cadre de cette étude, nous avons mesuré tous les paramètres du bâtiment Giacometti ainsi que les principales variables météorologiques (voir les éléments grisés du graphique de droite de la Figure 1.11). Nous avons également équipé la première sous-station du bâtiment Sonnex pour avoir une redondance dans la mesure. Les trois bâtiments étant de conception identique, nous

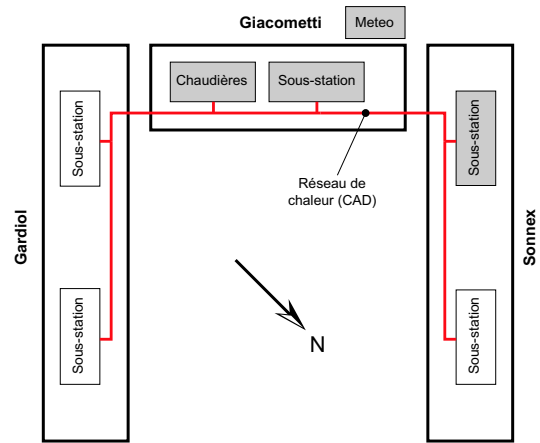


FIG. 1.11 – Gauche : vue des trois bâtiments formant le complexe du Pommier. Droite : concept énergétique global. Les éléments mesurés dans le cadre de cette étude sont représentés en gris.

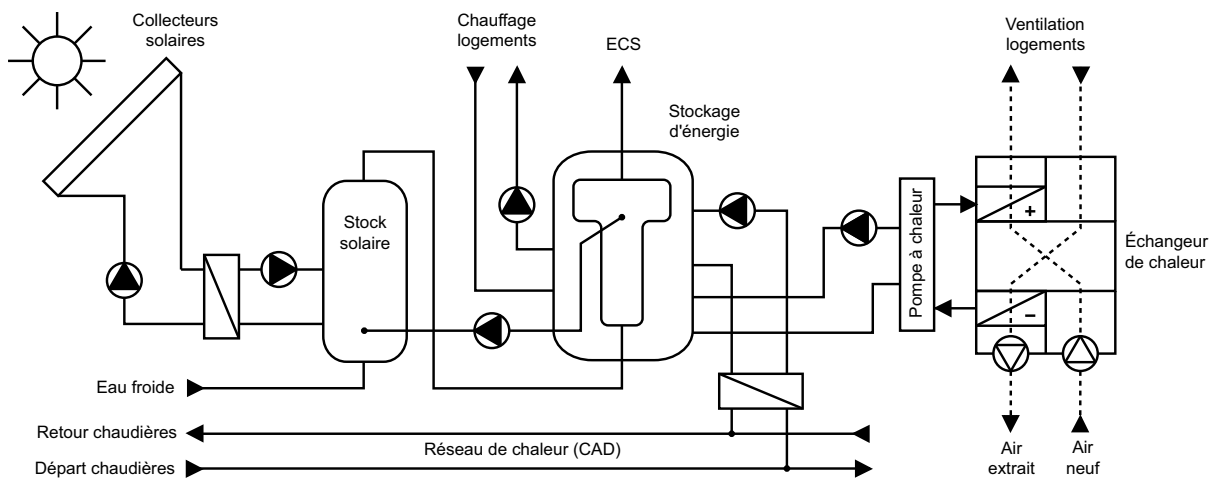


FIG. 1.12 – Concept énergétique des sous-stations.

nous sommes basés sur les résultats de Giacometti pour évaluer la performance de l'ensemble du complexe.

1.4.2 Description des systèmes techniques du bâtiment Giacometti

La Figure 1.13 illustre le schéma de distribution des circuits de chauffage et de ventilation pour un appartement-type. Les radiateurs sont raccordés en boucles au moyen d'un système monotube posé sous la chape. L'air neuf est pulsé dans les chambres, la salle de séjour et la cuisine. L'air vicié est extrait par les salles d'eau, la cuisine et le réduit.

Les deux chaudières à gaz sont des Ygnis Pyrogas Varino 250 kW à condensation (Figure 1.14). Elles représentent une puissance spécifique installée de 24 W/m². Leur capacité de modulation leur permet d'ajuster la puissance totale fournie sur le réseau de chaleur dans une plage allant de 25 à 500 kW.

La cuve de stockage thermique a une capacité de 3'600 litres (Figure 1.15 gauche). Elle intègre

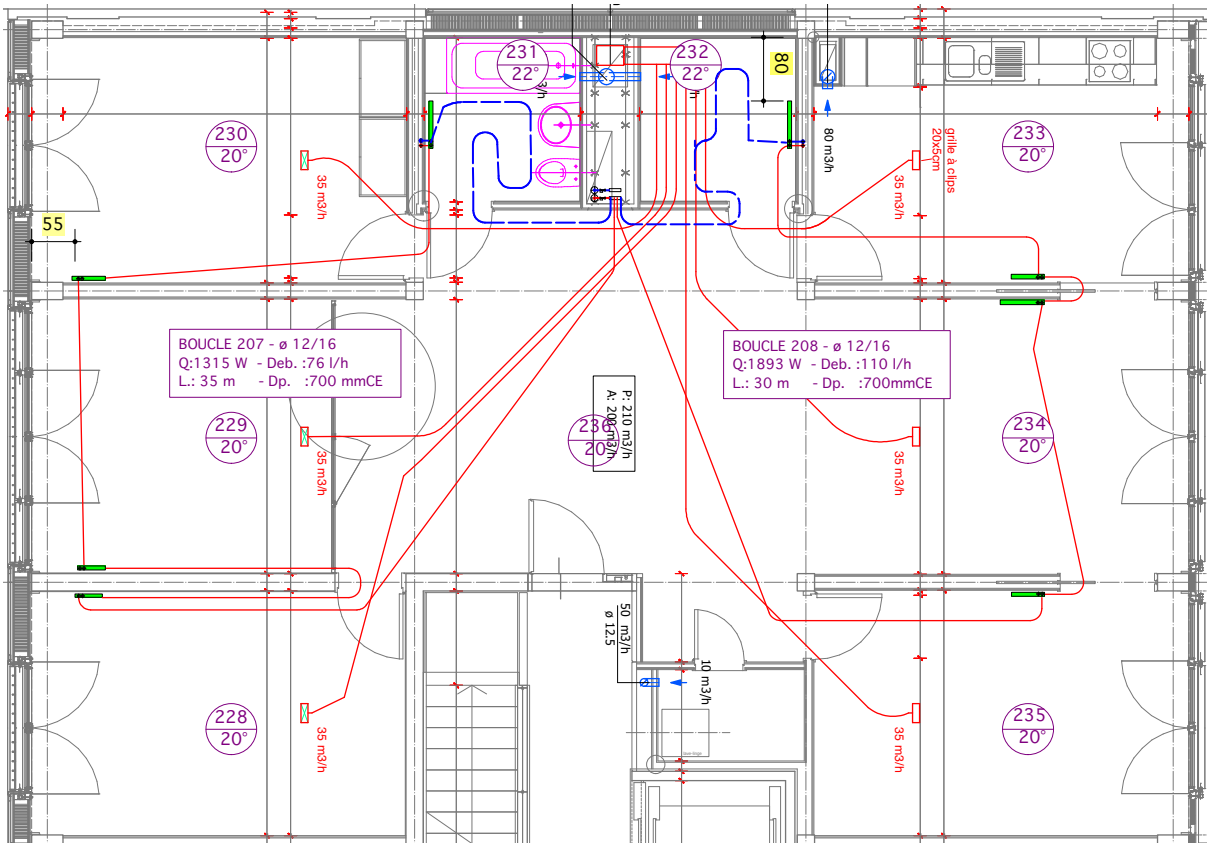


FIG. 1.13 – Schéma de distribution des circuits de chauffage/ventilation pour un appartement-type



FIG. 1.14 – Gauche : les deux chaudières à gaz à condensation d'une puissance modulable de 25 à 250 kW chacune (Ygnis). Droite : distribution de chaleur en sortie des chaudières (CAD).

également le ballon d'ECS d'une contenance de 1'500 litres. La cuve reçoit la chaleur fournie par le CAD et par la pompe à chaleur sur air vicié. Cette chaleur est ensuite transférée par circuit hydraulique aux radiateurs des appartements et transmise à l'ECS par conduction thermique. Une isolation de 120 mm permet de limiter les déperditions thermiques.

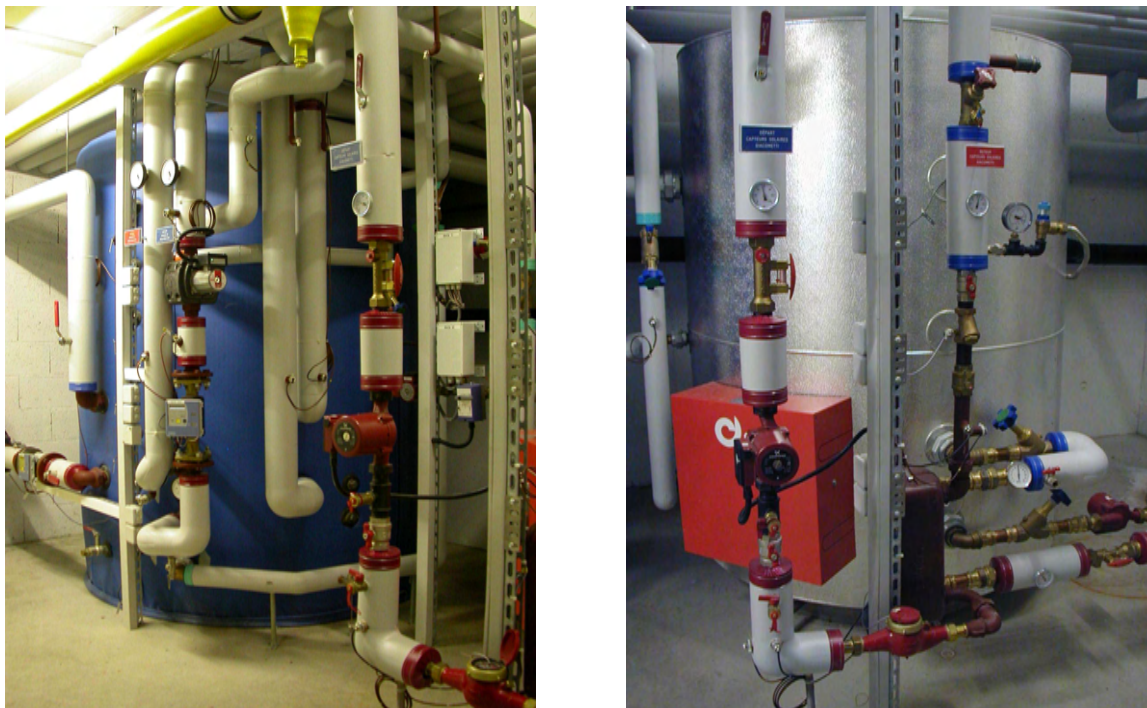


FIG. 1.15 – Éléments de la sous-station Giacometti. Gauche : cuve de stockage thermique de 3'600 litres contenant également un ballon d'ECS de 1'500 litres. Droite : cuve de stockage solaire de 2'000 litres. Au premier plan, circuit primaire des capteurs.

L'installation solaire thermique possède une surface de captage de 44 m^2 , soit environ 0.5 m^2 par utilisateur (Figure 1.16). Les capteurs sont des Agena Azur 6. Le fluide caloporteur du circuit primaire qui relie le champ de capteurs à l'échangeur de chaleur contient environ 1/3 de propylène glycol (antigel). Le circuit secondaire de l'échangeur de chaleur est directement traversé par l'eau sanitaire. La cuve de stockage a une capacité de 2'000 litres, soit 45 litres par m^2 de capteur (Figure 1.15, droite).

Le monobloc de ventilation est un modèle Menerga Dosolair de $6'000 \text{ m}^3/\text{h}$, soit $1.3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ (Figure 1.17). Il intègre deux échangeurs de chaleur en série, des clapets de bypass qui lui permettent de faire du free-cooling ainsi qu'une pompe à chaleur sur air vicié. L'évaporateur de la PAC est situé sur le flux d'air extrait après l'échangeur de chaleur. Le système permet de faire travailler la PAC en deux modes différents. Le premier mode permet de faire le post-chauffage de l'air pulsé. La chaleur est fournie au condenseur situé sur le flux d'air neuf après l'échangeur de chaleur (mode air-air). Le deuxième mode permet de fournir un appoint à la production de l'ECS. La chaleur est fournie à la cuve de stockage thermique par un circuit hydraulique (mode air-eau). La puissance thermique fournie par la PAC peut atteindre 25 kW par $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ extérieur en mode air-air et 25 kW en mode air-eau.



FIG. 1.16 – Installation solaire thermique de 44 m² en toiture du bâtiment Giacometti (seulement une moitié visible sur les photos).



FIG. 1.17 – Gauche : monobloc de ventilation à double-flux avec double échangeur de chaleur. Débit nominal de 6'000 m³/h. Droite : prises d'air neuf.

1.5 Acquisition des données

1.5.1 Stratégie de mesure

Les trois bâtiments faisant partie du complexe à évaluer sont tous de conception identique. Les bâtiments Sonnex et Gardiol représentent chacun un double bâtiment Giacometti en terme de surface et d'équipement (voire Figure 1.11). De plus, le bâtiment central Giacometti abrite également les deux chaudières à gaz. Pour ces raisons évidentes, nous avons décidé d'instrumenter complètement et uniquement le bâtiment Giacometti. Une station de mesure des conditions météorologiques a été installée en toiture du même bâtiment. La première sous-station du bâtiment Sonnex (anciennement nommée Jura 1) a également été équipée. Cette redondance a permis de valider ponctuellement les résultats obtenus sur Giacometti. Nous ne détaillerons donc pas cette partie de l'équipement, qui est en tout point similaire à l'installation Giacometti.

La Figure 1.18 illustre le schéma de principe du monitoring. Un système d'acquisition (datalogger) a été installé dans le bâtiment Giacometti. Des câbles multiconducteurs en cuivre ont relié ce dernier à 4 boîtes de dérivation pour le comptage d'impulsions ou les mesures analogiques (BG2, BG3, BG4, BJ2) et 2 boîtes thermalisées pour les mesures de température (BG1, BJ1).

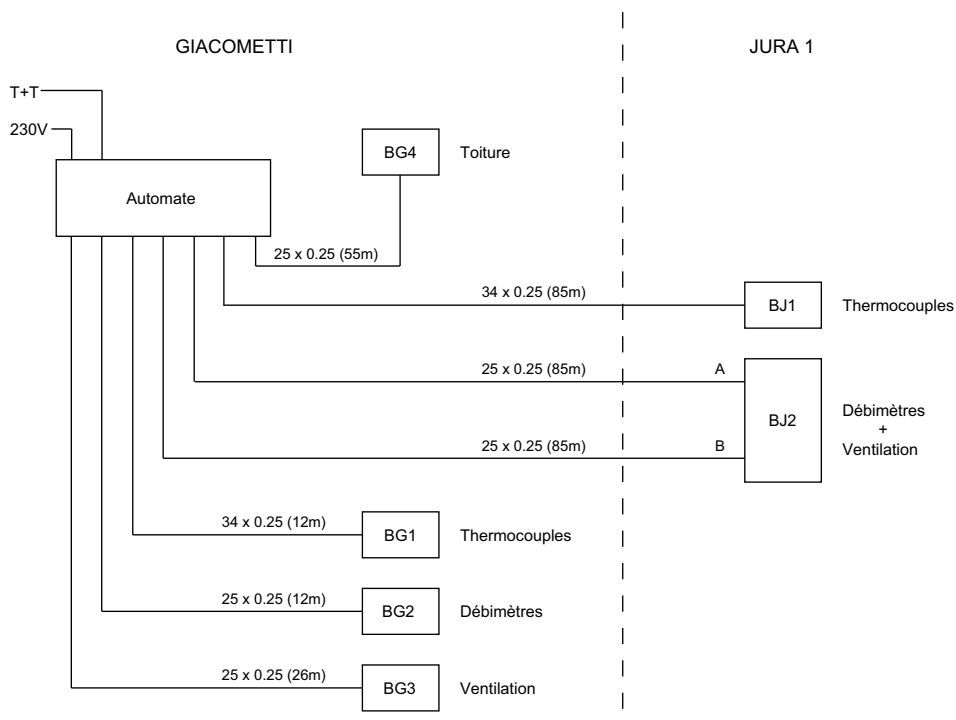


FIG. 1.18 – Schéma de principe du monitoring (Jura1 = premières sous-station du bâtiment Sonnex)

Le datalogger était programmé pour effectuer une mesure toutes les 10 secondes. Simultanément, le produit du débit (litre) par la différence de température (ΔK) était effectué pour les différents flux thermiques. La moyenne/somme de toutes les variables était enregistrée dans l'appareil toutes les 5 minutes. Une connexion analogique au réseau téléphonique permettait un téléchargement quotidien des mesures.

La Figure 1.19 indique l'emplacement des capteurs situés sur les éléments de la sous-station Giacometti, des capteurs situés sur les chaudières à gaz et des capteurs de la station météorologique installée en toiture. Les ronds rouges représentent des thermocouples et les carrés rouges des débitmètres. La liste détaillée des capteurs se trouve à l'annexe A.

Le monobloc de ventilation Menerga possède une centrale de régulation numérique qui mesure en permanence de nombreux paramètres de fonctionnement tels que les débits, les pertes de charge, les températures ou encore la position des divers clapets de régulation. Un système propriétaire "Freezmo" a été installé par la société Enerbat pour effectuer une télésurveillance des cinq monoblocs du complexe, tous reliés par un bus de communication. Nous avons pris l'option de récupérer ces mesures pour l'appareil Giacometti au lieu de l'équiper complètement. Nous avons uniquement installé quatre sondes de température sur les flux d'air comme illustré dans la Figure 1.20 (capteurs 36 à 39).

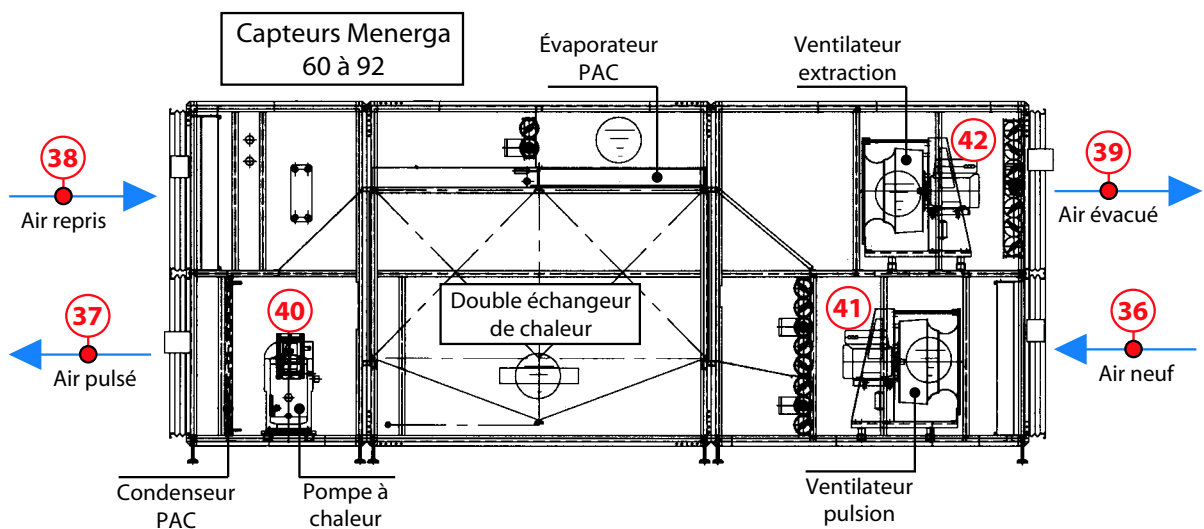


FIG. 1.20 – Monitoring du monobloc double-flux "Menerga". En rouge les sondes étalonnées et posées par le Cuepe. Nous avons également récupéré les mesures du système de régulation du monobloc sous forme d'un fichier CSV. La liste des capteurs se trouve à l'annexe A.

Une connexion téléphonique analogique permettait de rapatrier les fichiers CSV contenant les mesures de l'appareil Giacometti. À l'usage, cette manière de procéder s'est révélée peu pratique et chronophage. En effet, un traitement conséquent de ces fichiers était nécessaire pour les rendre compatibles avec les mesures du datalogger (points manquants, changements d'horaire été/hiver, synchronisation des horloges, etc). Il aurait été beaucoup plus simple de sélectionner les paramètres les plus pertinents, de les exporter sur des sorties analogiques ou digitales galvaniquement isolées et de les rapatrier sur le datalogger.

Des mesures de consommation électrique ont également été effectuées de manière ponctuelle. Il s'agit, entre autres, de la consommation du bâtiment (chaufferie, logements, parking, etc) ainsi que des trois éléments principaux du monobloc de ventilation : la pompe à chaleur et les deux ventilateurs.

Finalement, une mesure spot sur une semaine du coefficient U d'un élément de façade et d'un vitrage a également été effectuée.

1.5.2 Description des systèmes de mesure

1.5.2.1 Acquisition des mesures (Datalogger)

L'appareil d'acquisition des données utilisé est un Campbell Scientific CR7 [30]. Cet appareil permet de réaliser des mesures d'une grande précision avec un multitude de capteurs différents. La Figure 1.21 présente l'appareil et l'armoire dans laquelle il se trouvait.



FIG. 1.21 – Armoire (gauche) contenant le datalogger de mesure (droite).

C'est un système modulaire où chaque carte d'acquisition gère ses entrées de manière indépendante grâce à son processeur intégré. Cela permet aux cartes d'acquisition digitale de garantir une haute fiabilité dans le comptage des impulsions. La résolution de lecture des cartes analogiques vaut 100 nV pour la plus petite échelle sélectionnée (± 1.5 mV) et 333 μ V pour la plus grande (± 5000 mV).

Le datalogger a fait l'objet d'une calibration en usine avant son intégration au Pommier. Nous avons mesuré l'offset des quatre cartes d'acquisition analogique pour vérifier leur évolution au cours des années d'exploitation. La dernière entrée de chacune des cartes a été reliée à la masse et mesurée toutes les 10 secondes. La Figure 1.22 illustre le résultat depuis 2005 jusqu'à 2007.

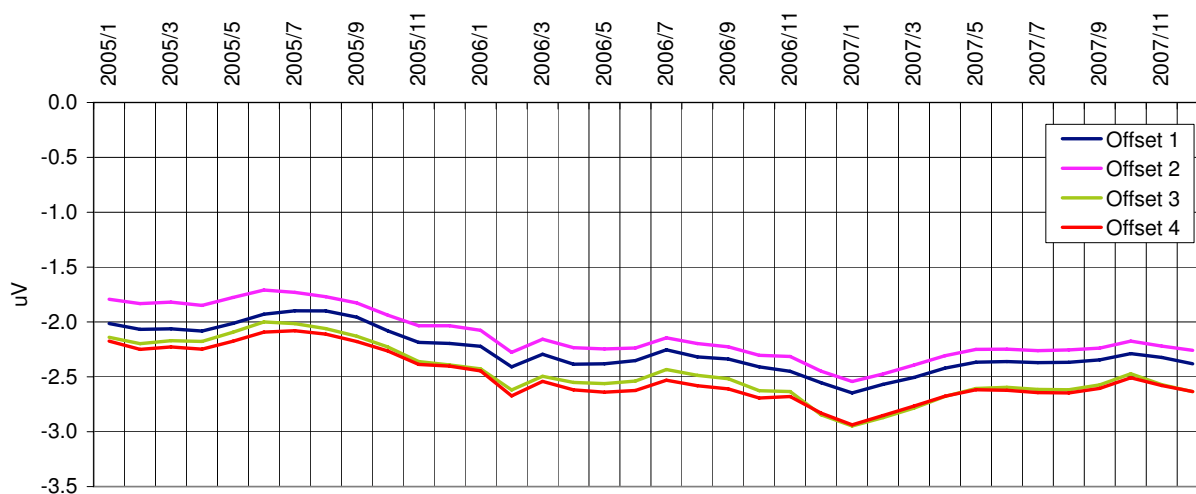


FIG. 1.22 – Évolution de l'offset moyen des quatre cartes d'acquisition du datalogger Campbell Scientific CR7. Les variations de l'offset moyen sont de l'ordre de ± 0.25 μ V.

Les mesures de température différentielles ont été effectuées avec des entrées situées sur la même carte. L'offset ne joue pas de rôle dans ce type de mesure. En revanche, la comparaison de deux thermocouples situés sur des cartes différentes est entachée d'une erreur maximum de $0.5 \mu\text{V}$, comme le montre la mesure des offsets. Pour les thermocouples utilisés (cuivre-constantan), cet écart représente une différence de $0.013 \text{ }^\circ\text{C}$.

Le code de programmation est structuré pour optimiser les mesures et il contient des instructions dédiées à la gestion de capteurs spécifiques tels que les résistances de platine (PT100) ou les anémomètres. Finalement, ce matériel s'est révélé d'une fiabilité exemplaire puisqu'aucune donnée n'a été perdue en trois ans et demi d'exploitation continue.

1.5.2.2 Mesure des températures

La température des fluides a été mesurée au moyen de thermocouples de type T (cuivre-constantan). Ces derniers, au préalable enduits de pâte thermique, ont été insérés dans des doigts de gants en cuivre disposés sur les conduites hydrauliques (voir la photo de droite de la Figure 1.24). Nous avons utilisé le principe de la boîte thermalisée avec mesure de la jonction froide, comme illustré dans le schéma de gauche de la Figure 1.23. Ce montage permet d'effectuer des mesures éloignées du datalogger tout en garantissant une grande précision de la mesure.

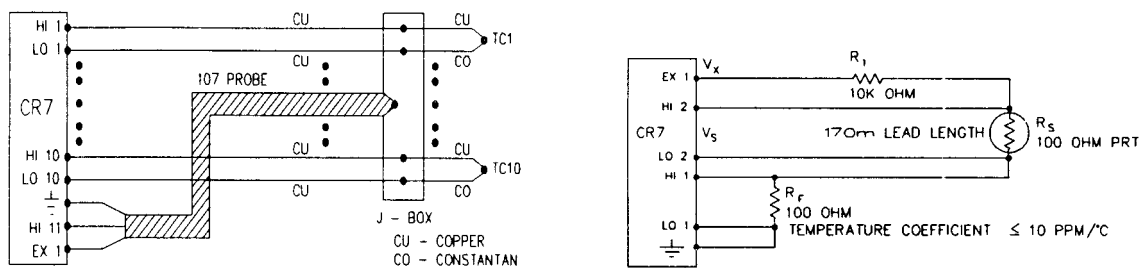


FIG. 1.23 – Gauche : principe de mesure utilisé pour les thermocouples. Une boîte, reliée au datalogger par un câble en cuivre, contient une sonde de référence (dans notre cas une PT100) qui mesure la jonction froide des thermocouples cuivre-constantan. Droite : principe de mesure des résistances au platine PT100. Source : Campbell Scientific, CR7 instruction manual.

Un câble multiconducteur relie le datalogger au bornier de la boîte de jonction. Les thermocouples sont connectés de l'autre côté du bornier. Une différence de potentiel apparaît sur la jonction cuivre-constantan du bornier et aux bornes l'autre jonction cuivre-constantan en contact thermique avec le fluide. Cette différence de potentiel est d'environ $40 \mu\text{V}$ par degré d'écart entre les deux jonctions. Une résistance de platine PT100 située sur le bornier permet de mesurer avec précision la température de la jonction "froide" et donc de connaître la différence de potentiel associée. En mesurant la tension aux bornes du datalogger et en ajoutant la tension de la jonction froide (les potentiels sont inversés), il est possible de connaître avec une grande précision la température de la jonction "chaude".

Les résistances de platine PT100 ont été câblées sur le datalogger selon le schéma de droite de la Figure 1.23. Ce montage, associé à une procédure de mesure par tension d'excitation, permet de garantir une excellente précision et une très bonne immunité aux perturbations extérieures pour des éléments éloignés.

Les thermocouples et les résistances de platine ont été étalonnées dans des bains thermalisés au moyen de thermomètres étalons de marque Thermoschneider Karl Schneider & Sohn (précision 0.01°C). Plusieurs points de calibration ont permis de déterminer les facteurs de correction et d'atteindre une précision de $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ pour les thermocouples et de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ pour les PT100 (voir la photo de gauche de la Figure 1.24).

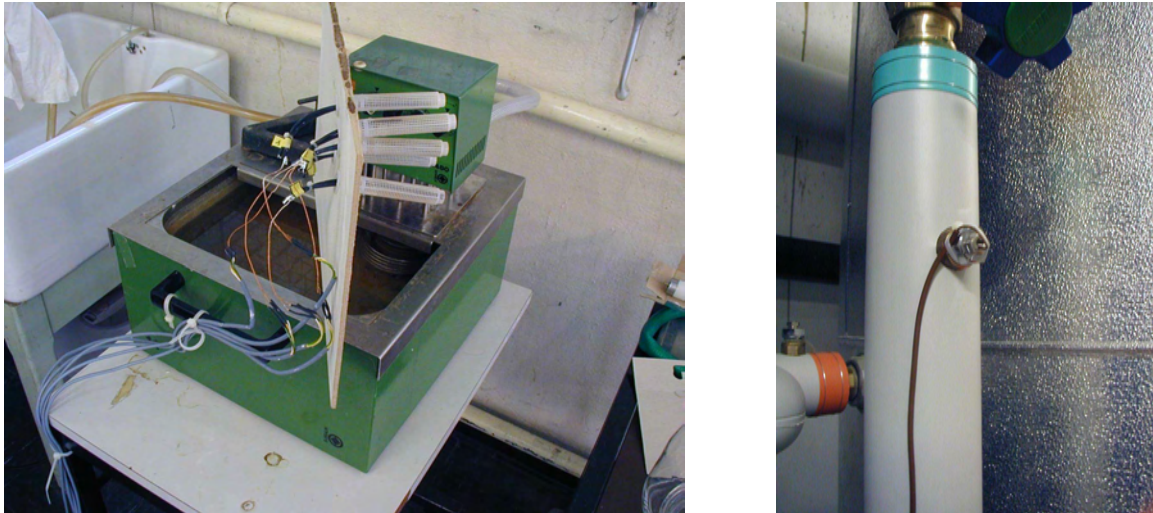


FIG. 1.24 – Gauche : système utilisé pour l'étalonnage des thermocouples (bain thermalisé). Droite : les thermocouples sont ensuite enduits de pâte thermique et insérés dans les doigts de gant prévus à cet effet.

1.5.2.3 Mesure des débits

Le débit des fluides a été mesuré au moyen de débitmètres équipés de sortie à impulsions. Les appareils dédiés à notre campagne de mesure ont été câblés directement sur les cartes d'acquisition du datalogger. Pour les débitmètres équipant les compteurs de chaleur en fonction, nous avons récupéré les impulsions au moyen d'un double optocoupleur permettant de garantir l'isolation galvanique du système de mesure (voir Figure 1.25).

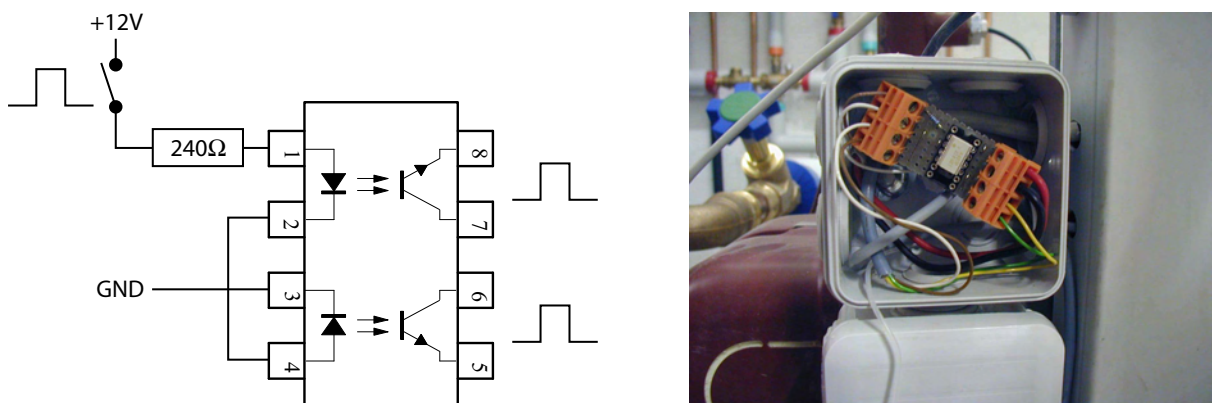


FIG. 1.25 – Principe de câblage pour la répétition des impulsions d'un débitmètre avec isolation galvanique (gauche) et montage du circuit in-situ (droite).

1.5.2.4 Station météorologique

Une station météorologique a été installée en toiture du bâtiment Giacometti. Elle comprend trois solarimètres, une sonde de température et un hygromètre (voir Figure 1.26).



FIG. 1.26 – Gauche : solarimètres pour la mesure de l'ensoleillement global dans le plan horizontal et dans le plan des capteurs Giacometti et Jura/Salève. Également mesure de la température extérieure à l'aide d'une sonde abritée et ventilée. Droite : hygromètre abrité sous les capteurs.

Le premier solarimètre mesure le rayonnement global horizontal. Le deuxième est installé dans le plan des capteurs du bâtiment Giacometti (orientation $+43^{\circ}$ O, inclinaison 35°) et le troisième dans le plan des capteurs des bâtiments Gardiol et Sonnex (orientation -47° E, inclinaison 35°). Les trois solarimètres ont été étalonnés par nos soins au moyen d'un appareil étalon Kipp & Zonnen CM10, lui-même régulièrement étalonné au Centre Mondial de Radiation à Davos (voir Figure 1.27). La précision obtenue varie entre 0.4% et 0.6%.



FIG. 1.27 – Gauche : solarimètre étalon Kipp & Zonnen. Droite : solarimètres sur le banc d'étalonnage.

La température de l'air extérieure est mesurée par une PT100 étalonnée par nos soins. La sonde est protégée du rayonnement solaire direct et diffus par des coupelles métalliques et ventilée en permanence au moyen d'un ventilateur électrique. L'hygromètre a été installé sous le couvert des capteurs.

1.5.2.5 Mesures électriques

Des mesures de consommation électrique ont été effectuées de manière ponctuelle. Nous avons utilisé pour cela des convertisseurs de mesure Camille Bauer M563 couplés à des pinces ampèremétriques. Ces appareils possèdent trois sorties analogiques programmables qui permettent de sélectionner, entre autres, la puissance active, réactive, le facteur de puissance, courant et tension, etc.

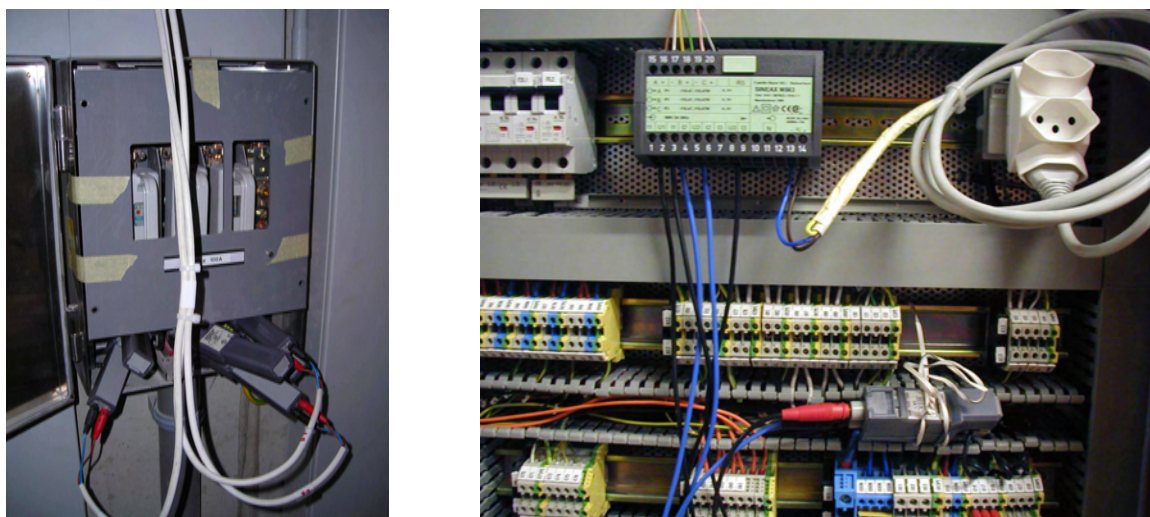


FIG. 1.28 – Gauche : mesure de la consommation électrique générale de l’allée. Droite : mesure de la consommation électrique de la pompe à chaleur du système de ventilation double-flux.

En alimentant le convertisseur par un disjoncteur triphasé de réserve, il nous a été possible d’effectuer toutes les mesures dans les cabines SIG sans interrompre les circuits (voir photo de gauche de la Figure 1.28). Une série de mesures a également été effectuée dans le tableau du monobloc de ventilation. Dans ce cas, nous avons mesuré les trois tensions au moyen de culots à visser que l’on insère au centre des bornes du tableau et qui permettent d’y insérer une fiche banane (photo de droite de la Figure 1.28).

1.5.3 Exemple de mesure

La Figure 1.29 illustre un exemple de mesure des paramètres de fonctionnement liés à la production de l’ECS les deux premiers jours de septembre 2006.

Lors du soutirage, l’eau sanitaire arrive dans le bâtiment à une température d’environ 15°C (courbe bleue). Sa température est ensuite progressivement augmentée dans la journée par l’installation solaire (courbe rose). Un jour bien ensoleillé de septembre peut tout à fait produire de l’ECS à 60°C. Quand ce n’est pas le cas, le deuxième jour par exemple, le complément est apporté par la pompe à chaleur sur air vicié et le CAD pour produire de l’ECS entre 50 et 55°C (courbe orange). Le mitigeur mélange ensuite cette eau avec l’eau froide pour distribuer une ECS à 45°C (courbe verte).

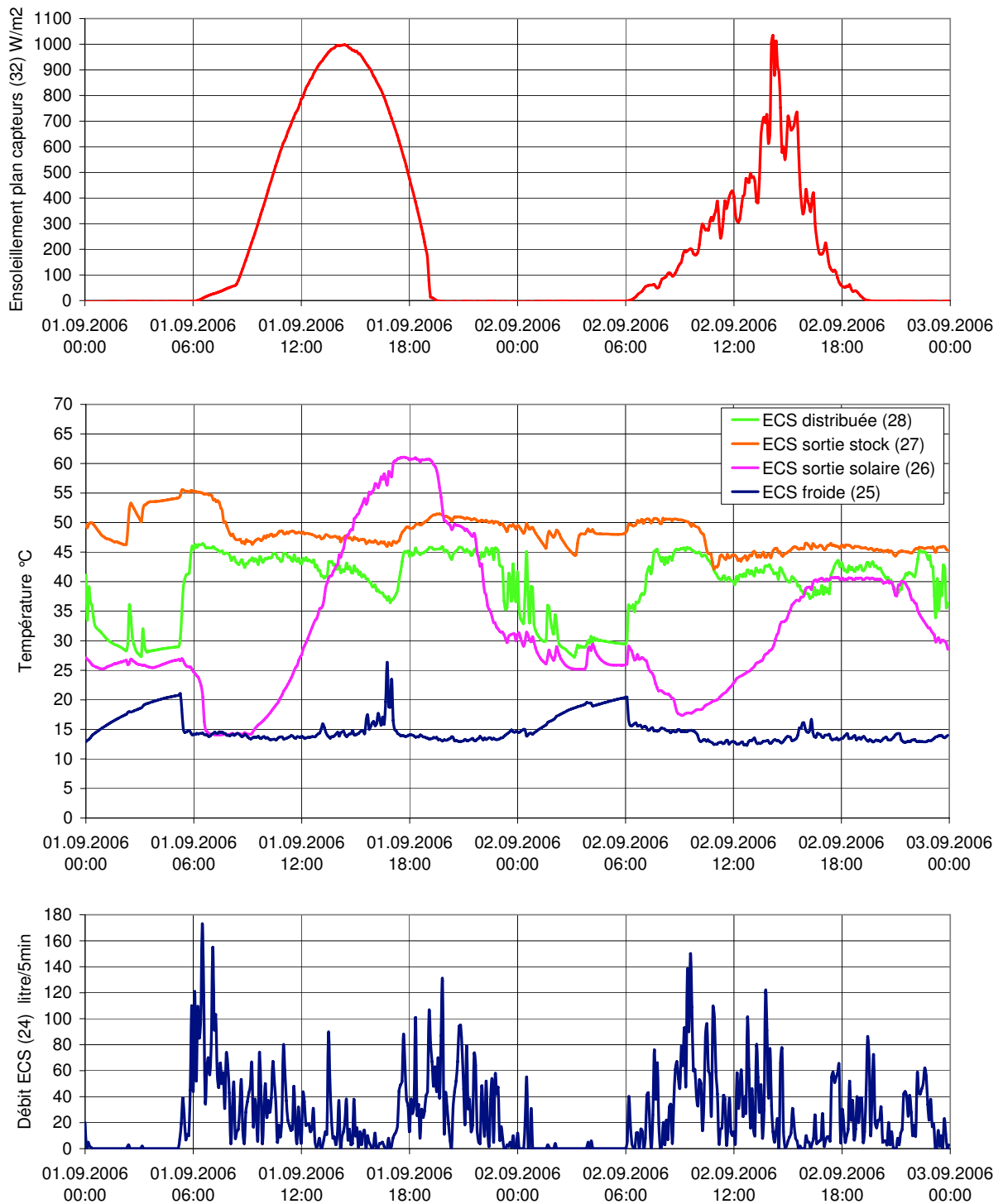


FIG. 1.29 – Exemple de mesure des paramètres de fonctionnement de l’ECS. Ensoleillement dans le plan des capteurs (haut), températures de l’ECS en différents points du processus (milieu) et débit de soutirage (bas). Valeurs par 5 minutes. Les numéros entre parenthèses font référence au numéro de la sonde.

1.6 Conclusions

Une approche interdisciplinaire des problèmes liés à l'énergie a été mise en oeuvre dès les premiers traits de crayon et pendant toute la durée du projet. La réflexion entre architecte, ingénieur, physicien du bâtiment et maître d'ouvrage a donné lieu à des solutions permettant de limiter la consommation d'énergie tout en préservant un confort de qualité pour les locataires et en assurant un bon contrôle des coûts.

La préparation, l'étalonnage, l'installation et la mise en service du système d'acquisition des données ont représenté plusieurs mois de travail. Mais cet investissement nous a permis de percevoir littéralement le "pouls" du bâtiment. Il nous a été possible de quantifier avec une extrême précision tous les flux pertinents et d'analyser en détail le fonctionnement des sous-systèmes.

Chapitre 2

Analyse énergétique

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse énergétique du bâtiment Giacometti. Le bilan thermique est détaillé et une analyse poussée de la consommation électrique est réalisée. Les signatures gaz et électricité sont présentées ainsi que le profil des demandes en chaleur pour le chauffage et l'ECS. Finalement, le confort thermique des logements est abordé et un résumé d'une analyse de la qualité de l'air intérieur menée par le STIPI vient conclure ce chapitre.

2.2 Bilan thermique détaillé

La Figure 2.1 présente le bilan thermique annuel du bâtiment Giacometti en MJ/m² pour la période comprise entre le 1er juin 2006 et le 31 mai 2007. Dans un souci de clarté, tous les résultats ont été arrondis à l'unité, mais les valeurs mensuelles sont disponibles à l'annexe B pour de plus amples informations. Un pouvoir calorifique supérieur de 37.5 MJ par m³ de gaz a été utilisé pour la conversion. Cette valeur est extraite d'une étude similaire réalisée par le Cuepe sur la cité solaire de Plan-les-Ouates à Genève [22][23, page 86].

Il n'y a qu'une seule pompe à chaleur installée dans le monobloc de ventilation qui opère selon deux modes distincts : en mode air-air pour le post-chauffage de l'air pulsé et en mode air-eau pour fournir l'appoint à l'ECS. Mais pour des raisons de compréhension, elle a été représentée en deux blocs distincts sur le schéma, bien qu'il s'agisse du même appareil. Finalement, il est important de souligner que l'hiver 2006/2007 a été particulièrement doux.

2.2.1 Flux énergétiques

2.2.1.1 Flux entrants

La production de chaleur est assurée par la consommation annuelle de 161 MJ/m² de gaz et de 27 MJ/m² d'électricité. Le gaz est utilisé comme combustible dans les chaudières. La chaleur produite est ensuite distribuée aux sous-stations au moyen d'un réseau de conduites à distance. L'électricité est utilisée à hauteur de 96% par l'installation à double-flux et la pompe à chaleur, qui valorisent ensemble environ 75% des rejets thermiques de la ventilation. Les 4% d'électricité restants alimentent l'installation solaire thermique qui capte une partie du flux solaire incident (44 m²) et le transforme en chaleur.

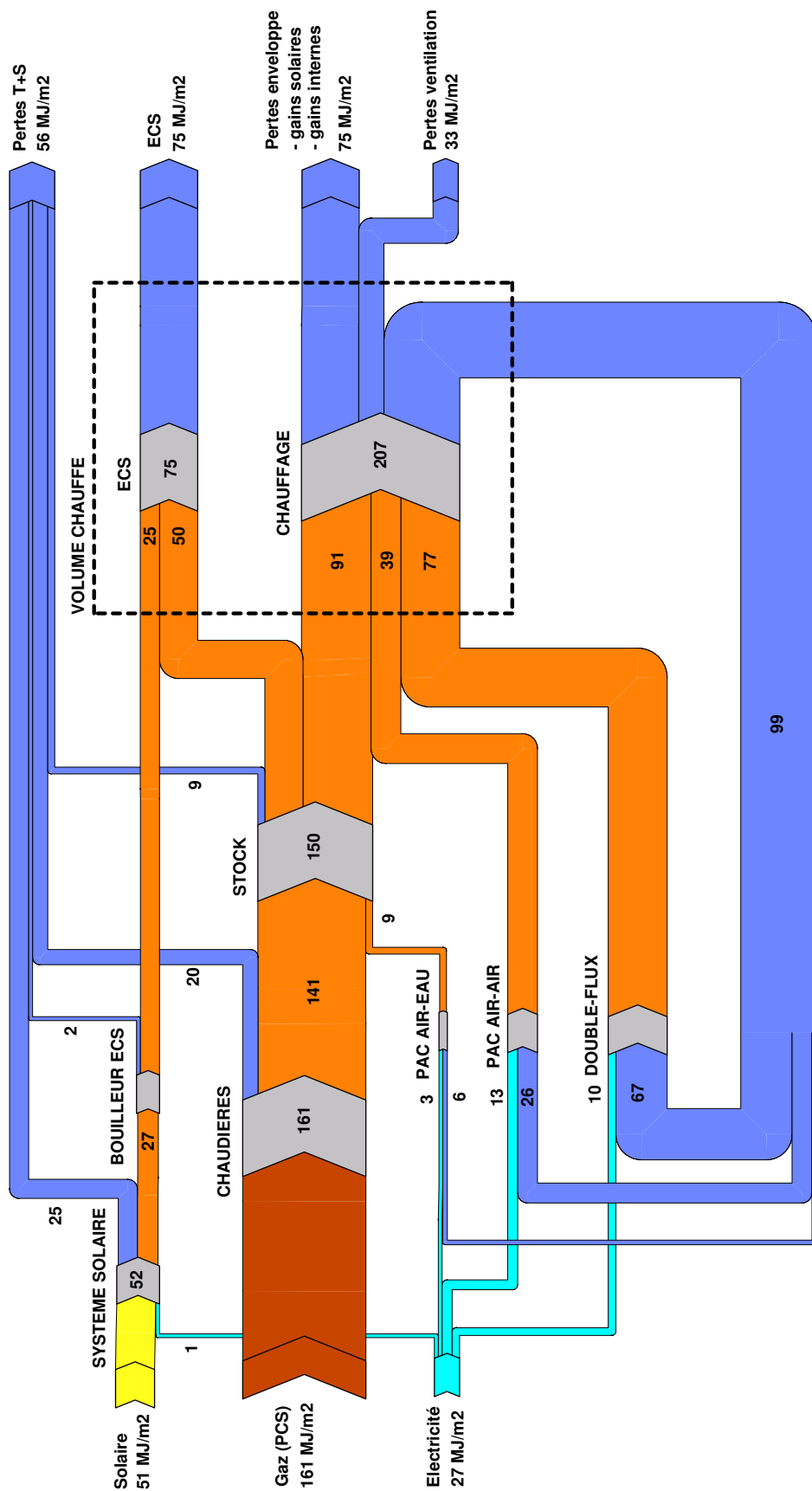


FIG. 2.1 – Bilan thermique du bâtiment Giacometti du 1er juin 2006 au 31 mai 2007. Il est important de souligner que l’hiver 2006/2007 a été particulièrement doux.

Les gains internes et solaires, qui participent également au bilan thermique du bâtiment, ne sont pas représentés sur ce schéma car ils sont difficilement quantifiables. La seule valeur que l'on peut donner avec une bonne précision est celle des gains internes électriques. La consommation annuelle des logements a été de 63 MJ/m^2 , à laquelle on peut estimer que s'ajoutent les $2/3$ de la consommation des services généraux, ce qui donne un apport total de 76 MJ/m^2 .

2.2.1.2 Flux sortants

La demande annuelle en eau chaude sanitaire a été de 75 MJ/m^2 . Elle a été couverte à 55% par le gaz, à 33% par le solaire et les 12% restants par la pompe à chaleur. La couverture solaire est en accord avec le dimensionnement de l'installation qui représente environ 0.5 m^2 de capteur par habitant.

La demande totale en chauffage a été de 207 MJ/m^2 . Il est intéressant de noter que plus de la moitié de la chaleur délivrée aux logements a été fournie par l'installation aéraulique. Le double-flux avec échangeur de chaleur en a fourni 37% et la pompe à chaleur 19%, soit un total de 56%. Le réseau traditionnel de radiateurs hydrauliques a fourni les 44% restants. Les pertes par ventilation sont réduites à 33 MJ/m^2 . Les pertes nettes de l'enveloppe (inclus gains solaires et internes) sont de 75 MJ/m^2 .

2.2.2 Efficacité des systèmes de transformation et de stockage

Le rendement de transformation annuel des chaudières, calculé aux bornes de ces dernières, est de 87% (PCS). Cette valeur n'est que 2% inférieure au rendement dynamique de l'ensemble (c.f. 3.4.2, page 81). Ce résultat remarquable est certainement dû à la capacité des chaudières à moduler la puissance fournie ce qui permet de réduire les cycles de marche/arrêt.

L'installation solaire thermique possède le meilleur coefficient de performance (COP) des systèmes électro-thermiques, avec 35 unités de chaleur produites pour une unité d'électricité consommée. Le système de ventilation à double-flux avec échangeur de chaleur présente également une bonne performance avec un COP annuel de 8. Cette valeur est calculée sur la base de la consommation du ventilateur de pulsion uniquement. En effet, on considère l'extraction d'air vicié comme un système faisant partie des installations de base d'un bâtiment d'habitation. Finalement, la pompe à chaleur présente un bilan annuel très moyen avec un COP en mode air-air de 2.9 et un COP en mode air-eau de 3.3. Sa performance annuelle globale est de 3.0.

Les pertes de stockage sont calculées par différence entre les entrées et les sorties. Ces valeurs intègrent donc également les erreurs de mesures inhérentes au système d'acquisition. Avec un total de 11 MJ/m^2 , ces pertes sont néanmoins quatre fois plus faibles que les pertes par transformation. Elles ne représentent que 4% de la chaleur fournie au volume chauffé.

2.3 Consommation électrique du bâtiment

Comme nous l'avons vu à la section précédente, les différents systèmes techniques destinés à améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment substituent du combustible (gaz) par de l'électricité. Des relevés de consommation ont été effectués sur tous les compteurs électriques du bâtiment, dans le but d'établir un bilan annuel et d'évaluer l'impact de ces systèmes sur la consommation électrique globale.

Des mesures dynamiques de la puissance active des principaux postes de consommation ainsi que de la puissance réactive globale ont été effectuées pendant la période de chauffage entre septembre 2007 et janvier 2008. A l'origine, le but de ces mesures était de quantifier les gains internes électriques pour effectuer une simulation thermique dynamique du bâtiment. Après réflexion, il a été décidé de porter l'effort sur la comparaison des résultats avec d'autres bâtiments (seconde partie de la thèse) au détriment de la simulation. En considérant les attentes des milieux professionnels en terme de performances technique, énergétique et économique, l'étude comparative recèle de loin une plus grande valeur ajoutée que la simulation dynamique.

L'analyse de ces mesures dynamiques et des relevés de consommation fait l'objet de cette section.

2.3.1 Mesure dynamique des puissances électriques

La Figure 2.2 illustre la répartition des postes de consommation électrique des deux allées du bâtiment. Les mesures de puissances actives ont été effectuées par pas de 5 minutes entre septembre et novembre 2007 pour l'allée 8, et entre décembre 2007 et janvier 2008 pour l'allée 10. La stratégie a consisté à mesurer simultanément l'alimentation générale et les grands postes de consommation - Parking, Services Généraux, etc - puis de soustraire ces derniers à l'alimentation générale pour obtenir la consommation des logements. Les deux allées n'ont pas pu être mesurées simultanément en raison du nombre limité d'appareils disponibles. La puissance réactive de l'alimentation générale a également été mesurée.

Tous les résultats sont exprimés en fonction de la surface de référence énergétique (SRE) du bâtiment (4605 m²) et sont en heure d'hiver. Il est important de considérer ce fait lors de l'appréciation des résultats. Par exemple, la consommation moyenne de 1.5 W/m² de la ventilation double-flux est juste dans le sens où ce poste fournit une prestation à l'ensemble du bâtiment. Par contre, pour les logements, une puissance moyenne de 1 W/m² pour l'allée 8 et de 1.2 W/m² pour l'allée 10 signifie que l'ensemble des logements du bâtiment consomme une puissance moyenne de $1 + 1.2 = 2.2$ W/m².

Il est important de souligner que deux postes de consommation situés dans le bâtiment Giacometti fournissent également des prestations à l'ensemble du complexe. Il s'agit du poste "Parking", qui comprend l'éclairage général des parkings et du poste "Chaufferie+CAD", qui alimente aussi les deux chaudières centrales ainsi que les pompes de circulation du CAD.

Finalement, il faut relever la particularité suivante : les compteurs des services généraux alimentent également les trois arcades situées au rez-de-chaussée du bâtiment. Les charges électriques leur sont facturées au moyen d'un forfait de consommation.

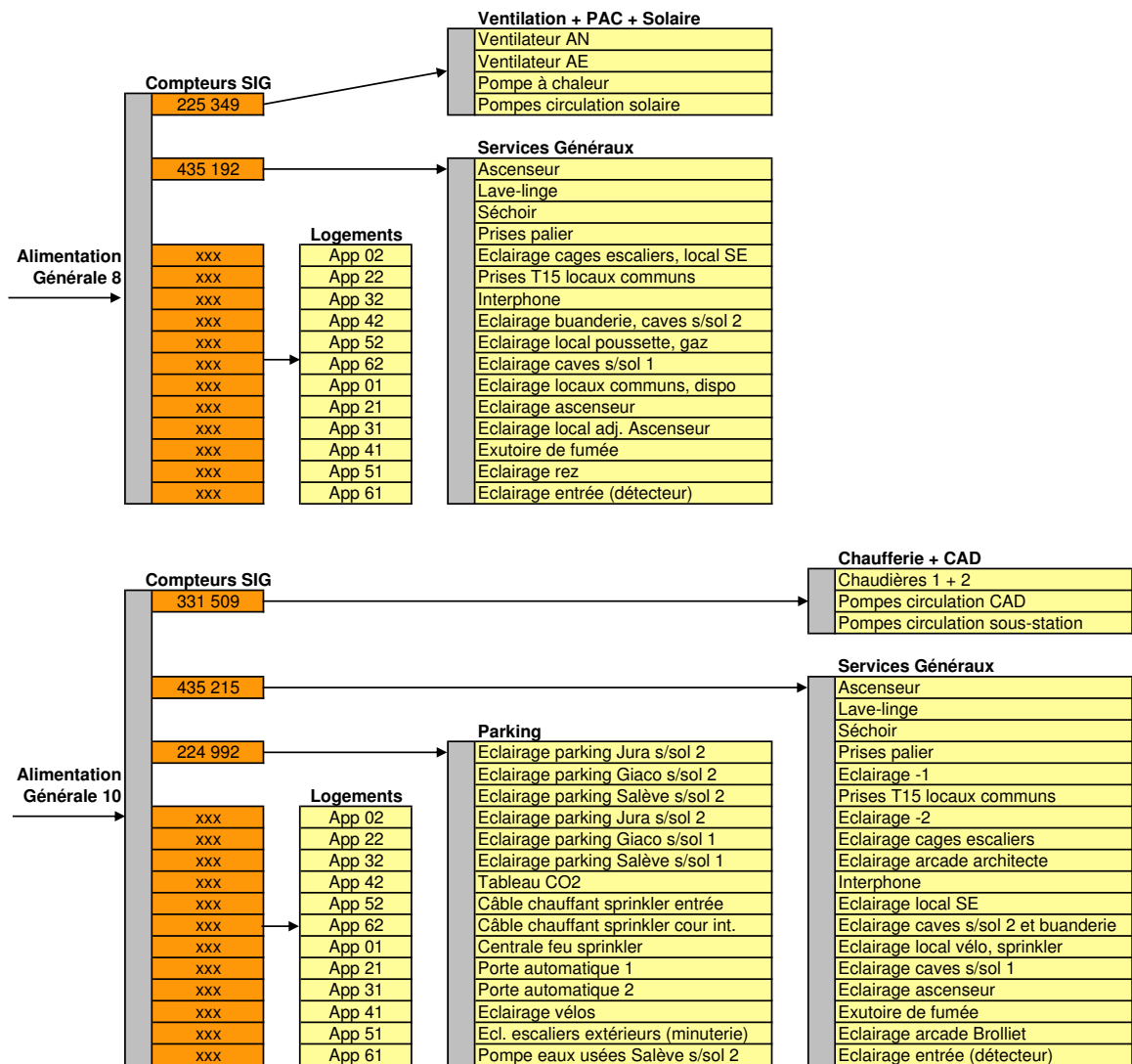


FIG. 2.2 – Répartition des postes de consommation électrique du bâtiment Giacometti : allée 8 (haut) et 10 (bas).

2.3.2 Profil de charge hebdomadaire

Un exemple de profil de charge hebdomadaire pour les deux allées du bâtiment Giacometti est présenté dans la Figure 2.3 (moyennes horaires).

L'éclairage des parkings et l'alimentation de la chaufferie et du CAD sont des consommations de ruban. Les services généraux présentent également un ruban avec cependant de fortes pointes d'appel ponctuelles. Une analyse fine des mesures par 5 minutes montre sans ambiguïté que ces pointes d'appels proviennent de l'utilisation des installations de lavage et de séchage du linge équipant les deux buanderies communes. Ces appareils peuvent atteindre des puissances d'appel de 5 à 6 kW pour des temps d'utilisation de l'ordre d'une heure pour le lave-linge et de 40 minutes à une heure et demi pour le sèche linge¹.

¹Lave-linge de marque Shulthess, modèle Spirit XL 6600. Données fabricant : classe A, Pmax = 6.1 kW, consommation moyenne = 1.2 kWh par cycle. Sèche-linge de marque Shulthess, modèle Spirit TC 6695. Données fabricant : classe C, Pmax = 5.3 kW, consommation moyenne = 4.3 kWh par cycle.

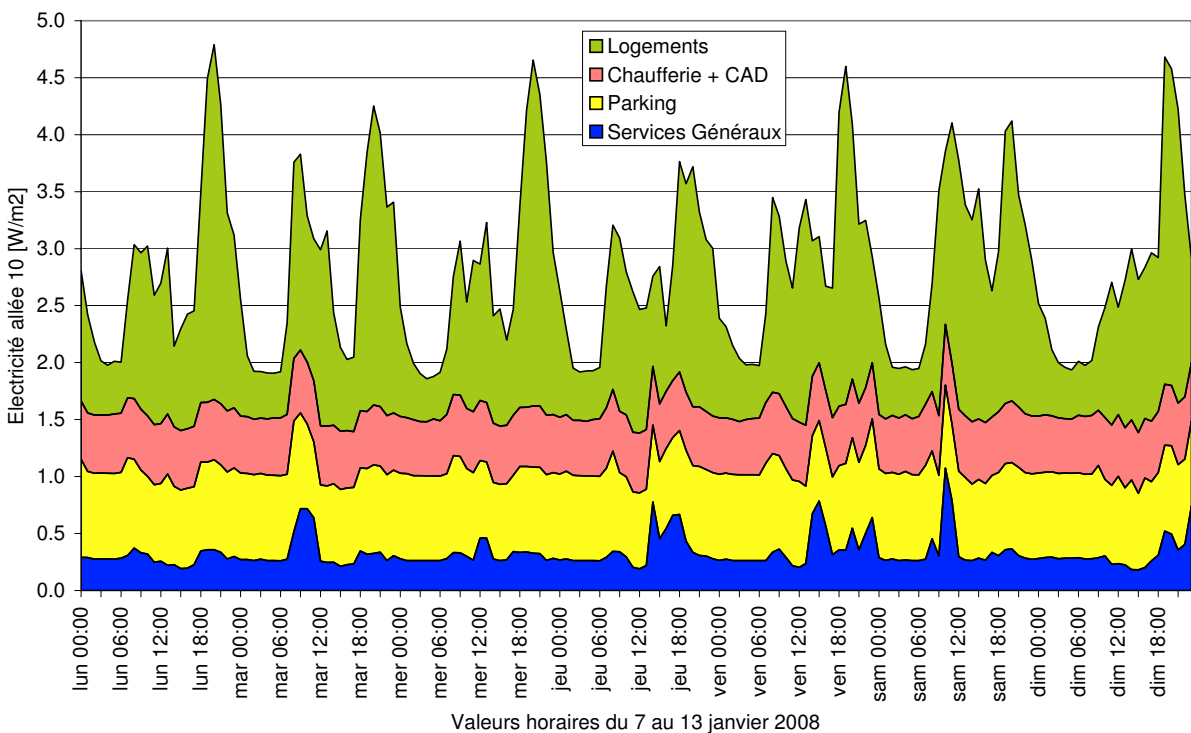
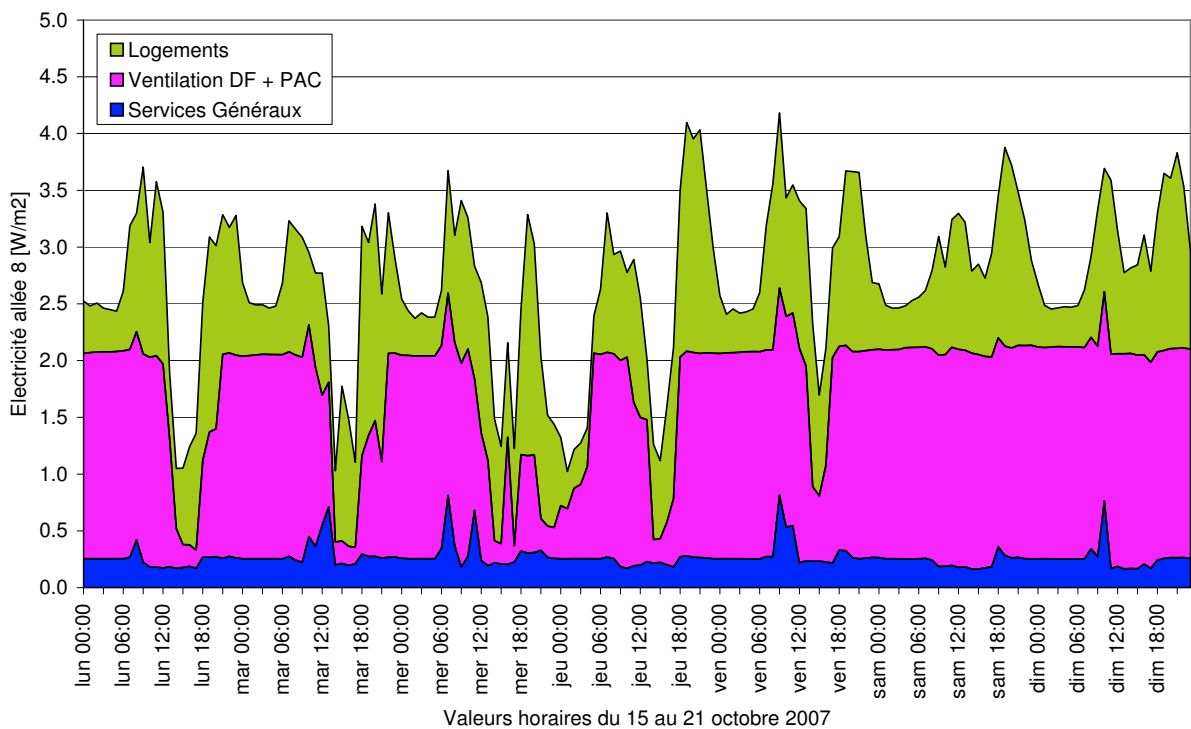


FIG. 2.3 – Exemple d'un profil de charge électrique hebdomadaire pour les deux allées du bâtiment Giacometti : 8 (haut) et 10 (bas). **Les valeurs sont des moyennes horaires exprimées en fonction de la SRE du bâtiment (4605 m²).** Le poste "Parking" comprend l'éclairage de tous les parkings du complexe. Le poste "Chaufferie+CAD" comprend les deux chaudières, les pompes de circulation du CAD et la sous-station Giacometti. Chaque allée comprend 12 logements.

Le monobloc de ventilation avec sa pompe à chaleur intégrée est un consommateur important. La configuration mesurée que l'on peut observer sur le graphique correspond à un fonctionnement des ventilateurs en grande vitesse et une utilisation de la pompe à chaleur pour le postchauffage de l'air pulsé.

Ce sont les logements qui présentent la plus forte variabilité de consommation. On voit cependant se dégager le profil journalier typique de consommation des logements constitué de deux pics de consommation, le premier à la mi-journée et le deuxième, plus important, pendant la soirée.

2.3.3 Puissances d'appel horaires classées

Les puissances horaires classées sont illustrées à la Figure 2.4 et les résultats numériques sont présentés dans le Tableau 2.1.

Bâtiment Giacometti	Allée 8		Allée 10		Total
	Pmin-Pmax	Pmoy	Pmin-Pmax	Pmoy	\sum Pmoy ^(a)
Électricité W/m ²					
Logements	0.3 - 3.3	1.0	0.3 - 4.1	1.2	2.2
Ventilation+PAC	0.1 - 2.3	1.5	–	–	1.5
Services Généraux	0.2 - 1.2	0.3	0.2 - 1.2	0.3	0.6
Chaufferie+CAD	–	–	0.2 - 0.6	0.5	0.5 (0.3) ^(b)
Parking	–	–	0.6 - 1.1	0.7	0.7 (0.2) ^(b)
Alimentation générale	0.8 - 5.4	2.8	1.7 - 6.1	2.8	5.6 (4.8) ^(b)
Puissance réactive VAR/W	-0.12 - 0.51	0.35	-0.08 - 0.10	0.01	0.36
Facteur de puissance (cos φ)	0.9 - 1.0	0.9	1.0 - 1.0	1.0	–

TAB. 2.1 – Puissances électriques spécifiques du bâtiment Giacometti. Mesures effectuées entre septembre et novembre 2007 pour l'allée 8, et entre décembre 2007 et janvier 2008 pour l'allée 10. **Les valeurs sont exprimées en fonction de la SRE du bâtiment (4605 m²).** (a) Les mesures des deux allées n'ont pas été réalisées simultanément, ce n'est donc pas une somme exacte. (b) Les valeurs entre parenthèses correspondent à la part imputable au seul bâtiment Giacometti.

2.3.3.1 Logements

La puissance maximale horaire appelée par les logements a été de 3.3 W/m² pour l'allée 8 (à 21h) et 4.1 W/m² pour l'allée 10 (à 19h). Pour les deux allées, elle n'est jamais descendue en dessous de 0.3 W/m², ce qui représente un ruban de consommation d'environ 115 W par appartement. Ce ruban se compose de consommations utiles, comme les réfrigérateurs par exemple, et d'appareils en veille (audiovisuel, informatique, micro-ondes, cafetières, etc). Si nos mesures ne nous permettent pas de quantifier la part de veille qui compose le ruban, on peut toutefois l'estimer en se basant sur d'autres études de consommation plus fournies. Il s'agit, notamment, des remarquables campagnes de mesures effectuées par Olivier Sidler ou sous sa direction².

²Enertech, Olivier Sidler, France, www.enertech.fr

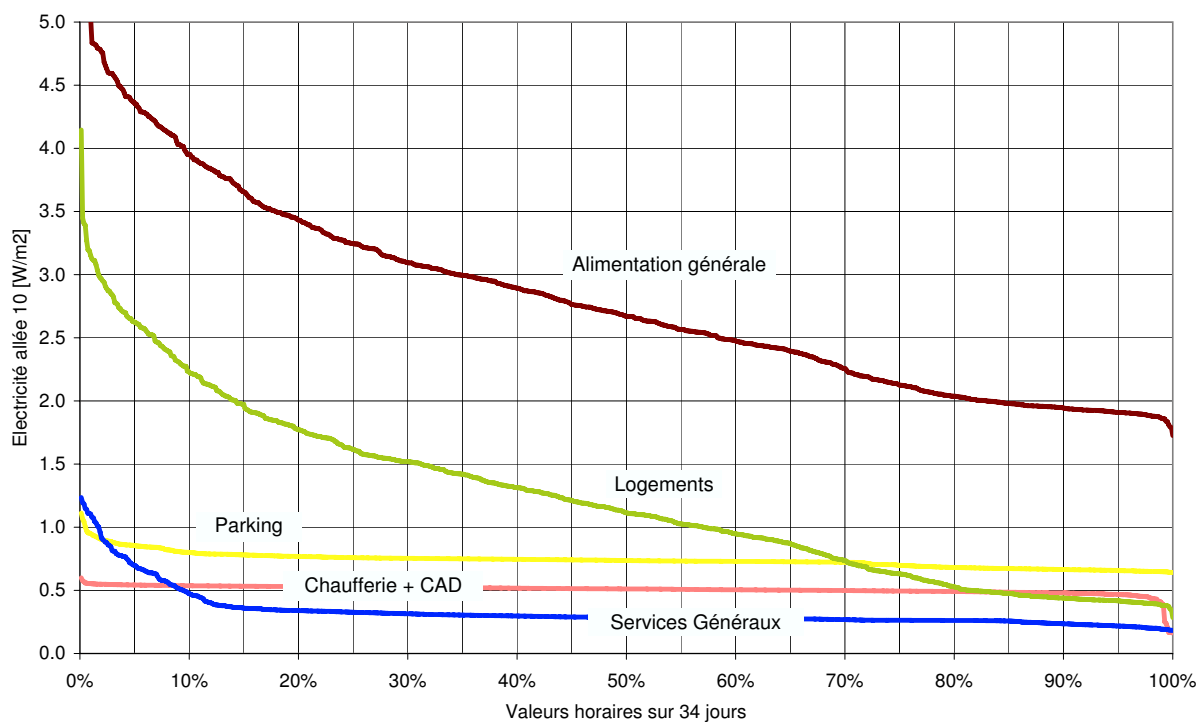
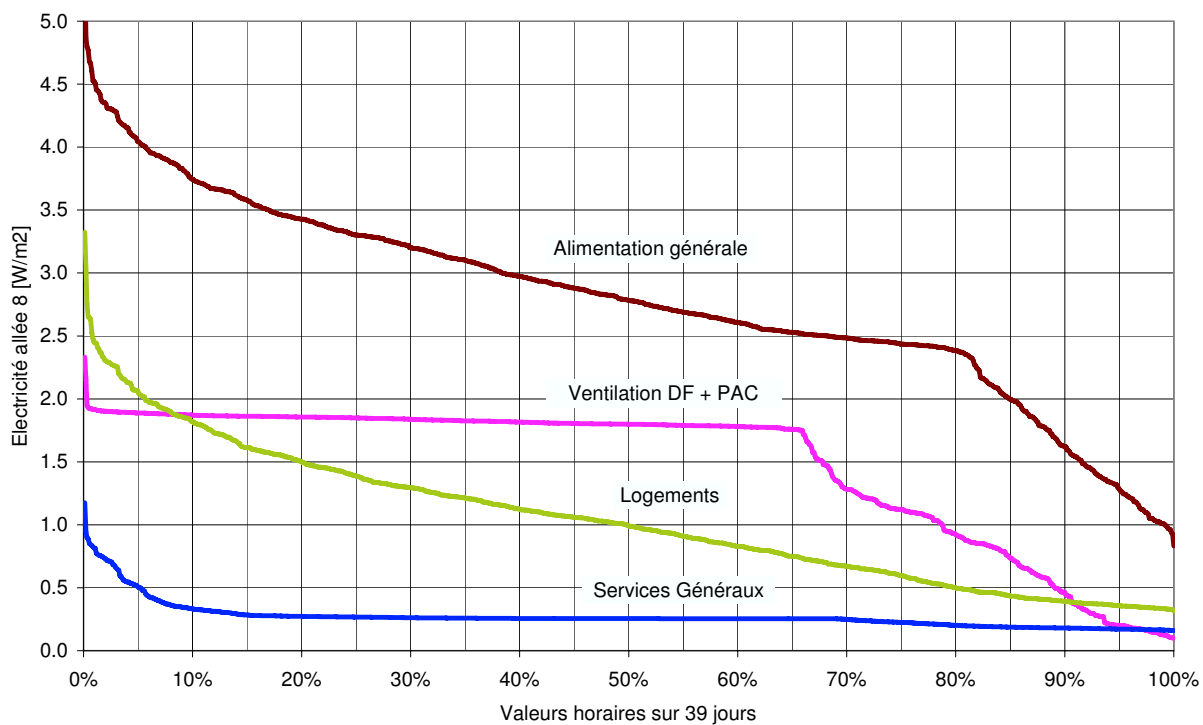


FIG. 2.4 – Puissances électriques horaires classées des deux allées du bâtiment Giacometti (puissances actives). Environ un mois de données pour chaque graphique extrait des mesures effectuées entre septembre 2007 et janvier 2008. **Les valeurs sont exprimées en fonction de la SRE du bâtiment (4605 m²).**

Tous les réfrigérateurs-congérateurs installés au Pommier sont des modèles performants de classe A³. Une étude très détaillée portant sur la mesure de consommation d'appareils électroménagers à haute efficacité énergétique montre que la puissance moyenne du poste froid, pour la période qui nous intéresse, est de l'ordre de 35 W [31, pages 54 et 198]. Il est raisonnable de penser que les 80 W restants proviennent en grande majorité d'appareils en veille et de quelques consommations que l'on peut qualifier d'utiles comme par exemple les veilleuses ou les chargeurs de téléphones mobiles. Cette valeur est tout à fait comparable aux résultats d'une étude portant sur 400 logements européens dont la veille moyenne mesurée est de l'ordre de 50 W à 60 W par logement, avec des variations allant de quelques watts à 140 W [32, page 237].

Cette même étude [32], basée également sur une autre campagne de mesures dédiée aux consommations de veille [33], dégage deux conclusions importantes concernant cette problématique. Premièrement, elle montre qu'il n'y a aucune corrélation entre la consommation de veille et les indicateurs ordinaires tels que le nombre d'habitants, la surface du logement ou la consommation totale d'électricité. En revanche, au niveau d'un ensemble de logements, les valeurs moyennes obtenues permettent de connaître avec une bonne précision la consommation de veille totale. Deuxièmement, les mesures ont révélé que le facteur de puissance ($\cos \varphi$) des appareils en veille est assez mauvais, avec une valeur moyenne de l'ordre de 0.5. Cette valeur signifie que pour une consommation en veille de 80 W par logement, c'est une puissance apparente de 160 VA qui doit être produite et acheminée sur le réseau électrique avec toutes les conséquences que cela implique (voir la section 2.3.6 pour plus de détails sur la puissance réactive).

2.3.3.2 Monobloc de ventilation + PAC

Ce poste, composé des deux ventilateurs du double-flux, de la pompe à chaleur et du système solaire, est un consommateur important en terme de puissance d'appel. Pendant 65% de la période mesurée, qui s'étend du 24 septembre au 2 novembre 2007, la puissance spécifique appelée était de 1.8 à 1.9 W/m². Ces valeurs correspondent à un fonctionnement du monobloc de ventilation à grande vitesse (0.9 W/m²) avec l'utilisation de la pompe à chaleur pour le postchauffage de l'air pulsé (1 W/m²)⁴. La consommation des pompes de circulation solaire est négligeable.

La consommation spécifique des ventilateurs dépend de l'obstruction des filtres car ils sont régulés en débit constant. Elle varie entre 0.4 W/m² pour un filtre neuf à 0.7 W/m² pour un filtre très obstrué (400 Pa à 6000 m³/h).

2.3.3.3 Services généraux

La consommation des Services Généraux a été relativement constante avec une moyenne de 0.3 W/m² par allée pendant 80 à 90% du temps. Des pointes d'appel pouvant aller jusqu'à 1.2 W/m² ont été observées de manières ponctuelles pendant les 10-20% du temps restant.

2.3.3.4 Chaufferie + CAD

La consommation du poste "Chaufferie + CAD" est relativement constante avec une moyenne de 0.5 W/m². Ce compteur alimente les deux chaudières à gaz, les pompes de circulation du CAD

³Réfrigérateur-congérateur de marque Forster, modèle Duoplus. Données fabricant : classe A, 302 litres dont 71 litres de congélation, consommation annuelle = 325 kWh, P_{max} = 115 W.

⁴Voir la section 3.3, page 69, pour une analyse détaillée de la consommation des ventilateurs et de la pompe à chaleur. Pertes de charges moyennes des filtres au moment des mesures : air neuf = 220 Pa et air repris = 43 Pa.

ainsi que les pompes de circulation de la sous-station Giacometti. Une correction est donc nécessaire pour extraire la consommation de la sous-station et mutualiser le solde.

Une comparaison des consommations annuelles des autres sous-stations permet d'estimer la part de celle-ci à 30% de la consommation de ce poste, ce qui donne 0.15 W/m^2 pour la sous-station et 0.35 W/m^2 pour les chaudières et le CAD. En répartissant cette dernière valeur sur la SRE totale du complexe (20915 m^2), on obtient alors une consommation moyenne de 0.1 W/m^2 . La part imputable au bâtiment Giacometti est alors de $0.15 + 0.1 = 0.25 \approx 0.3 \text{ W/m}^2$.

Il faut noter qu'en période estivale, sous réserve du bon fonctionnement des sous-stations, les chaudières, les pompes du CAD et les pompes des circuits de chauffage sont arrêtées. La consommation spécifique de ce poste tombe alors en dessous des 0.15 W/m^2 .

2.3.3.5 Parking

La consommation du poste "Parking" est relativement constante avec une moyenne de 0.7 W/m^2 , exprimée en fonction de la SRE du bâtiment Giacometti. Cependant, ce compteur alimente la totalité de l'éclairage des parkings du complexe ainsi que des services communs aux trois bâtiments. En répartissant cette valeur sur la SRE totale du complexe (20915 m^2), on obtient alors une consommation moyenne de 0.2 W/m^2 .

2.3.3.6 Alimentation générale

La totalité du bâtiment consomme un ruban d'environ 2.5 W/m^2 , sur lequel s'ajoutent des pointes de consommation allant de 0 à 9 W/m^2 . La consommation moyenne est de 5.6 W/m^2 . Les postes "Parking" et "Chaufferie + CAD" fournissent des prestations pour l'ensemble du complexe, il faut donc corriger cette valeur si l'on désire exprimer la consommation propre du bâtiment Giacometti. Les deux postes sont des consommations de ruban et les calculs effectués ci-dessus permettent de donner les corrections suivantes en puissance moyenne : $0.2 - 0.8 = -0.6 \text{ W/m}^2$ pour le parking et $0.3 - 0.5 = -0.2 \text{ W/m}^2$ pour le CAD. La mutualisation des services partagés représente environ 0.8 W/m^2 , ce qui donne une consommation moyenne imputable au seul bâtiment Giacometti de 4.8 W/m^2 .

La puissance électrique installée est de 69 kW par allée, soit 15 W/m^2 . La puissance maximum appelée pendant la période de mesure (par 5 minutes) a été de 31 kW pour l'allée 8 et de 40 kW pour l'allée 10, soit respectivement 6.7 W/m^2 et 8.7 W/m^2 . Une étude approfondie de la consommation électrique de plusieurs logements montre que les pointes d'appel sont beaucoup plus élevées en hiver qu'en été [31, page 29]. Nos mesures, effectuées entre septembre et janvier, peuvent donc être considérées comme une limite supérieure des puissances appelées par le bâtiment durant toute l'année. On peut alors en conclure que l'alimentation générale est surdimensionnée d'un facteur 1.7 à 2.2.

Un coefficient de foisonnement global peut également être calculé en faisant le rapport entre la valeur maximale (minimale) mesurée de l'alimentation générale et la somme des valeurs maximales (minimales) mesurées des postes de consommation correspondant. Il en résulte un coefficient de foisonnement pour les valeurs maximales de 0.8 à 0.9. Cela signifie que la pointe de consommation globale est plus basse de 10 à 20% que la somme des pointes de consommation individuelle. Le coefficient pour les valeurs minimales est de l'ordre de 1.4 à 1.5.

2.3.4 Profil de consommation horaire moyen des logements

Le graphique de la Figure 2.5 montre le profil de consommation horaire moyen des logements pour les deux allées du bâtiment Giacometti.

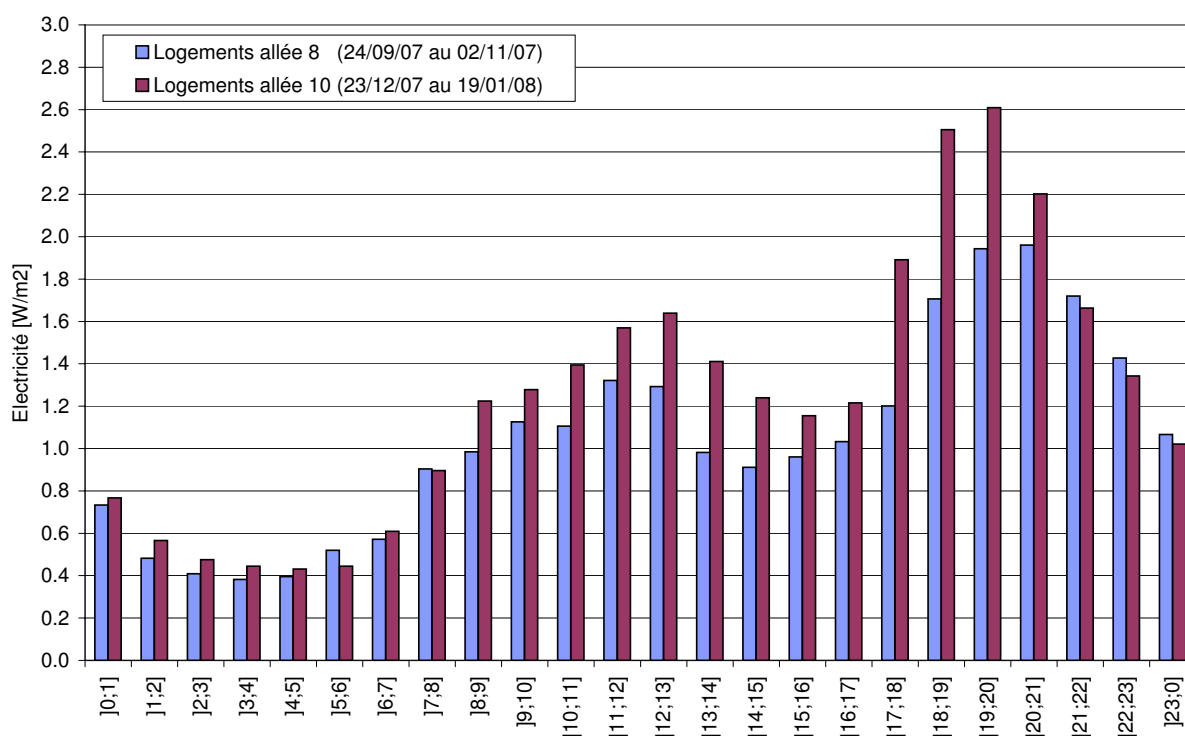


FIG. 2.5 – Profil de consommation horaire moyen des logements du bâtiment Giacometti effectué sur la base de 39 jours de mesure entre septembre et novembre 2007 pour l’allée 8, et de 34 jours entre décembre 2007 et janvier 2008 pour l’allée 10. **Toutes les valeurs sont exprimées en fonction de la SRE du bâtiment (4605 m²)** et le passage à l’heure d’hiver a été pris en compte (28 octobre 2007).

Ces valeurs, qui ne sont pas représentatives du profil de consommation annuel, permettent cependant d’avoir une bonne appréciation de la courbe de gains internes électriques en période de chauffage. On peut y observer un premier pic d’environ 3 W/m² entre 11h et 13h et un deuxième pic beaucoup plus prononcé le soir dépassant 4 W/m² entre 19h et 21h. La consommation journalière moyenne observée est de 1.0 W/m² pour l’allée 8 et de 1.2 W/m² pour l’allée 10, soit un total de 2.2 W/m² pour l’ensemble des logements.

Les 24 logements du bâtiment Giacometti sont répartis de manière symétrique entre les deux allées, mais la puissance appelée par les logements de l’allée 10 est environ 20% plus élevée que celle des logements de l’allée 8. On peut formuler plusieurs hypothèses pour tenter d’expliquer cette différence. Premièrement, les taux d’équipement et le comportement des locataires ne sont très certainement pas identiques. Il est d’ailleurs intéressant de noter que 8 des 12 plus gros consommateurs se trouvent dans l’allée numéro 10. Deuxièmement, l’ensoleillement global horizontal moyen pendant les mesures de l’allée 8 a été de 8.9 MJ/m² par jour alors que pendant les mesures de l’allée 10 il n’était que de 3.6 MJ/m² par jour, favorisant ainsi un usage plus intensif en éclairage artificiel pendant cette période. Finalement, le fait que les mesures effectuées sur l’allée 10 l’aient été en période de fête (23/12 au 19/01) peut également être un facteur expliquant une plus grande consommation pendant cette période.

2.3.5 Structure de la courbe de charge horaire moyenne du bâtiment

Les mesures des deux allées n'ont pas été réalisées en même temps, mais dans des intervalles de temps suffisamment rapprochés pour que leur agrégation ait du sens. Le graphique de la Figure 2.6 montre une estimation de la structure de la courbe de charge horaire moyenne du bâtiment.

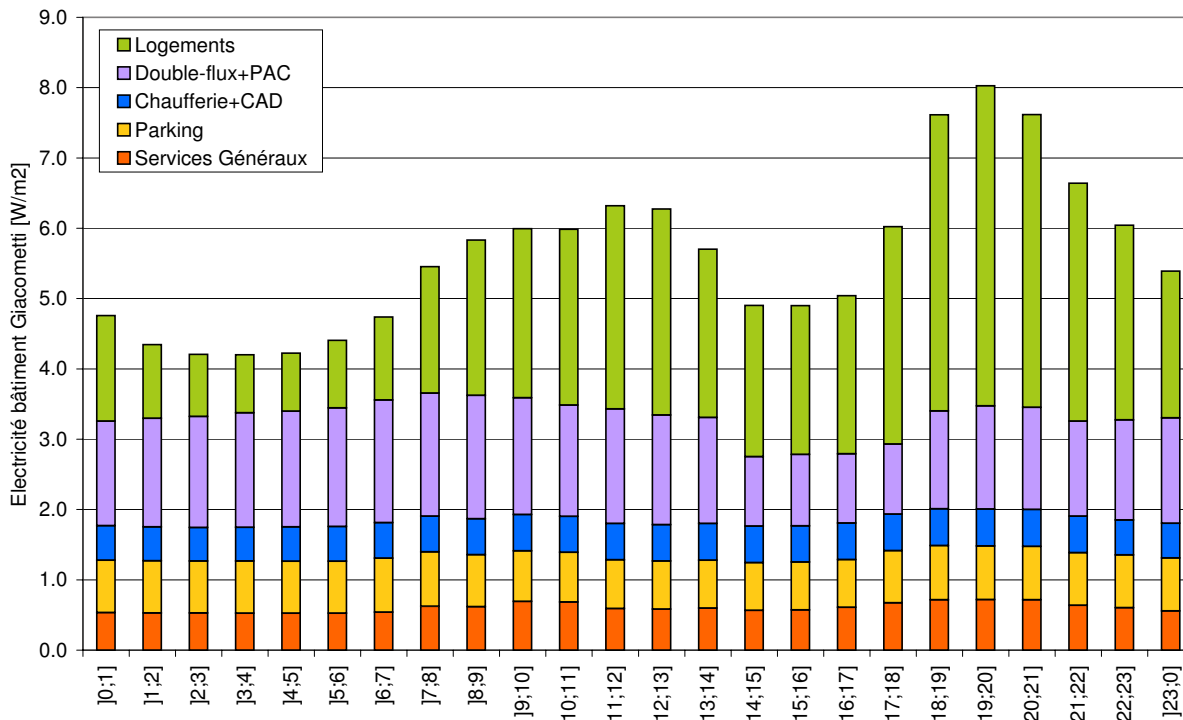


FIG. 2.6 – Bas : Estimation de la structure de la courbe de charge horaire moyenne du bâtiment pour la période septembre 2007 - janvier 2008 obtenue par agrégation des résultats des deux campagnes de mesure. **Toutes les valeurs sont exprimées en fonction de la SRE du bâtiment (4605 m²)** et le passage à l'heure d'hiver a été pris en compte (28 octobre 2007).

La contribution du monobloc de ventilation et de sa pompe à chaleur intégrée en période de chauffage est du même ordre de grandeur que la somme des services généraux, du parking et de la chaufferie. L'allure générale de la courbe de charge reprend le profil de consommation des logements avec un premier pic de 6.3 W/m² entre 11 et 12h et un deuxième pic plus prononcé de 8.1 W/m² entre 19 et 20h. La contribution des logements à la consommation globale varie entre 25% entre 3h et 4h du matin et 57% entre 19h et 20h.

2.3.6 Puissance réactive

2.3.6.1 Rappel théorique

En courant continu, le courant qui circule dans les conducteurs pour alimenter un récepteur est en phase avec la tension. La puissance électrique consommée sur le réseau est égale à la puissance active (mécanique, calorifique, etc) produite par le récepteur. En courant alternatif, la situation est identique si le récepteur est purement résistif, comme par exemple dans le cas d'un four électrique ou d'une lampe à incandescence. Mais lorsque le récepteur comporte des circuits magnétiques (moteur, transformateur, etc) il devient inductif et provoque un déphasage entre le courant et la

tension. Dans une base orthogonale, on peut décomposer ce courant apparent en un courant "actif", en phase avec la tension, et un courant "réactif", perpendiculaire à la tension (courant de magnétisation). Si les deux courants circulent effectivement sur le réseau et provoquent des pertes par effet Joule, seul le premier permet de générer un travail. En multipliant ces courants par la tension, on obtient respectivement la puissance active mesurée en Watt [W], et la puissance réactive mesurée en Volt Ampère Réactif [VAR]. Leur somme vectorielle est appelée puissance apparente et est mesurée en Volt Ampère [VA].

La puissance réactive n'est pas souhaitée par les distributeurs d'électricité car elle diminue la capacité de transfert d'énergie active sur le réseau et provoque des chutes de tension. L'indicateur utilisé pour quantifier le taux de puissance réactive est le facteur de puissance ($\cos \varphi$), qui représente le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Plus il se rapproche de l'unité, plus le récepteur tend vers un comportement résistif, c'est-à-dire faible consommateur d'énergie réactive. A noter finalement que l'on peut améliorer le facteur de puissance - réduire le déphasage - en utilisant des condensateurs que l'on installera au plus près du récepteur inductif. En effet, ces éléments provoquent également un déphasage entre le courant et la tension mais de signe opposé. On dit alors qu'ils "produisent" de l'énergie réactive en compensation des récepteurs inductifs qui eux en "consomment".

2.3.6.2 Analyse des mesures

Une mesure de la puissance réactive a également été effectuée sur l'alimentation générale des deux allées. Les puissances classées sont représentées dans le graphique de gauche de la Figure 2.7 et les résultats numériques dans le Tableau 2.1.

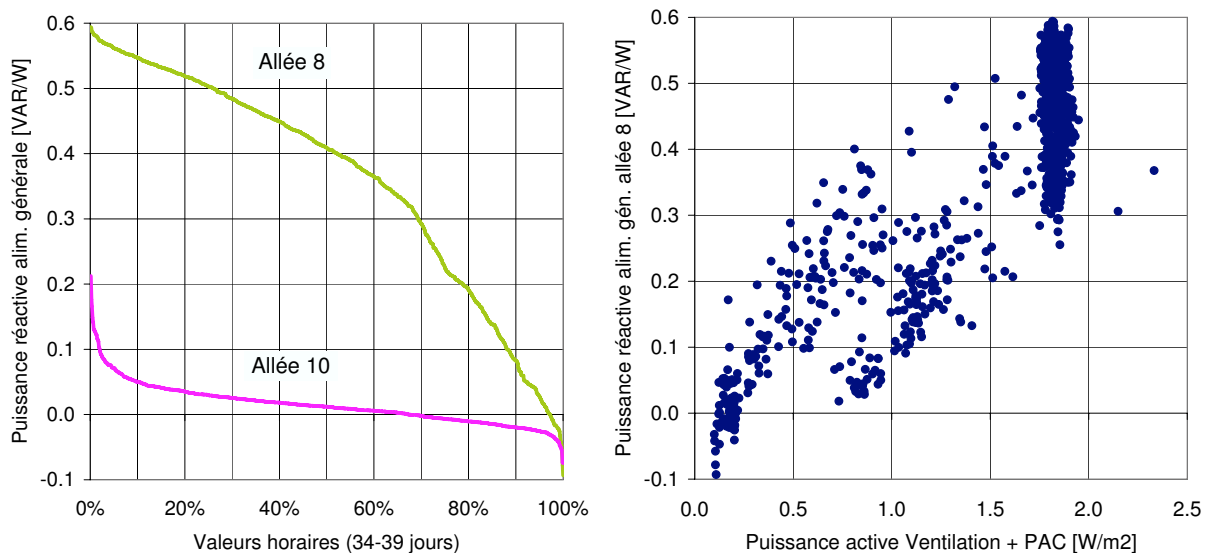


FIG. 2.7 – Gauche : Puissances réactives horaires classées de l'alimentation générale des deux allées du bâtiment Giacometti en VAR par W. Droite : Puissances réactives de l'alimentation générale (allée 8) en fonction de la puissance active spécifique du poste "Ventilation + PAC" exprimée en fonction de la SRE du bâtiment.

La comparaison des résultats entre les deux allées fait apparaître des profils très différents. La puissance réactive moyenne absorbée par l'allée 10 est de 0.01 VAR/W, ce qui n'affecte pas le facteur

de puissance qui reste égal à 1. L'autre allée, en revanche, consomme 0.35 VAR/W, ce qui a pour effet de faire baisser son facteur de puissance moyen à 0.9. Cette différence provient du monobloc de ventilation - alimenté par l'allée 8 - qui comprend deux gros ventilateurs et une pompe à chaleur. Cette corrélation est bien mise en évidence dans le graphique de droite de la Figure 2.7 qui représente la puissance réactive de l'alimentation générale en fonction de la puissance active consommée par le monobloc et la pompe à chaleur.

Ce facteur de puissance de 0.9 est celui de l'ensemble des consommateurs de l'allée 8. En considérant le monobloc de ventilation comme seul consommateur de puissance réactive, le rapport des puissances serait de l'ordre de 0.7 VAR/W, ce qui correspondrait à un facteur de puissance ($\cos \varphi$) de 0.8. L'installation récente de nouveaux compteurs permettant la mesure - et la facturation - de l'énergie réactive du poste "Ventilation DF + PAC" confirme d'ailleurs cette hypothèse. Les relevés mensuels effectués entre septembre 2007 et février 2008, indiquent une consommation d'énergie réactive moyenne qui oscille entre 0.54 et 0.75 VAR/W.

Dans leur règlement pour la fourniture de l'énergie électrique, les Services industriels de Genève précisent que "*Lorsqu'une installation ou un appareil utilise la puissance avec un facteur de puissance inférieur aux normes exigées par les Services industriels, ces derniers ont le droit d'exiger sa compensation ou de percevoir une taxe supplémentaire, conformément au tarif arrêté par le Conseil d'administration.*"[34, article 51, alinéa 1]. Les consommateurs au bénéfice d'un tarif Profil Pro (> 30 MWh/an) ou ayant une intensité supérieure à 100 A sont concernés par ces mesures⁵. Dans le cas du Pommier, c'est la consommation annuelle élevée du monobloc et de la PAC (47 MWh/an) qui a justifié le remplacement des compteurs et la facturation de l'énergie réactive. Mais dans de nombreuses installations de taille plus modeste, le seuil des 30 MWh/an n'est jamais atteint. Le fort engouement actuel pour les installations de ventilation à double-flux et les pompes à chaleur, que ce soit dans les constructions neuves ou dans les rénovations, soulève le problème d'une augmentation globale de la puissance réactive circulant sur le réseau générée par une multitude de consommateurs non astreints à la correction du facteur de puissance. Un aspect de la gestion du réseau qui mériterait certainement d'être approfondi par le distributeur d'électricité.

2.3.7 Bilan annuel

Le bilan annuel du bâtiment Giacometti a été effectué sur la base de relevés de compteurs annualisés et de mesures de consommation électrique spécifiques. Les relevés des logements ont été effectués entre le 29/09/06 et le 23/10/07 et tous les autres compteurs entre le 02/06/06 et le 25/05/07. Les consommations électriques des ventilateurs et de la pompe à chaleur ont été mesurées du 1er janvier au 31 mai 2007 et reconstruites pour les mois précédents (voir la section 3.3, page 69).

2.3.7.1 Structure de la consommation annuelle

La Figure 2.8 présente la répartition annuelle des différents postes de consommation en MJ/m². Les consommations du Parking et du CAD, qui fournissent des prestations pour l'entier du complexe, sont réparties sur la SRE totale des trois bâtiments (20915 m²).

L'indice de consommation électrique du bâtiment est de 130 MJ/m².an. On peut regrouper les différents postes de consommation en trois catégories principales :

⁵Les tarifs actuels concernant les consommations supérieures à 0.48 VAR/W ($\cos \varphi < 0.9$) sont de 3.8 ct/kvarh pour la basse tension (BT) et de 3.13 ct/kvarh pour la moyenne tension (MT)[35].

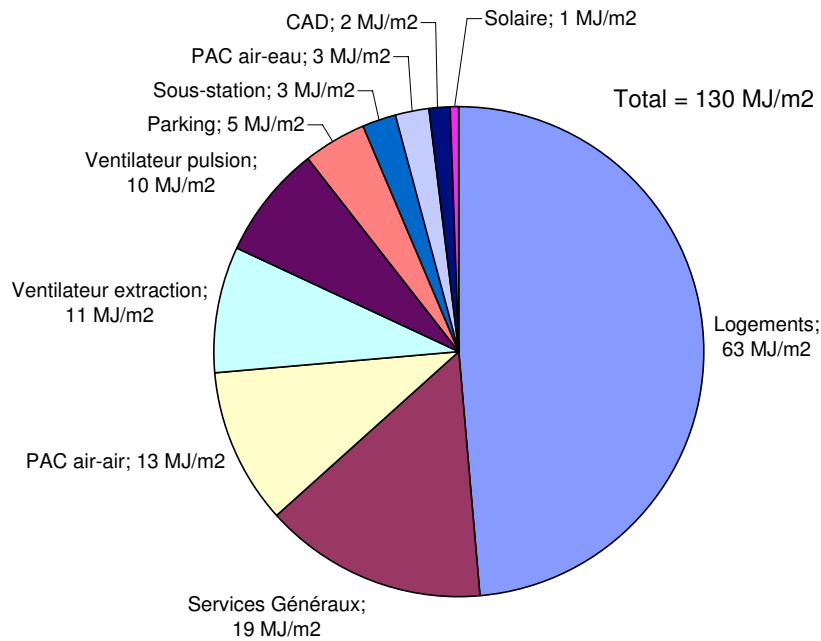


FIG. 2.8 – Bilan électrique annuel du bâtiment Giacometti effectué sur la base des relevés de compteurs annualisés et des mesures de consommation. Les consommations du Parking et du CAD sont exprimées en fonction de la SRE totale des trois bâtiments (20915 m²).

- **Les logements** (63 MJ/m².an, 47%) qui représentent les principaux consommateurs d'électricité du bâtiment.
- **Les services généraux** (35 MJ/m².an, 27%) qui incluent les services généraux, le parking et le ventilateur d'extraction.
- **La production-distribution de chaleur** (31 MJ/m².an, 24%) qui comprend la sous-station, le chauffage à distance (CAD), la pompe à chaleur (PAC), le ventilateur de pulsion et l'installation solaire.

Les logements consomment en moyenne autant d'électricité pour leurs usages propres que pour les services dont ils bénéficient (généraux + chaleur). Cela représente environ 3400 kWh/an par logement pour les usages propres (25 kWh/an par m² de surface habitable) et 3500 kWh/an pour les services.

2.3.7.2 Impact sur la consommation des installations d'efficacité énergétique

En soustrayant des 130 MJ/m².an les consommations de la pompe à chaleur, du ventilateur de pulsion et de l'installation solaire, on obtient un indice de 103 MJ/m².an qui correspond à ce qu'aurait consommé le bâtiment s'il était chauffé uniquement au gaz (distribution de la chaleur par le CAD et extraction mécanique de l'air vicié uniquement). La répartition serait alors la suivante : logements 61%, services généraux 34% et production-distribution de chaleur 5%. Par rapport à cet indice de 103 MJ/m².an, la pompe à chaleur augmente la consommation du bâtiment de 16%, le ventilateur de pulsion l'augmente de 10% et l'installation solaire seulement de 1%.

2.3.8 Consommation annuelle des logements

La Figure 2.9 montre les consommations annuelles classées des 24 logements du bâtiment en kWh et en MJ par pièce. Il y a 20 appartements de six pièces (barres pleines) et 4 de huit pièces (barres hachurées). Il n'y a pas eu d'appartements vacants entre les deux relevés effectués mais de nombreux changements de locataires (voir Figure).

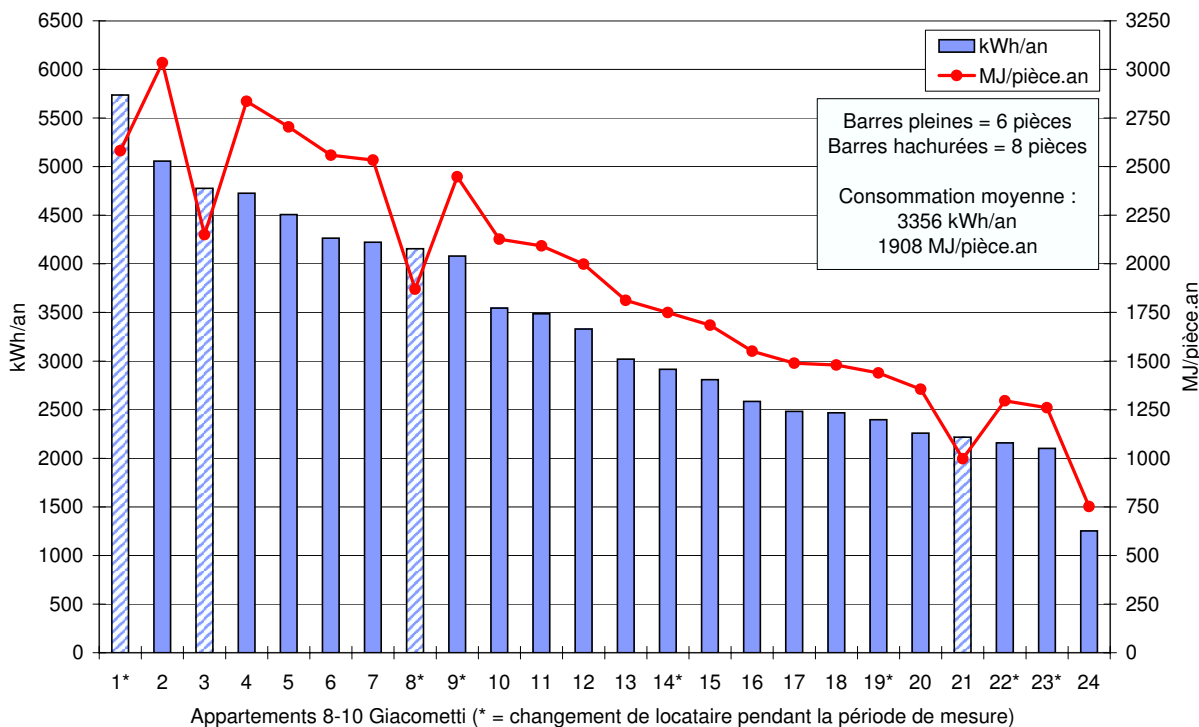


FIG. 2.9 – Consommation annuelle d'électricité classée des logements en kWh et en MJ par pièce. Il y a 20 appartements de six pièces (barres pleines) et 4 appartements de huit pièces (barres hachurées). A Genève, la cuisine est comptée comme une pièce. Les relevés ont été effectués entre le 29/09/06 et le 23/10/07. Les * signalent les appartements qui ont connu un changement de locataires pendant la période de mesures.

La consommation moyenne est de 3356 kWh/an par logement avec une grande disparité de résultats allant de 1253 kWh/an à 5737 kWh/an, soit un rapport de 1 à 5. Ces variations n'ont rien d'exceptionnel : une campagne de mesures portant sur 400 logements européens (Danemark, Grèce, Italie et Portugal) a mis en évidence des plages de variation entre les consommations de différents logements d'un même pays pouvant atteindre 1 à 24 [32, page 23]. La consommation annuelle en MJ par pièce varie de 750 à 3000 avec une valeur moyenne de 1908 MJ/pièce.an.

L'analyse des puissances appelées montre que les logements consomment un ruban moyen équivalent à 115 W par appartement, dont on peut raisonnablement estimer que 35 W sont dus à la production de froid et 80 W proviennent en grande majorité des appareils en veille (voir 2.3.3.1, page 35). En extrapolant cette dernière valeur sur une année, on obtient 700 kWh, soit environ 21% de la consommation annuelle moyenne des logements.

2.4 Signature énergétique

2.4.1 Gaz (complexe)

La Figure 2.10 présente l'évolution de la consommation journalière de gaz du complexe en fonction de la température extérieure, depuis le premier hiver en janvier 2005 jusqu'à la fin des mesures en mai 2008.

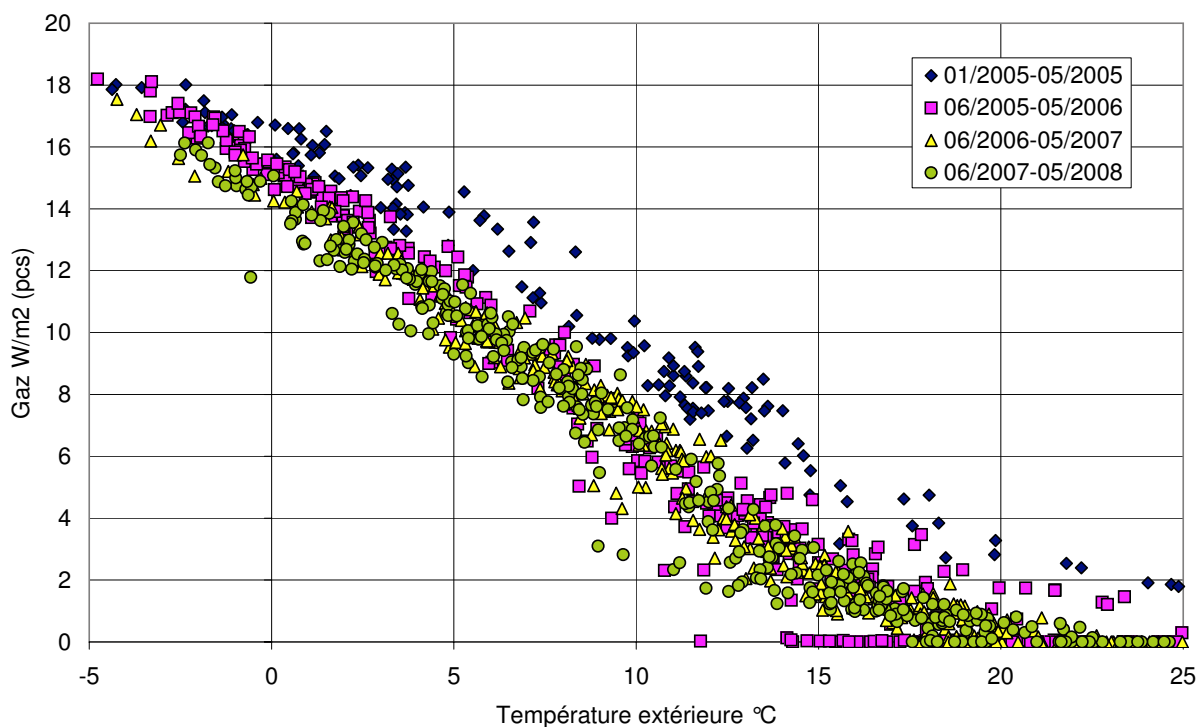


FIG. 2.10 – Evolution de la signature énergétique du complexe (gaz) de janvier 2005 à mai 2008. Valeurs journalières.

On note une grande différence de comportement entre la première saison de chauffage (2004-2005) et les suivantes. La sensibilité de la consommation de gaz lors de la deuxième saison de chauffage (2005-2006) est de $-0.88 \text{ W/m}^2\text{K}$ et la puissance appelée à 0°C est de 15.3 W/m^2 . Ces caractéristiques vont ensuite se stabiliser lors de deux saisons suivantes pour atteindre lors de la quatrième saison (2007-2008) une sensibilité de $-0.84 \text{ W/m}^2\text{K}$ et une puissance appelée de 14.6 W/m^2 à 0°C .

Dans les nouvelles constructions, les structures contiennent une quantité élevée d'humidité qui s'évaporera au fil du temps. Ce processus d'évaporation nécessite une grande quantité d'énergie thermique qui est fournie, entre autres, par le système de chauffage. Ce phénomène, ainsi que les optimisations apportées aux systèmes techniques, permettent d'expliquer cette évolution de la signature énergétique. Il faut prendre en compte le fait que les trois bâtiments du complexe n'ont pas été mis en service en même temps. Ceci explique la stabilisation de la signature à la troisième saison de chauffage, alors qu'une analyse de l'évolution de la signature de chauffage du bâtiment Giacometti montre que celle-ci se stabilise dès la seconde saison de chauffage.

La puissance nécessaire à -5°C est de 19 W/m^2 et la puissance installée est de 24 W/m^2 . Les chaudières sont donc surdimensionnées de 26%.

2.4.2 Électricité

Près de la moitié de la demande de chauffage des logements est couverte par la ventilation à double-flux et la pompe à chaleur. Il est donc pertinent de s'intéresser également à l'évolution de la consommation électrique de ces systèmes en fonction de la rigueur du climat. Les valeurs journalières de ces systèmes sont présentées à la Figure 2.11 pour la période allant du 13 février au 31 mai 2007.

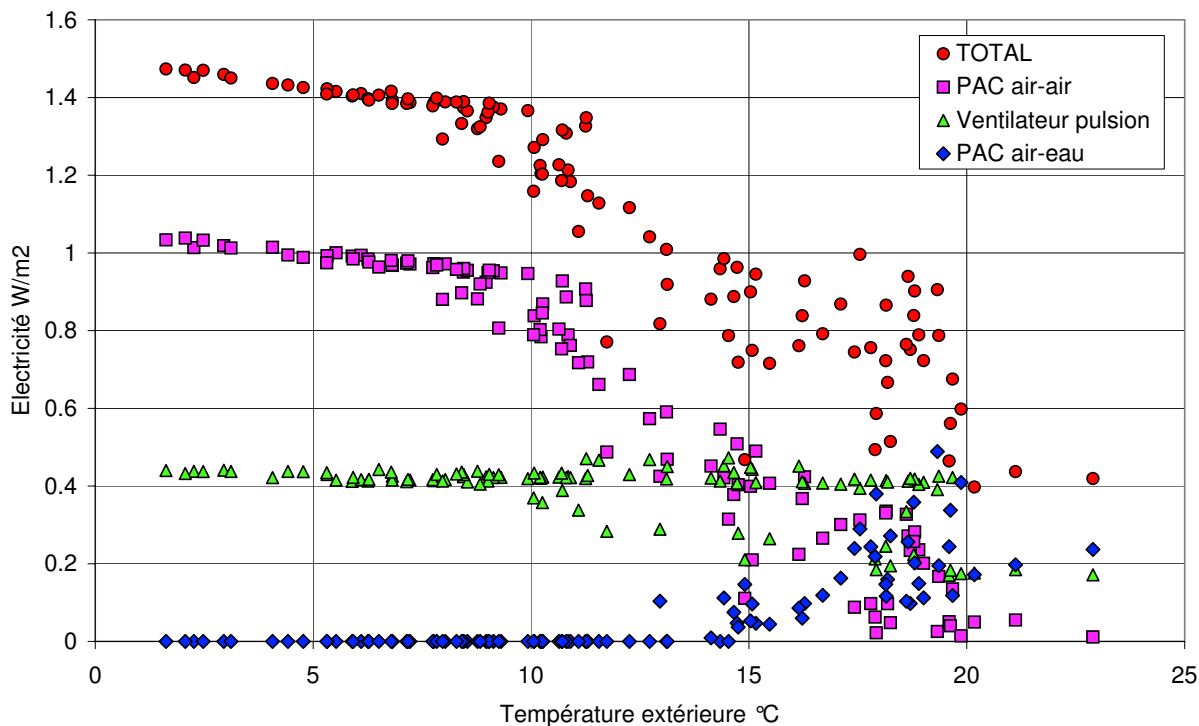


FIG. 2.11 – Signature électrique des sous-systèmes fournissant une prestation thermique au bâtiment Giacometti. Valeurs journalières mesurées du 13 février au 31 mai 2007.

L'analyse de ces consommations permet, entre autres, de mettre en évidence le mode de régulation effectif de la pompe à chaleur. En dessous de 15 °C, celle-ci fonctionne uniquement en mode air-air pour le post-chauffage de l'air pulsé. Entre 15 et 20 °C, elle travaille également en mode air-eau pour fournir l'appoint à l'ECS. Au delà de 20 °C, seul ce dernier mode est en fonction. Sa consommation spécifique est environ de 1 W/m² pour les températures inférieures à 10 °C. Elle baisse ensuite linéairement jusqu'à 15 °C pour osciller entre 0.2 et 0.6 W/m² pour les températures supérieures.

En ce qui concerne le ventilateur de pulsion, sa consommation spécifique est constante sur la période mesurée et vaut 0.4 W/m². La consommation résultante des deux systèmes augmente de manière non-linéaire avec la rigueur du climat. Elle vaut 0.9 W/m² à la température de non-chauffage (15 °C) et atteint 1.5 W/m² à 0 °C.

De manière à pouvoir effectuer une comparaison avec le gaz, on peut utiliser les facteurs de conversion en énergie primaire proposés dans le cahier technique SIA 2031 [36] : 1.15 pour le gaz naturel et 2.97 pour l'électricité. La consommation d'énergie primaire spécifique pour une température de 0 °C peut donc être estimée à 16.8 W/m² pour le gaz et à 4.5 W/m² pour l'électricité. L'énergie

électrique, loin d'être négligeable, représente 21% des ressources puisées dans l'environnement pour la production de chaleur à cette température.

2.5 Demande de chaleur

2.5.1 Chauffage

La demande de chaleur est couverte par trois systèmes différents : le système hydraulique traditionnel de radiateurs dont la chaleur provient des chaudières à gaz, la ventilation double-flux avec échangeur de chaleur qui fournit une prestation thermique en valorisant une partie des pertes aérauliques, et finalement la pompe à chaleur sur air vicié qui travaille en post-chauffage de l'air pulsé. La performance thermique et la température de départ de ces trois systèmes sont représentés à la Figure 2.12.

Le graphique du haut montre l'évolution de la puissance thermique délivrée par ces trois systèmes en fonction de la température extérieure (signature) en W/m^2 . Le système aéraulique (échangeur + PAC) fournit environ la moitié de la chaleur consommée par les logements, l'autre moitié étant couverte par l'installation hydraulique (radiateurs). On observe, sans surprise, cette même répartition dans le bilan annuel. Les différentes sensibilités thermiques obtenues par régression linéaire, sont données dans le Tableau 2.2 ci-dessous :

Système	Régression linéaire
Radiateurs	$P_{thermique} = (10.5 - 0.7 T_{ext}) \pm 1.0 \quad [W/m^2]$
Air pulsé échangeur	$P_{thermique} = (5.5 - 0.2 T_{ext}) \pm 0.9 \quad [W/m^2]$
Air pulsé PAC	$P_{thermique} = (4.0 - 0.2 T_{ext}) \pm 1.3 \quad [W/m^2]$
Total	$P_{thermique} = (20.0 - 1.2 T_{ext}) \pm 2.3 \quad [W/m^2]$

TAB. 2.2 – Sensibilité thermique des trois systèmes de chauffage obtenus par régression linéaire.

Il faut relever que seule la signature des radiateurs possède un comportement purement linéaire (coefficient de régression $R^2 = 0.98$). La puissance délivrée par l'échangeur et la PAC a tendance à s'infléchir vers le bas dans les basses températures. Cependant, nous ne rentrerons pas en matière pour une modélisation plus fine de ces deux systèmes et conservons les modèles linéaires qui suffisent amplement pour ce genre d'analyse.

À la température de $5\text{ }^\circ\text{C}$, qui représente la température extérieure moyenne d'une saison de chauffage à Genève, les systèmes techniques fournissent une puissance de chauffage spécifique de $14\text{ }W/m^2$. À titre de comparaison, les gains internes électriques, qui ont été évalués à $2.2\text{ }W/m^2$ en moyenne, représentent 16% de cette valeur.

Les températures de départ sont présentées dans le graphique du milieu. À la sortie de l'échangeur, la température de l'air pulsé est de $16\text{ }^\circ\text{C}$ pour une température extérieure de $5\text{ }^\circ\text{C}$, et elle est encore de $13\text{ }^\circ\text{C}$ lorsqu'à l'extérieur le thermomètre atteint les $-4\text{ }^\circ\text{C}$. La pompe à chaleur complète cet apport et permet au système de pulser un air à $21\text{ }^\circ\text{C}$ toute l'année. Finalement, le départ des radiateurs est de $37\text{ }^\circ\text{C}$ pour une température extérieure de $5\text{ }^\circ\text{C}$ et il grimpe jusqu'à $50\text{ }^\circ\text{C}$ lorsque le climat atteint $-4\text{ }^\circ\text{C}$.

Le graphique du bas représente le profil de production annuel en W/m^2 . On peut y observer que les radiateurs ont fourni de la chaleur en plein mois de juillet. Cette constatation a mis en évidence le fait que la régulation était laissée en mode automatique tout au long de l'année. Avec un seuil d'enclenchement de $15\text{ }^\circ\text{C}$, il suffisait d'une matinée un peu fraîche pour que tout le système se

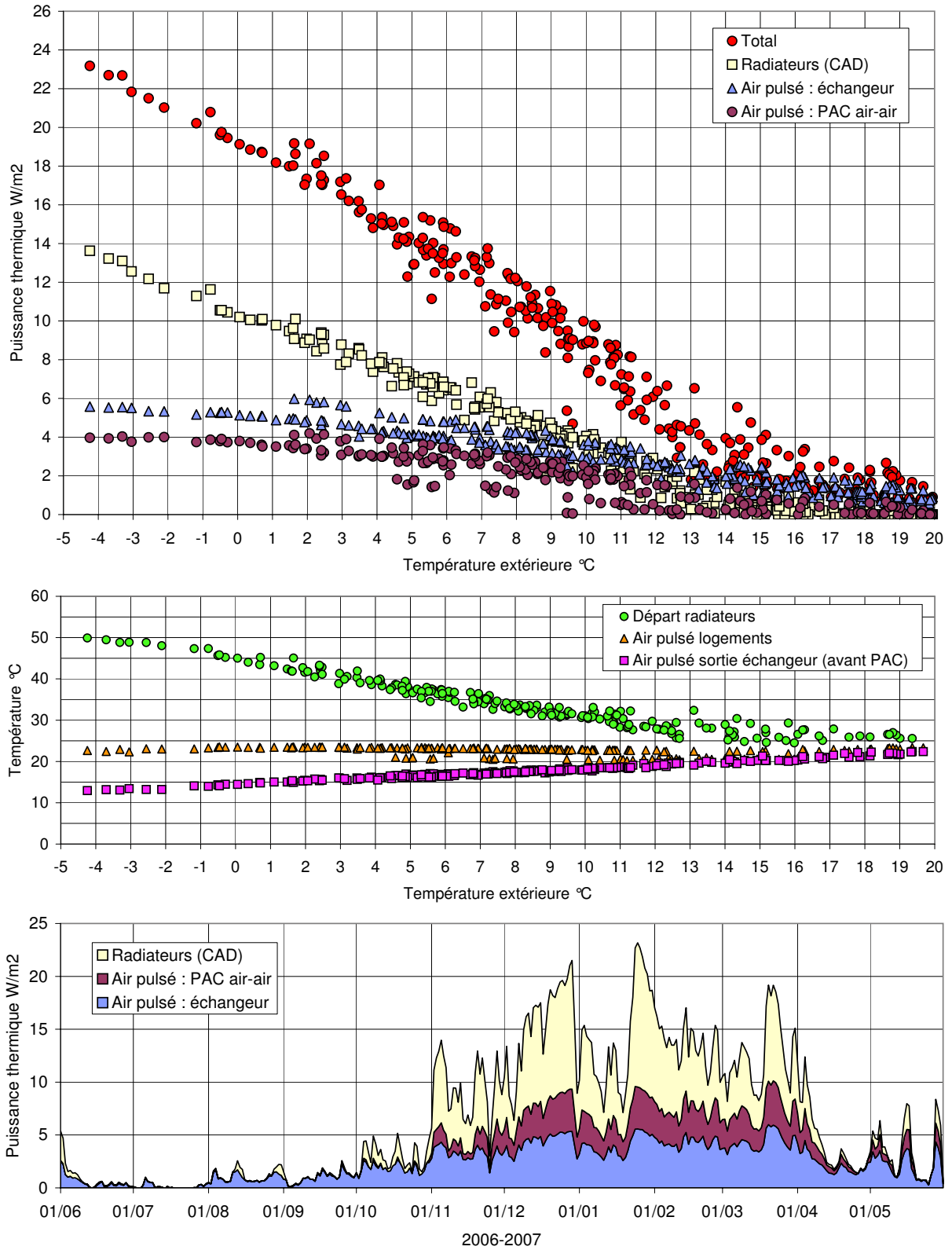


FIG. 2.12 – Caractéristiques journalières des trois systèmes de chauffage du bâtiment : échangeur de chaleur, pompe à chaleur et radiateurs. Haut : puissance thermique fournie par les trois systèmes en fonction de la température extérieure (signature). Milieu : température de départ. Bas : profil de production annuel.

mette en service automatiquement pour délivrer quelques kWh aux logements. Le problème a été corrigé par la suite.

2.5.2 Eau chaude sanitaire (ECS)

L'installation solaire thermique effectue le pré-chauffage de l'eau chaude sanitaire. En période estivale, lorsque les chaudières sont arrêtées, l'appoint est fourni exclusivement par la pompe à chaleur sur air vicié qui fonctionne en mode air-eau. En période de chauffage, lorsque la PAC est dédiée au post-chauffage de l'air pulsé, l'appoint pour l'ECS provient des chaudières à gaz (CAD). La cuve de stockage thermique, de laquelle partent les conduites de chauffage, abrite également le bouilleur d'ECS. Cette cuve est alimentée thermiquement par le CAD ainsi que par la pompe à chaleur. Il est donc très difficile d'attribuer de manière dynamique les entrants aux sortants. C'est la raison pour laquelle les bilans journaliers de production d'ECS ne sont scindés qu'en deux parties : la part solaire et la part combinée CAD + PAC. Les valeurs journalières des températures de travail, du taux de soutirage et du profil de production de l'ECS sont représentés dans la Figure 2.13.

Le graphique du haut représente l'évolution de la température de l'eau sanitaire depuis son arrivée du réseau public jusqu'au départ pour les logements. L'eau froide du réseau varie entre 7 °C en février et 16 °C en juillet avec une moyenne annuelle de 11.4 °C. L'installation solaire permet d'augmenter la température de l'eau de 14 °C en moyenne annuelle, avec des variations allant de 0 °C à 38 °C. Cette contribution est supérieure à 10 °C pendant 220 jours par an et supérieure à 20 °C pendant 110 jours par an. L'appoint fourni par le CAD et la pompe à chaleur permet finalement d'avoir une température à la sortie du bouilleur de 52 °C en moyenne avec des pointes à 59 °C. L'eau est ensuite mitigée avec de l'eau froide pour être distribuée aux logements à une température moyenne et relativement constante de 44 °C. Les déperditions dues à la circulation d'ECS ont toujours été d'environ 4 °C, comme on peut l'observer du mois de juin au mois d'août. Puis, dès septembre, un problème lié au fonctionnement de la pompe de circulation a contribué à faire baisser la moyenne journalière mesurée.

Le graphique du milieu montre le taux de soutirage exprimé en litre par pièce. Ce choix est fondé sur le fait que la consommation d'ECS n'est pas proportionnelle à la surface mais au nombre d'usagers, ainsi qu'à leurs habitudes. Le nombre de locataires n'étant jamais connu avec une bonne précision, on utilise alors le nombre de pièces comme référence. Le volume de puisage moyen est d'environ 50 litres par pièce et par jour. Les baisses ponctuelles que l'on peut observer sont admirablement corrélées avec les vacances scolaires. En effet, on retrouve sur ce graphique les quatre "pics" correspondant respectivement aux vacances d'été (juillet-août 2006), aux vacances d'octobre (23 au 27 octobre 2006), aux vacances de février (12 au 16 février 2007) et aux vacances de Pâques (5 au 13 avril 2007).

Le graphique du bas montre le profil de demande quotidien d'ECS en W/m². La puissance spécifique moyenne demandée est de 2.4 W/m², ou 72.5 W/pièce. L'installation solaire couvre en moyenne 37% de la demande journalière et sa production spécifique moyenne est de 0.8 W/m² (SRE), ou 23.8 W/pièce.

2.5.3 Demande horaire classée

La Figure 2.14 représente la demande de chaleur classée du bâtiment Giacometti, ainsi que ses différentes composantes. On rappelle ici que les courbes classées n'ont pas de propriétés additives.

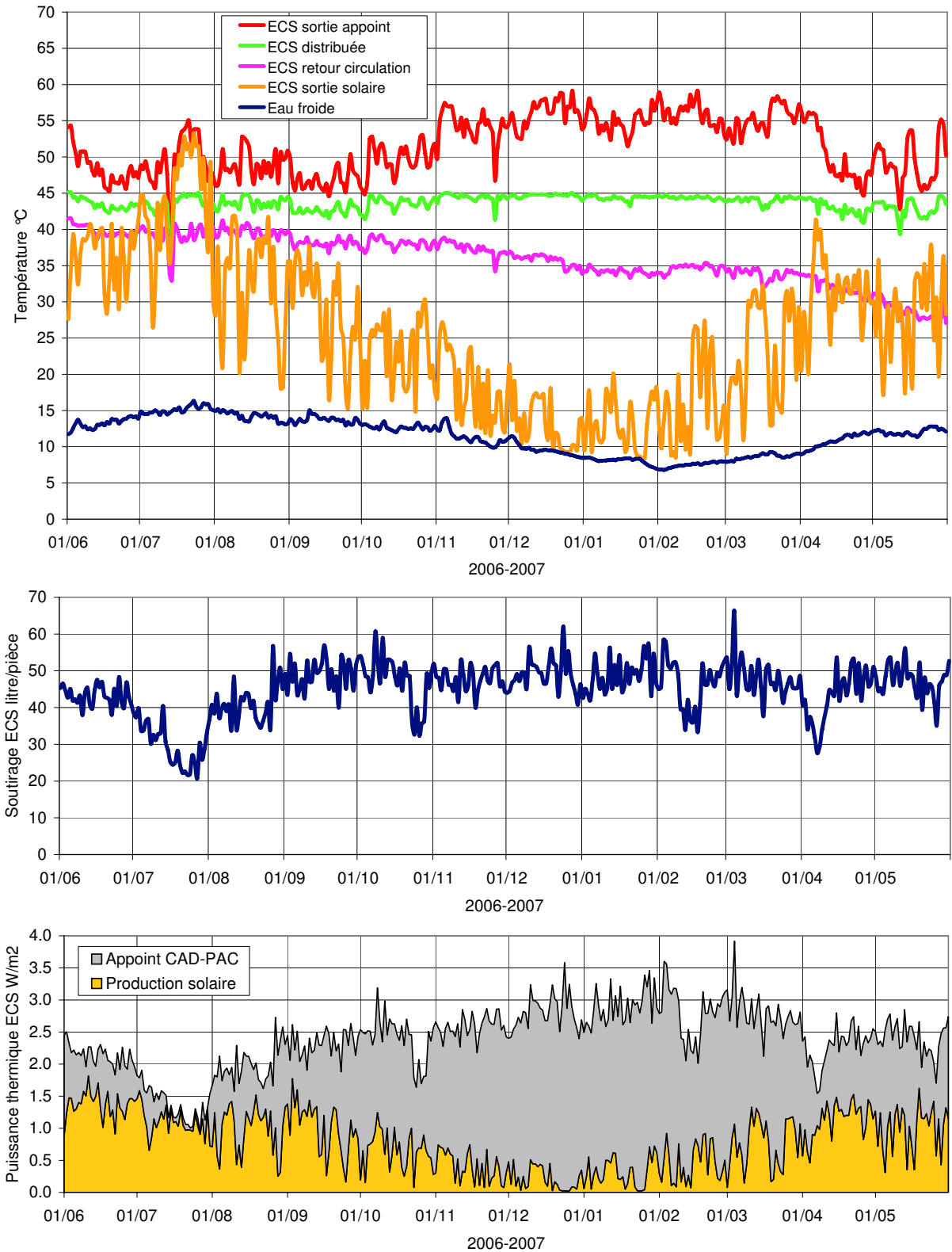


FIG. 2.13 – Caractéristiques journalières du système de production d'ECS. Haut : températures de soutirage, production et distribution de l'ECS. Milieu : soutirage de l'ECS en litre par pièce (152 pièces pour 24 logements). Bas : profil de production annuel.

Il s'agit des valeurs horaires mesurées entre le 1er juin 2006 et le 31 mai 2007, exprimées en W/m^2 .

Le graphique du haut montre la demande totale du bâtiment (bleu). Celle-ci est composée de la demande pour le chauffage des logements (rose) et de celle nécessaire pour la production de l'ECS (vert). La demande de chauffage est la somme des contributions du système aéroulque et du système hydraulique. Le récupérateur de chaleur du système double-flux, ainsi que la pompe à chaleur sur air vicié, fournissent une contribution thermique aux logements par le biais du système de ventilation. Les chaudières à gaz fournissent la chaleur par l'intermédiaire du système de distribution hydraulique et des radiateurs. La demande en ECS indiquée correspond à la demande globale.

La puissance installée des chaudières à gaz est également représentée sur ce graphique (24 W/m^2). En cas de mauvais fonctionnement simultané du système de ventilation à double-flux et de l'installation solaire thermique, la réserve installée suffirait à couvrir 99% de la demande de chauffage, et 95% de la demande globale de chaleur du bâtiment. Ces valeurs correspondent à un hiver clément (2005-2006). La couverture pour un hiver normalisé serait un peu plus basse.

Le graphique du milieu montre les puissances classées des trois systèmes de production de chaleur. La pompe à chaleur air-air et les radiateurs ont été actifs pendant environ 4500 heures, soit un peu moins qu'une saison normalisée de chauffage à Genève que l'on estime à 4800 heures par an. Le système à double-flux a fourni une prestation thermique pendant presque 7000 heures. Cela provient du fait que ce système, qui réchauffe l'air pulsé de manière passive avec son échangeur de chaleur, fonctionne tout au long de l'année. Il fournit 6 W/m^2 pendant 500 heures, 4 W/m^2 pendant 2500 heures ou 2 W/m^2 pendant 4900 heures.

Le graphique du bas montre les puissances classées de la production solaire d'ECS et de l'appoint composé d'un mix entre le CAD (gaz) et la pompe à chaleur air-eau. L'installation solaire thermique fournit 4 W/m^2 pendant 450 heures ou 2 W/m^2 pendant 1400 heures.

2.6 Analyse du confort thermique

La Figure 2.15 montre l'évolution de la température moyenne des logements en fonction de la température extérieure. Les valeurs sont des moyennes horaires mesurées sur le retour de la ventilation.

À titre indicatif, la zone de confort admissible en période estivale, préconisée par la recommandation SIA 382/2 pour les bâtiments commerciaux, est représentée en rouge sur le graphique. Cette abaque, associée à une sélection spécifique de certains points, est normalement utilisée pour quantifier la "surchauffe" des locaux et établir ainsi la preuve du besoin en terme de climatisation. Le positionnement de cette abaque sur les mesures permet toutefois d'apprécier le bon comportement thermique du bâtiment pendant les périodes les plus chaudes. La température intérieure a été supérieure à $28 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant seulement 66 heures (1%), et cela sans jamais dépasser les $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.7 Analyse de la qualité de l'air

Le maître d'ouvrage souhaitait à la fois fournir aux locataires des logements performants en terme de consommation d'énergie, mais également un habitat présentant une pollution minimale de l'air intérieur. Le choix des matériaux de construction, ainsi que leur mise en oeuvre, a donc été effectué en cohérence avec cette démarche.

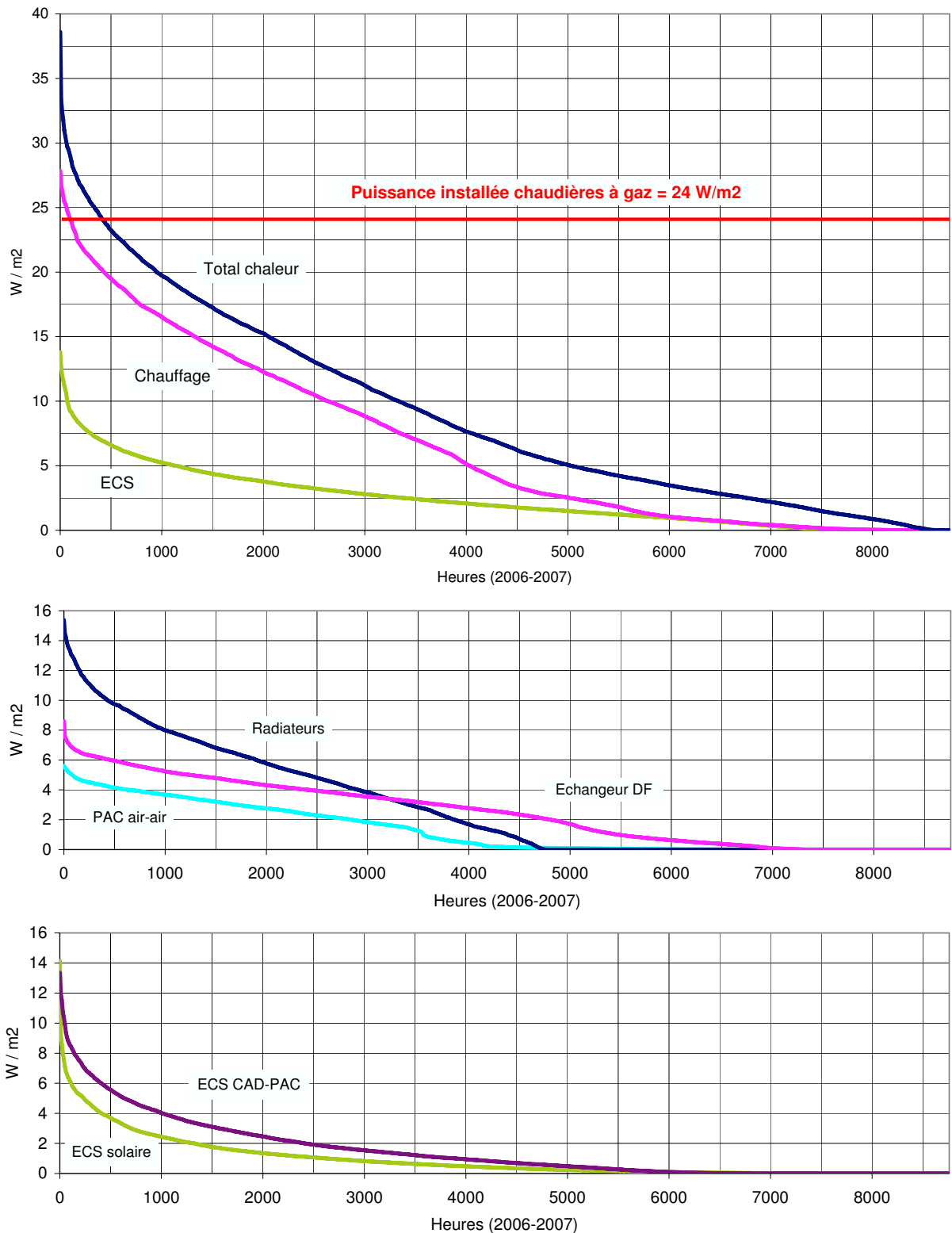


FIG. 2.14 – Haut : Demande de chaleur horaire classée du bâtiment Giacometti, exprimée en W/m^2 . Demande totale, de chauffage et d'ECS. La puissance installée des chaudières à gaz est également représentée à titre indicatif. Milieu : Puissance classée des trois systèmes de chauffage : radiateurs (gaz), pompe à chaleur sur air vicié et ventilation à double-flux avec échangeur de chaleur. Bas : Puissance classée de la production solaire d'ECS et de l'appoint composé d'un mix entre le CAD (gaz) et la pompe à chaleur air-eau. On rappelle ici que les courbes classées n'ont pas de propriétés additives.

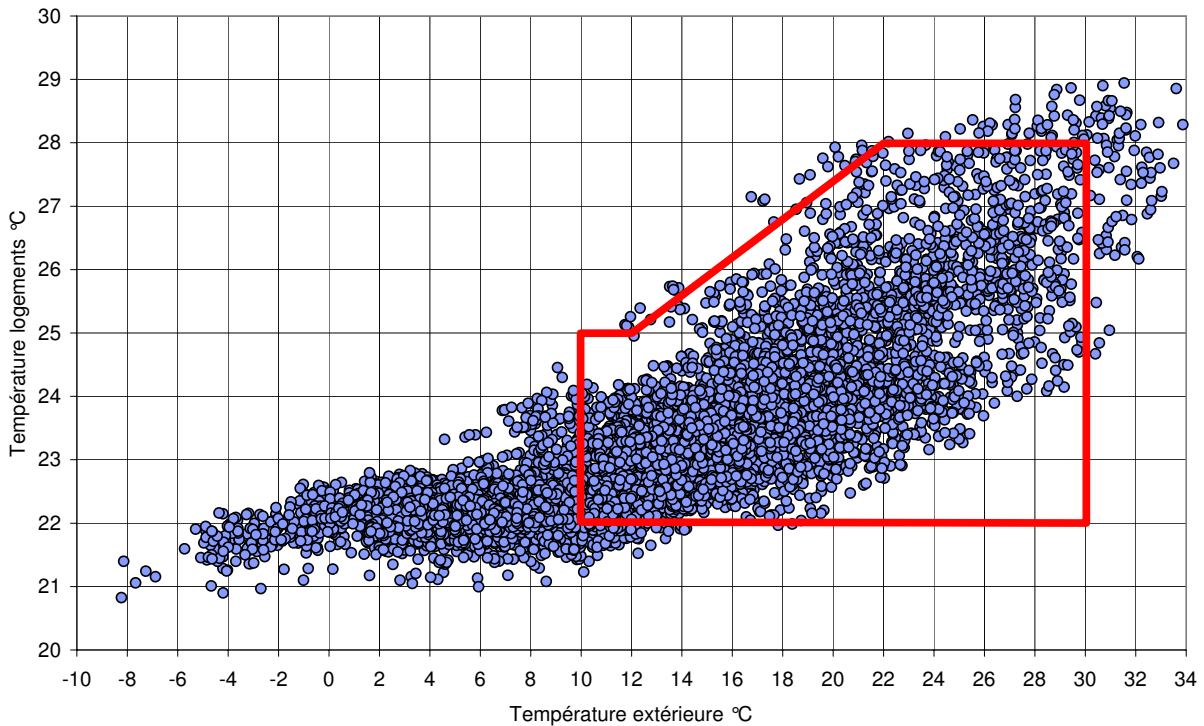


FIG. 2.15 – Évolution de la température moyenne des logements en fonction de la température extérieure. Valeurs horaires mesurées sur le retour de la ventilation entre le 1er juin 2006 et le 31 mai 2007. À titre indicatif, la zone de confort admissible en période estivale, préconisée par la recommandation SIA 382/2 pour les bâtiments commerciaux, est représentée en rouge sur le graphique.

Un suivi de la qualité de l'air intérieur de quelques logements du Pommier a été financé (environ 10'000 francs) et réalisé par le service cantonal de toxicologie industrielle et de protection contre les pollutions intérieures (STIPI). Les résultats de cette étude, réalisée sous la direction de Félix Dalang, ont été publiés dans un document intitulé "La qualité de l'air intérieur dans les logements du quartier du Pommier", disponible auprès du STIPI [28].

Ci-après, se trouve **un résumé de ce rapport**, reprenant les principaux éléments et résultats de cette campagne de surveillance.

2.7.1 Introduction

Depuis les années 1990, la pollution intérieure entre de plus en plus dans le centre d'intérêt des constructeurs de l'habitat. D'une part, on a compris que la pollution de l'air intérieur est beaucoup plus importante que celle de l'air extérieur. Sachant que l'homme passe environ 90% de son temps à l'intérieur des bâtiments, il s'expose donc à une pollution bien plus importante que celle présumée. D'autre part, l'étanchéité accrue des constructions récentes impose une bonne gestion de la ventilation du bâtiment, ceci afin d'éviter l'accumulation des polluants dans les locaux. Finalement, l'introduction de nouveaux matériaux et processus de construction peut également contribuer à émettre de nouveaux polluants jusqu'ici inconnus.

2.7.2 Acquisition et traitement des données

Deux appartements situés dans le bâtiment de la rue Gardiol ont été instrumentés. L'un se trouve au deuxième étage de l'allée 8 (numéro 22), et l'autre au cinquième étage de l'allée 10 (numéro 51). Quatre prélèvements ont été effectués entre octobre 2004 et mai 2005. Le premier a eu lieu avant l'arrivée des locataires, et les suivants à intervalles croissants jusqu'à 200 jours après l'eménagement.

Les paramètres qui ont été suivis sont ceux qui posent le plus souvent des problèmes dans les bâtiments neufs. Il s'agit des composés organiques volatils (COV) et des composés carbonylés, dont essentiellement le formaldéhyde. L'analyse des mesures a permis de quantifier la concentration totale de COV, mais également l'évolution de quelques substances individuelles. En plus du formaldéhyde, l'évolution d'autres composés carbonylés a également été suivie.

2.7.3 Analyse des mesures

Seuls l'analyse des COV, du formaldéhyde et du taux de renouvellement sont présentés ici. Pour de plus amples informations sur les mesures, le lecteur se référera au rapport final [28].

2.7.3.1 Composés organiques volatils (COV)

Le graphique du haut de la Figure 2.16 présente l'évolution des COV totaux. Concernant ce polluant, aucune valeur directrice n'est définie en Suisse pour les habitations. Au niveau international, des valeurs de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont parfois proposés. L'expérience du STIPI leur a cependant permis de définir les quatre zones suivantes :

Appréciation STIPI	COV total $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Très élevée	> 3000
Élevée	1000 à 3000
Moyenne	300 à 1000
Faible	< 300

TAB. 2.3 – Appréciation des concentrations en COV total basée sur l'expérience du STIPI.

On constate que les valeurs initiales sont excellentes. Dans les nouveaux bâtiments, des valeurs situées au-delà de $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont souvent observées. La forte augmentation dans la chambre de l'appartement 51 est clairement due à un objet d'usage amené par les habitants. La plus faible augmentation aux deux autres points de mesures est probablement due à la même cause.

Une comparaison avec quatre autres constructions neuves du même type montre que les résultats du Pommier sont excellents. Les autres projets montrent des concentrations initiales en COV de l'ordre de $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à $10'000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ avec ensuite une tendance à la décroissance.

2.7.3.2 Formaldéhyde

Le graphique du bas de la Figure 2.16 présente l'évolution du formaldéhyde. Pour cette substance, l'Office fédéral de la santé publique recommande de ne pas dépasser les $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le STIPI a cependant observé que les personnes allergiques (atopiques) peuvent être incommodées à des concentrations bien inférieures : une valeur inférieure à $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ peut être considérée comme

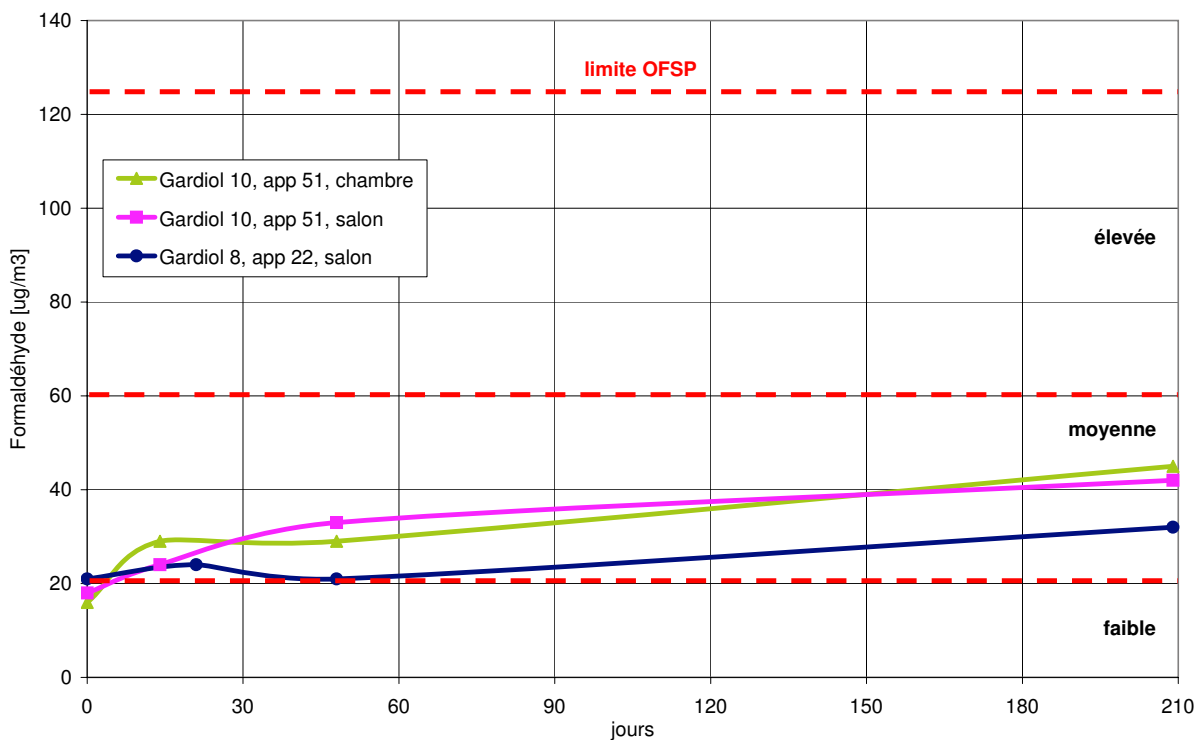
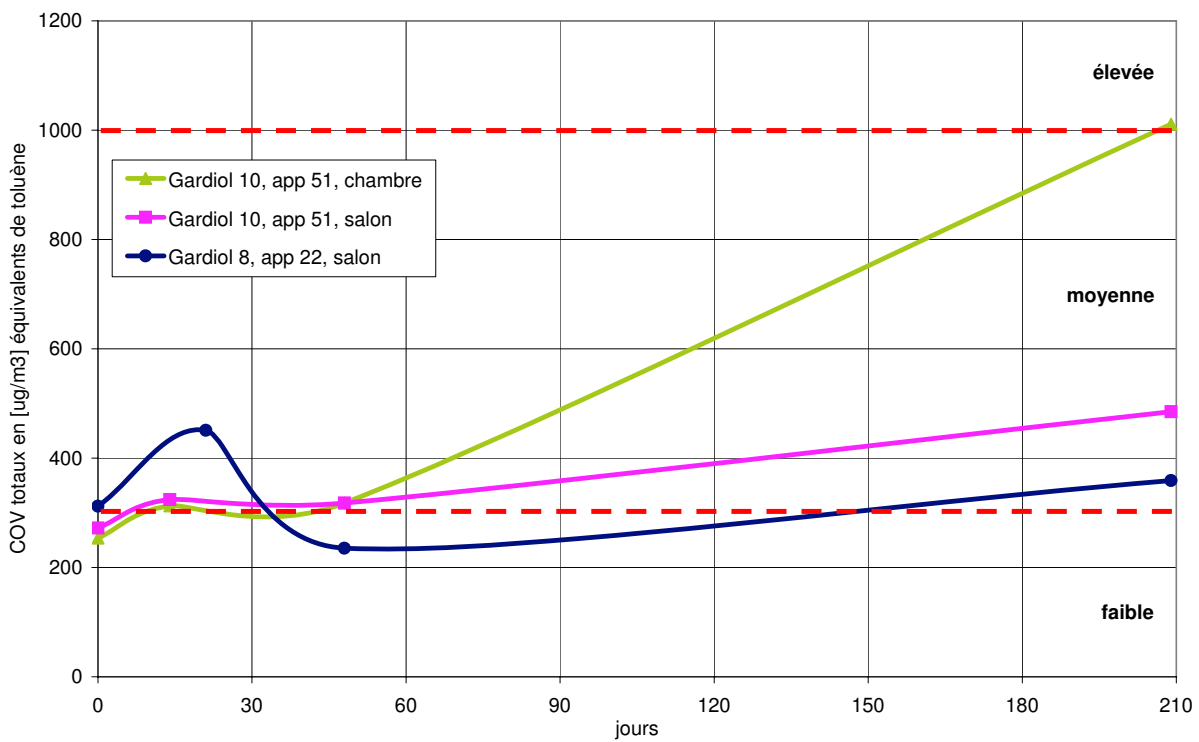


FIG. 2.16 – Haut : Mesure des composés organiques volatiles (COV) totaux pour les trois points de mesure. Bas : Mesure du Formaldéhyde. Dans les deux cas, les lignes pointillées rouges désignent les limites d'appréciation du STIPI basées sur leur expérience.

"bonne" et une valeur supérieure à $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ peut "poser problème", notamment pour les personnes atopiques.

Appréciation STIPI	Formaldéhyde $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Limite fédérale	125
Élevée	> 60
Moyenne	20 à 60
Faible	< 20

TAB. 2.4 – Appréciation des concentrations en formaldéhyde basée sur l'expérience du STIPI.

Là aussi, les valeurs initiales sont excellentes. Comme pour les COV, les valeurs ont tendance à augmenter avec le temps.

2.7.4 Conclusions

Les résultats initiaux sont excellents. L'effort de bien choisir les matériaux a porté ses fruits. À noter surtout le choix du parquet vitrifié en usine et l'utilisation systématique de vernis, colles et peintures solubles à l'eau à l'intérieur.

Il est dommage que les valeurs aient tendance à augmenter avec le temps. La cause n'a pas pu être identifiée, mais il est évident que ce sont des émanations provenant d'objets d'usage introduits dans les appartements par les habitants.

Il est indispensable de fournir aux locataires un document qui explique bien le caractère de l'immeuble et qui donne des consignes de comportement à avoir non seulement pour le système de ventilation et de chauffage, mais également pour ce qui concerne la qualité de l'air intérieur.

2.8 Conclusions

Le concept énergétique et architectural mis en oeuvre dans ces bâtiments permet de garantir un bon niveau de confort pendant toutes les périodes de l'année.

Les systèmes techniques participent largement à la baisse de la consommation de gaz, mais leur intégration au bâtiment a augmenté de 27% la consommation électrique globale de celui-ci.

Il est possible de réaliser des logements ayant un taux de pollution intérieur bien plus bas que les émanations provenant des habitants eux-mêmes.

Chapitre 3

Analyse des sous-systèmes

3.1 Introduction

Ce chapitre analyse en profondeur la performance de l'installation solaire thermique et celle du système de ventilation à double-flux. La performance des chaudières à gaz et de l'enveloppe thermique est également évaluée.

3.2 Installation solaire thermique

Cette section analyse en détail la performance de l'installation solaire thermique. Le rendement de conversion, la productivité, la couverture solaire d'ECS et la consommation électrique sont évalués. Une modélisation fine de l'installation et une évaluation de la performance avec l'outil rapSOL-th sont également effectuées.

3.2.1 Caractéristiques du fluide caloporteur

Le fluide caloporteur du circuit primaire - qui relie le champ de capteurs à l'échangeur de chaleur - est composé d'un mélange d'eau et de propylène glycol (antigel) dont les propriétés physiques varient en fonction de la température. Une correction de la masse volumique et de la chaleur spécifique de ce fluide en fonction de la température est donc nécessaire pour calculer avec précision les quantités de chaleur transportées. On peut utiliser pour cela le modèle 3.1 proposé par Conde [37] qui permet de calculer les différentes propriétés physiques d'un tel fluide en fonction de son taux de mélange ξ et de sa température T (en valeur absolue). Les paramètres A_1 à A_5 dépendent de la propriété recherchée. Les valeurs à utiliser pour déterminer la masse volumique et la chaleur spécifique d'une solution aqueuse propylène glycol sont données dans la Table 3.1.

$$P(\xi, T) = A_1 + A_2\xi + A_3\frac{273.15}{T} + A_4\xi\frac{273.15}{T} + A_5\left(\frac{273.15}{T}\right)^2 \quad (3.1)$$

$P(\xi, T)$	Unité	A1	A2	A3	A4	A5
ρ_{pg}	kg/m ³	508.41109	- 182.40820	965.76507	280.29104	- 472.22510
c_{pg}	kJ/kgK	4.47642	0.60863	- 0.71497	- 1.93855	0.47873

TAB. 3.1 – Paramètres du modèle 3.1 pour le calcul de la masse volumique et de la chaleur spécifique d'une solution aqueuse de propylène glycol [37].

Des échantillons du liquide caloporteur de l'installation Giacometti ont été prélevés environ une fois par année. Une mesure de la masse volumique de ces échantillons à une température donnée nous a permis, au moyen de la relation 3.1, de déterminer le taux de mélange effectif ξ_{pg} de ces solutions. Les résultats sont présentés dans la Table 3.2.

L'installation a été mise en service au courant de l'été 2004 avec une solution contenant 31.6 % d'antigel. La mesure suivante effectuée en juillet 2005 indique qu'entre ces deux dates la solution a été enrichie à 37.9 %. Ce taux de mélange va rester stable pendant les deux années suivantes. Pendant cette même période, comme nous le verrons plus loin, de l'air va progressivement pénétrer dans le circuit hydraulique provoquant la stagnation d'une partie du champ de capteurs pendant les heures les plus ensoleillées de l'été. Le 25 mai 2007, après avoir détecté in situ une surchauffe anormale de certains capteurs, l'entreprise Enerbat a effectué une purge du circuit remplaçant le fluide manquant par de l'eau courante ce qui a eu pour effet de diluer le mélange et de le ramener à 22.9 %.

Date	ρ_{pg}	T_{pg}	ξ_{pg}
-	kg/m ³	°C	%
04.08.2004	1023	20.3	31.6
07.07.2005	1028	20.3	37.9
23.05.2006	1028	20.3	37.9
25.05.2007	1028	20.3	37.9
14.10.2007	1016	20.7	22.9

TAB. 3.2 – Mesures ponctuelles de la masse volumique ρ_{pg} du liquide caloporteur de l'installation solaire Giacometti à la température T_{pg} et calcul du taux de mélange ξ_{pg} à l'aide du modèle 3.1.

En se basant sur ce taux de mélange effectif et sur la température du fluide mesurée la plus proche du débitmètre, les caractéristiques physiques du caloporteur ont été calculées pour chaque point de mesure à l'aide de la relation 3.1.

3.2.2 Rendement de conversion

Le rendement de conversion annuel représente la fraction d'énergie solaire reçue annuellement par les capteurs que le système est capable de valoriser. Cette énergie est ensuite transmise à l'eau chaude sanitaire à travers l'échangeur de chaleur. On détermine ce rendement par régression linéaire sur les valeurs journalières d'ensoleillement et de production solaire.

La Figure 3.1 (gauche) illustre ces valeurs journalières qui ont été réparties en deux groupes. Le premier groupe (croix bleues) représente le système en fonctionnement normal. Le deuxième groupe (triangles rouges) représente les jours pendant lesquels une partie du champ de capteur s'est mise en stagnation. Cet état de fonctionnement, que l'on cherche à éviter, peut apparaître lors des chaudes journées ensoleillées durant lesquelles le bilan thermique des capteurs ne permet plus un refroidissement suffisant du fluide caloporteur dont une partie se vaporise au sein des capteurs. Cet effet, amplifié par la présence intrinsèque d'air dans le circuit comme cela était le cas dans notre installation, peut bloquer temporairement la circulation du fluide dans une branche de l'installation ce qui a pour effet de diminuer la surface de captage et donc la productivité. On voit effectivement sur le graphique que pour une ensoleillement supérieur à 20 MJ/m².jour la production journalière

est plus basse que la tendance donnée par les mesures en fonctionnement normal. Un exemple d'une telle journée est donné dans la Figure 3.1 (droite).

Les deux points excentrés représentés par des carrés verts (de gauche à droite les 26 et 27 janvier 2007) sont deux journées pendant lesquelles les capteurs ont été recouverts par de la neige. En effet, d'après les relevés de l'institut suisse de météorologie [38], 12cm de neige sont tombés sur Genève le 23 janvier 2007. Les deux jours qui ont suivi ont été très froids avec une nébulosité élevée. Le ciel s'est finalement dégagé le 26 et le 27 a été une journée très ensoleillée. Ces deux points ne seront évidemment pas intégrés dans les régressions.

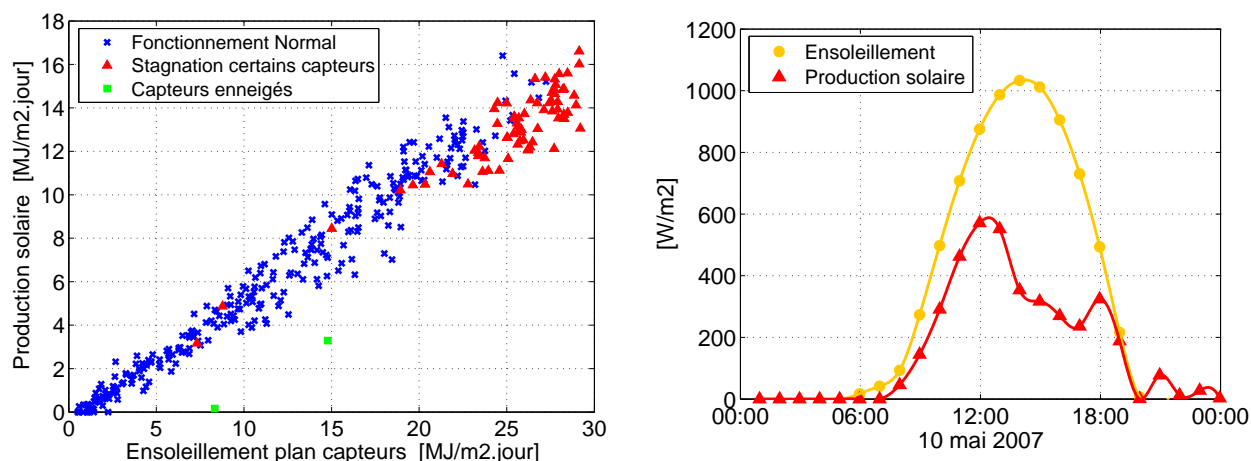


FIG. 3.1 – Gauche : Valeurs journalières d'ensoleillement et de production de l'installation solaire thermique pendant l'année de référence. Croix = production normale, Triangle = stagnation d'une partie du champ de capteur, Carré = capteurs enneigés. Droite : Exemple d'un jour bien ensoleillé où une partie du champ de capteurs s'est mise en stagnation (baisse de production, heure d'hiver).

Le rendement effectif de l'installation, calculé par régression sur toutes les mesures, est de 54%. Une deuxième régression effectuée cette fois-ci uniquement sur les jours pendant lesquels le système n'était pas en stagnation (croix bleues) donne un rendement de 57%. On peut donc en conclure que la présence d'air dans le circuit hydraulique a provoqué une baisse de production d'environ 3 à 4% pour l'année de référence (voir Tableau 3.3). A noter également que le seuil de production se situe à 1 MJ/m^2 d'ensoleillement par jour.

3.2.3 Productivité

La productivité correspond au produit du rendement par l'ensoleillement reçu et s'exprime (par habitude) en kWh de chaleur produit par mètre carré de capteurs installés. La productivité d'une installation solaire varie fortement avec le taux de soutirage de l'eau chaude sanitaire qui dépend directement du nombre d'utilisateurs et de leur mode de consommation. La productivité augmente lorsque la surface de capteurs par utilisateur diminue.

Le nombre de locataires n'est pas toujours connu avec précision, on utilise donc en lieu et place l'unité de consommation (UC)¹ avec laquelle on calcule la surface spécifique en m^2/UC . Cet indicateur de consommation normalisé permet d'effectuer des comparaisons entre diverses installations comme le montre la Figure 3.2 (gauche). Sur ce graphique, les résultats du Pommier sont

¹L'unité de consommation est définie comme étant la consommation journalière moyenne d'une personne en eau chaude, soit 50 litres d'ECS à 55°C, ce qui représente un équivalent de 8.82 MJ/jour pertes de distribution incluses.

mis en perspective avec ceux de plusieurs autres installations solaires situées dans le canton de Genève, en région lémanique et en Suisse [39]. Les mesures sont affichées sans correction climatique et peuvent donc fluctuer sensiblement autour de leur position en fonction de la période mesurée. La comparaison en terme de tendance est toutefois pertinente et l'on peut observer, à ce titre, qu'avec une productivité annuelle de 769 kWh/m² pour une surface spécifique de 0.4 m²/UC, le système solaire du bâtiment Giacometti se situe parfaitement bien dans la tendance générale des autres installations.

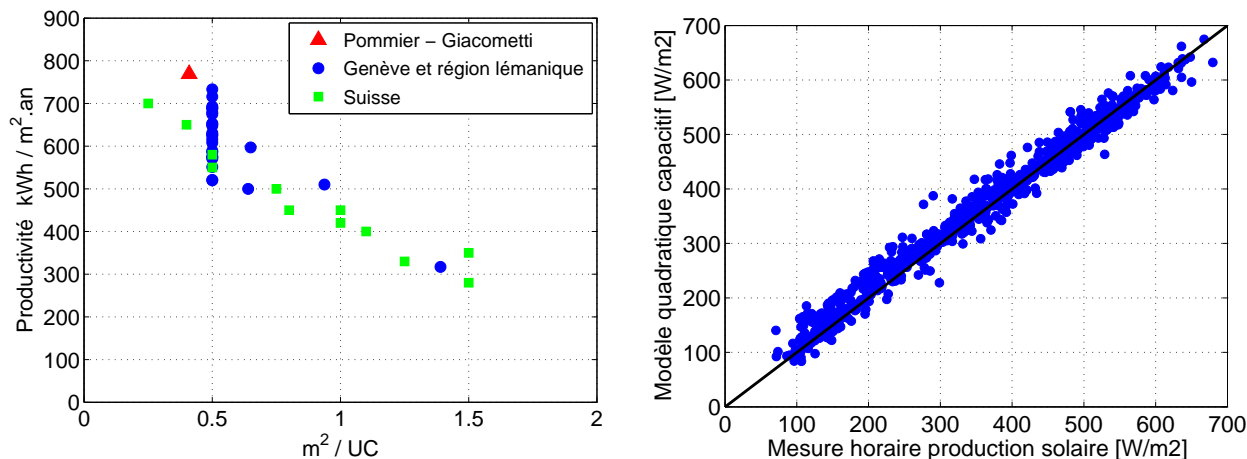


FIG. 3.2 – Gauche : productivité annuelle en fonction de la surface spécifique de l’installation solaire du bâtiment Giacometti comparée à 39 autres installations mesurées à Genève, en région lémanique et en Suisse [39]. Droite : Validation du modèle quadratique capacitif en fonction des mesures. Points horaires pour un débit > 35 l/m²h.

Lors du dimensionnement de l’installation, une simulation à l’aide du logiciel Polysun a été effectuée par le fabricant des capteurs pour estimer quelles seraient les performances du système [40]. Les données issues de cette simulation sont présentées dans le Tableau 3.3 en regard avec les valeurs mesurées.

Système solaire	Prévu	Mesuré	Unité
Rendement de conversion :			
> Effectif (toutes les valeurs)	60	53.9 ± 1.1	%
> Sans les jours de stagnation	60	57.6 ± 1.3	%
Productivité par m ² de capteur	786	769	kWh/m ² .an
Surface spécifique	0.47	0.41	m ² /UC
Ensoleillement plan capteurs	4681	5314	MJ/m ² .an
Pertes conduites (SRE)	1.0	1.0 ^(a)	MJ/m ² .an

TAB. 3.3 – Performances annuelles prévues et mesurées de l’installation solaire thermique Giacometti pour l’année de référence. Surface capteurs (absorbeurs) = 44.55 [m²]. Valeurs prévues selon simulation Polysun du constructeur [40]. (a) Voir la sous-section 3.2.4.2 pour les détails de calcul.

L’étude des différences entre les paramètres utilisés lors de la simulation et les paramètres mesurés montrent que la bonne concordance entre les productivités prévues (786 kWh/m²) et mesurées (769 kWh/m²) résulte d’un équilibre de variations aux effets antagonistes. La mise en évidence et la

quantification précise de ces effets nécessiterait une étude approfondie de l'installation. Cependant, au vu des bonnes performances de celle-ci et des objectifs globaux de cette étude, nous pensons qu'il n'est pas nécessaire de le faire ici et nous nous limiterons à une estimation de l'impact sur la productivité des quatre effets mesurables suivants :

1. L'ensoleillement annuel a été 13% plus élevé que les données utilisées pour la simulation (Météonorm). Cet apport supplémentaire a eu lieu principalement pendant la basse saison, lorsque la couverture solaire est basse, permettant ainsi de valoriser au mieux ce surplus (estimation des gains entre 80 et 100 kWh/m²).
2. La surface spécifique est plus petite que prévue. Estimation du gain à 22 kWh/m² en utilisant le modèle simple développé par Lachal [39, page 9].
3. La présence d'air dans le circuit hydraulique a diminué le rendement annuel de l'installation. Estimation des pertes à 53 kWh/m², en calculant quelle aurait été la production avec un rendement sans stagnation de 57.6%.
4. Les pertes thermiques des conduites ont été évaluées à 1 MJ/m²an (cf. 3.2.4.2) et correspondent aux prévisions faites lors du dimensionnement. Pas d'impact à priori sur la productivité. Cependant, la modélisation des capteurs effectuée plus loin semble montrer que ces pertes sont sous-évaluées et qu'elles peuvent donc engendrer une baisse de la productivité.

Le bilan de ces effets n'est pas équilibré : la productivité aurait du être plus élevée d'environ 55 à 75 kWh/m², on atteint les limites de ce type d'approche qui ne permet pas de savoir si l'on sur-estime les gains et/ou si l'on sous-estime les pertes. À noter également que les pertes des conduites à l'intérieur de la zone chauffée représentent un gain interne annuel d'environ 0.5 MJ/m² dont une grande partie est fournie en période estivale.

3.2.4 Modélisation des capteurs

3.2.4.1 Modèle

Le comportement thermique des capteurs solaires peut être décrit par des modèles plus ou moins sophistiqués. Dans notre cas, un modèle dynamique est nécessaire pour tenir compte de l'effet capacitif de l'installation. Nous utiliserons pour nos analyses le modèle 3.2 ci-dessous, basé sur les normes ISO 9806 et EN 12975 développées pour le test des capteurs solaires thermiques. Ce modèle simplifié considère un rayonnement normal au plan du capteur et un régime établi de circulation du fluide caloporteur.

$$\frac{\dot{Q}_{sol}}{G_{cap}} = \eta_{sol,o} - K_1 \frac{T_{cap} - T_{ext}}{G_{cap}} - K_2 \frac{(T_{cap} - T_{ext})^2}{G_{cap}} - C_{sol} \frac{dT_{cap}}{dt} \cdot \frac{1}{G_{cap}} \quad (3.2)$$

Les paramètres du modèle sont les suivants : $\eta_{sol,o}$ représente le rendement optique (fonctionnement sans pertes), K_1 le facteur de perte thermique linéaire, K_2 le facteur de perte thermique quadratique et C_{sol} la capacité thermique du capteur. Ces paramètres sont déterminés par régression multilinéaire à partir des mesures d'ensoleillement G_{cap} , de production solaire \dot{Q}_{sol} , de température extérieure T_{ext} et de la température moyenne des capteurs T_{cap} que l'on calcule en faisant la moyenne des températures de départ et de retour du fluide caloporteur.

Les points sélectionnés pour la régression sont des moyennes horaires qui répondent à deux exigences. D'une part, on s'assure que la pompe de circulation a été enclenchée au moins 30 minutes avant l'heure considérée et a fonctionné de manière ininterrompue pendant toute la durée de celle-ci. D'autre part, on ne sélectionne que les points pour lesquels l'angle d'incidence du rayonnement

est inférieur à 20° . Pour les capteurs plan vitré de ce type, le rayonnement global dans le plan des capteurs pour des incidences plus petites que 20° est quasiment identique au rayonnement normal [41, page 310].

Les régressions effectuées sur les mesures de l'année de référence (juin 2006 à mai 2007) n'ont pas donné de bons résultats et cela est très certainement dû à la présence de l'air dans le circuit hydraulique. Nous avons alors pris comme référence la période qui a immédiatement suivi la purge du système, soit les mois de juin à septembre 2007.

Comme les sondes de mesure se trouvent au sous-sol, les caractéristiques obtenues par la régression incluent également les effets thermiques et capacitifs des conduites hydrauliques qui relient le stock aux capteurs. Il est donc nécessaire de corriger les résultats obtenus pour pouvoir les comparer avec les données du centre de test SPF qui ne portent que sur les capteurs.

3.2.4.2 Pertes thermiques des conduites

Il y a en tout 150 mètres de conduites DN32 (1"1/4) qui relient le stock situé au sous-sol aux capteurs situés en toiture et qui se décomposent de la manière suivante : 94m depuis l'échangeur de chaleur jusqu'en toiture à travers le volume chauffé (isolation de 30mm en laine de verre), 28m posés dans l'isolation de la toiture (Foamglas de 4mm entre la dalle et les conduites et 140mm entre les conduites et l'air extérieur) et 28m posés à l'extérieur sur la superstructure (isolation de 40mm en laine de verre). Le facteur de perte linéique des conduites intérieures et extérieures est calculé à l'aide de la relation suivante tirée de l'ouvrage de référence "Le Recknagel" [42, page 773] pour laquelle on néglige le coefficient d'échange superficiel interne (infini) :

$$U_{cond} = 2\pi \frac{\lambda_{isol} h_e (r + e_{isol})}{\lambda_{isol} + h_e (r + e_{isol}) \ln\left(\frac{r+e_{isol}}{r}\right)} \quad W/mK \quad (3.3)$$

où λ_{isol} et e_{isol} représentent respectivement la conductibilité thermique et l'épaisseur de l'isolation, h_e le coefficient d'échange superficiel externe et r le rayon extérieur de la conduite (21.2mm pour DN32). Pour les conduites posées dans l'isolation de la toiture on considère, par simplification, des transferts de chaleur normaux à travers l'isolation en prenant le demi-périmètre développé comme surface unitaire d'échange (πr). Le facteur de perte linéique est calculé comme pour les couches planes avec la relation ci-dessous. Le calcul du facteur côté intérieur prend en compte l'isolant et 20cm de béton armé ($\lambda=1.8$ W/mK).

$$U_{cond} = \frac{\pi r}{\sum_k \frac{e_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_e}} \quad W/mK \quad (3.4)$$

En ce qui concerne les quelques mètres de conduites non-isolées, nous avons considéré les valeurs suivantes [36, page 39] : 2.86 W/mK pour les conduites de 1"1/4 en chaufferie et 1.8 W/mK pour les raccords des capteurs sur le toit.

Les pertes ont été calculées avec les mesures des températures suivantes. La température des capteurs T_{cap} qui correspond à la moyenne de la température de départ et de retour des capteurs. La température intérieure T_{int} qui correspond à la température moyenne des logements prise sur le retour de la ventilation. La température extérieure T_{ext} mesurée sur le toit et la température du local T_{loc} où se trouvent les cuves de stockage mesurées par la sonde de référence des thermocouples. Toutes les données et les résultats sont donnés dans le Tableau 3.4. On peut donc estimer les pertes linéiques à 40.6 W/K, soit 0.9 W/K par mètre carré de capteurs installés.

Variable	λ_{isol}	e_{isol}	h_e	U_{cond}	l_{cond}	$(UI)_{cond}$	ΔT	Q_{cond}
Unité	W/mK	mm	W/m ² K	W/mK	m	W/K	K	MJ/m ² an
Extérieur nu	-	0	-	1.80	2	3.6	$T_{cap} - T_{ext}$	0.13
Extérieur isolé	0.035	40	25	0.20 ^(a)	26	5.2	$T_{cap} - T_{ext}$	0.19
Toiture-Ext	0.045	140	25	0.02 ^(b)	28	0.6	$T_{cap} - T_{ext}$	0.02
Toiture-Int	0.045	4	8	0.06 ^(c)	28	1.7	$T_{cap} - T_{int}$	0.04
Intérieur	0.035	30	8	0.23 ^(a)	91	20.9	$T_{cap} - T_{int}$	0.45
Chaufferie nu	-	0	-	2.86	3	8.6	$T_{cap} - T_{loc}$	0.20
Total	-	-	-	-	150	40.6	-	1.0

TAB. 3.4 – Pertes thermiques des conduites solaires. (a) Calcul selon relation 3.3. (b) Calcul selon la relation 3.4. (c) Calcul selon la relation 3.4 avec 20cm de béton armé ($\lambda=1.8$ W/mK).

3.2.4.3 Capacité thermique des conduites

Les caractéristiques normalisées des tubes en acier² nous permettent de déterminer que les 150 mètres de conduites représentent une capacité thermique de 209 kJ/K et qu'elles contiennent 152 litres de fluide caloporteur. La capacité thermique volumique moyenne de ce fluide, calculé sur les points retenus lors de la régression, est de 4.01 kJ/K.l ce qui représente 609 kJ/K de capacité thermique du fluide. On constate que le fluide contribue aux trois quart à l'effet capacitif. Le tout ramené à 1 m² de capteurs représente 18.4 kJ/m²K.

3.2.4.4 Résultat et conclusions

Le résultat corrigé de la modélisation est présenté dans le Tableau 3.5 et confronté au résultat des tests effectués sur ce modèle de capteur par l'institut für Solartechnik de la Haute école d'ingénieur de Rapperswil [43]. Une validation du modèle en fonction des mesures est également présentée dans la Figure 3.2 (droite) pour des points horaires dont le débit est supérieur à 35 l/m²h.

Modèle quadratique capacitif	$\eta_{sol,o}$	K_1	K_2	C_{sol}
	-	W/m ² K	W/m ² K ²	kJ/m ² K
Régression capteurs + conduites	83.9 ± 3.3	6.1 ± 1.7	0.016 ± 0.026	37.9 ± 4.5
Corrections effets des conduites		-0.9		-18.4
Résultat corrigé champ capteurs	83.9 ± 3.3	5.2 ± 1.7	0.016 ± 0.026	19.5 ± 4.5
Données du centre de test SPF	84.9	3.70	0.0143	19.5

TAB. 3.5 – Résultat de la régression multilinéaire du modèle quadratique capacitif (éq. 3.2, intervalle de confiance 95%) et données du centre de test [43]. La capacité thermique SPF inclut le fluide caloporteur dans le capteur. Période considérée de juin à septembre 2007.

Mis à part les pertes thermiques linéaires (K_1) qui semblent être sous-évaluées, la comparaison des mesures avec les données du centre de test SPF permet de constater qu'en utilisation réelle les capteurs se comportent de manière assez fidèle aux caractéristiques mesurées en laboratoire.

²DN32 (DIN 2440) : capacité calorifique 1.39 kJ/Km et contenance 1.012 l/m. Source Heizung+Klima Technik, chap 234, p 559.

3.2.5 Couverture solaire de l'ECS

Le graphique en haut et à gauche de la Figure 3.3 donne la production mensuelle d'ECS. Celle-ci n'est pas constante, elle dépend de la température d'arrivée de l'eau sanitaire (graphique en bas à gauche) et du volume de puisage (graphique en bas à droite).

La température de l'eau suit l'évolution du climat extérieur avec un certain amortissement. Elle présente des variations de 9°C entre l'hiver et l'été (7°C début février, 16°C fin juillet et 11.4°C en moyenne annuelle). Chaque degré supplémentaire correspond à un gain mensuel d'environ 0.2 MJ/m². Le volume de puisage est constant (entre 7000 et 8000 litres par jour) avec des baisses ponctuelles corrélées aux vacances scolaires. En effet, on retrouve sur ce graphique les quatre "pics" correspondant respectivement aux vacances d'été (juillet-août 2006), aux vacances d'octobre (23 au 27 octobre 2006), aux vacances de février (12 au 16 février 2007) et aux vacances de Pâques (5 au 13 avril 2007).

L'installation solaire thermique couvre annuellement 33% des besoins en ECS avec des variations mensuelles qui vont de 7% en décembre à 64% en juin. Le mois de juillet 2006 présente une couverture de 80% mais bénéficie de circonstances particulières, à savoir une température de l'eau du réseau élevée et surtout une demande fortement réduite (vacances). Mis à part les fluctuations de la demande, cette grande variabilité a pour origine principale les variations en phase de l'ensoleillement et de la température de l'eau du réseau. Le graphique en haut et à droite de la Figure 3.3 montre les couvertures solaires journalières classées. Pendant un tiers de l'année, la couverture a été supérieure à 50% et pendant les deux-tiers de l'année elle a été supérieure à 20%.

3.2.6 Consommation électrique

La consommation électrique des deux pompes de circulation a été mesurée de manière ponctuelle : le système en production consomme 350W. A partir des mesures de débit qui donnent l'information marche/arrêt, nous avons estimé une consommation annuelle de 80 MJ/an par m² de capteur installé ou 0.8 MJ/an par m² de surface de référence énergétique (SRE). Chaque MJ d'électricité consommé permet de produire (en moyenne annuelle) 35 MJ de chaleur avec des variations saisonnières entre 23 l'hiver et 40 l'été.

3.2.7 Évaluation de la performance avec l'outil rapSOL-th

Sous mandat du Service cantonal de l'énergie du canton de Genève (ScanE), le CUEPE a développé un outil simple permettant aux exploitants d'installation solaire destiné à la production d'eau chaude sanitaire d'effectuer un autocontrôle des performances de leur installation [44]. Cet outil se présente sous la forme d'une réglette dont les variables d'entrées sont la productivité solaire (kWh/m²) et la surface relative (m²/UC). Ces valeurs sont reportées sur une abaque de référence pour chaque mois et le résultat permet une appréciation qualitative de la performance de l'installation.

Les mesures mensuelles de la productivité, la consommation d'eau chaude sanitaire (ECS) et le calcul de la surface relative sont présentées dans le Tableau 3.6. La surface relative a été calculée de deux manières. Une première fois en utilisant la relation donnée par la réglette, soit 1.5 x surface des capteurs / V_{ECS} (Sr1). Une deuxième fois en se basant sur les mesures de consommation d'énergie pour l'ECS et en utilisant une unité de consommation (UC) de 8.82 MJ/jour (Sr2).

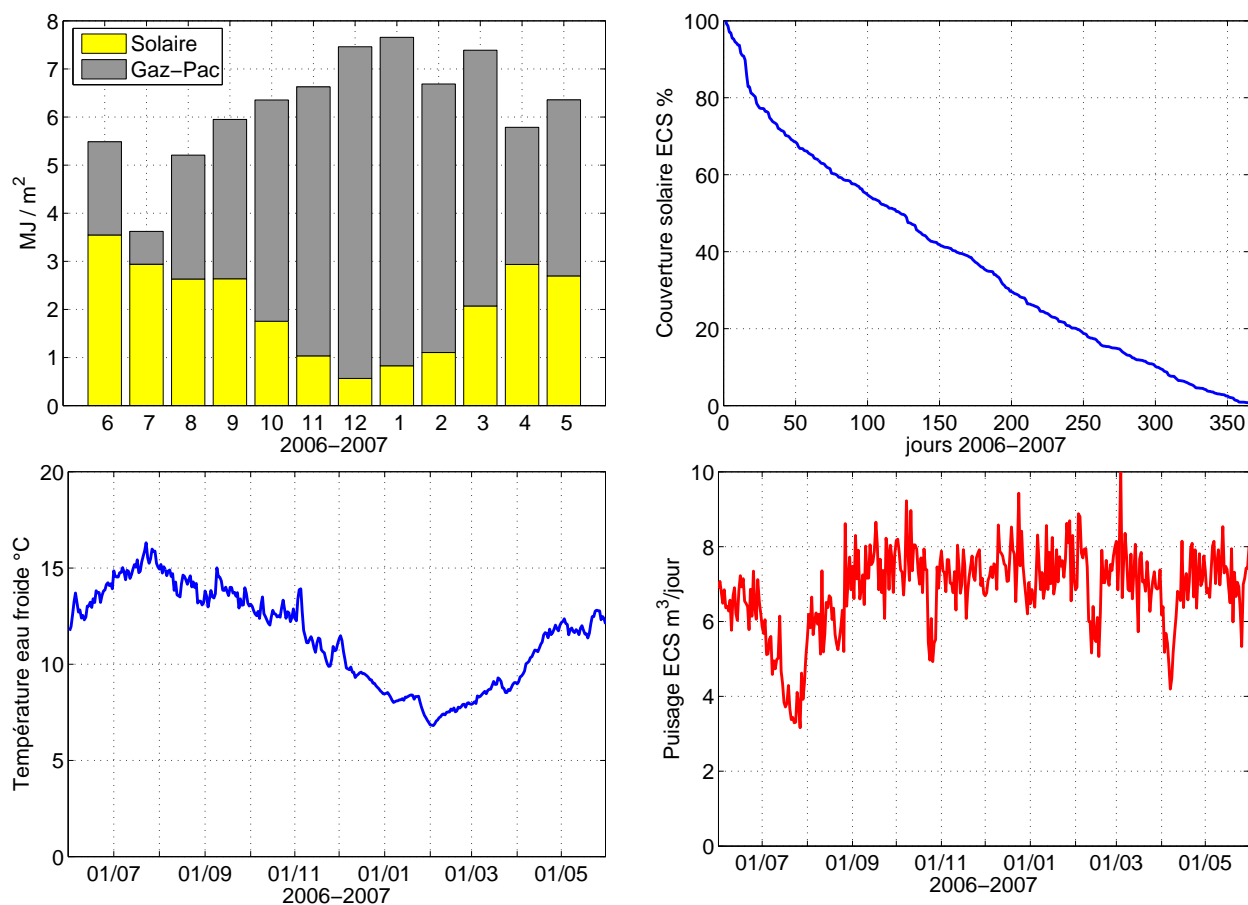


FIG. 3.3 – Figures du haut : couverture solaire de la production d’ECS mensuelle (gauche) et couverture journalière classée (droite). Figures du bas : température (gauche) et volume (droite) de puisage journalier de l’eau sanitaire.

Les surfaces relatives mesurées $Sr2$ sont systématiquement plus élevées que celles calculées avec le coefficient de 1.5 proposé par la réglette ($Sr1$). Le calcul d’un coefficient empirique pour cette installation est présenté dans la dernière colonne du Tableau ($\beta_{Sr2} = Sr2 \times V_{ECS} / \text{surface capteurs}$). Les résultats montrent que ce coefficient fluctue entre 1.6 pendant l’hiver et 2.3 pendant l’été et que sa valeur annuelle moyenne est de 2.

L’écart provient essentiellement de la température de distribution de l’ECS qui, grâce au mitigeur, est de 44°C , alors que les hypothèses de calcul de la réglette se basent sur la température habituellement rencontrée de 55°C . La température de l’eau froide mesurée est de 11.4°C en moyenne annuelle et reste très proche de la valeur de 12°C retenue dans le modèle. En intégrant ces différences dans le calcul du coefficient de la réglette (1.5), on retrouve la valeur 2 observée en moyenne annuelle. Les fluctuations saisonnières proviennent des variations de la température de l’eau sanitaire du réseau qui varie entre 7°C l’hiver et 16°C l’été.

Une évaluation pour chaque surface relative a été réalisée. Les résultats sont présentés dans la Figure 3.4. L’utilisation du coefficient standard de la réglette (1.5) tend à sous-évaluer la performance de l’installation pour les mois d’avril à octobre.

Mois	Q_{sol}	V_{ECS}	Sr1	Sr2	β_{Sr2}
-	kWh/m ²	m ³	m ² /UC	m ² /UC	m ³ /UC
06/2006	111	197	0.34	0.46	2.0
07/2006	102	140	0.48	0.72	2.3
08/2006	82	192	0.35	0.50	2.2
09/2006	80	223	0.30	0.43	2.1
10/2006	53	223	0.30	0.41	2.1
11/2006	30	218	0.31	0.38	1.9
12/2006	16	231	0.29	0.35	1.8
01/2007	24	229	0.29	0.34	1.8
02/2007	33	197	0.34	0.35	1.6
03/2007	64	226	0.30	0.35	1.8
04/2007	92	196	0.34	0.44	1.9
05/2007	82	223	0.30	0.41	2.1

TAB. 3.6 – Mesures de la production solaire Q_{sol} et de la consommation d'eau chaude sanitaire V_{ECS} . La surface relative a été calculée en utilisant la relation donnée par la réglette ($Sr1 = 1.5 \times \text{surface capteurs} / V_{ECS}$) et à partir des mesures en utilisant un UC de 8.82 MJ/jour ($Sr2$). Le coefficient β_{Sr2} correspond au calcul : $Sr2 \times V_{ECS} / \text{surface capteurs}$. La surface des capteurs est de 44.55 m².

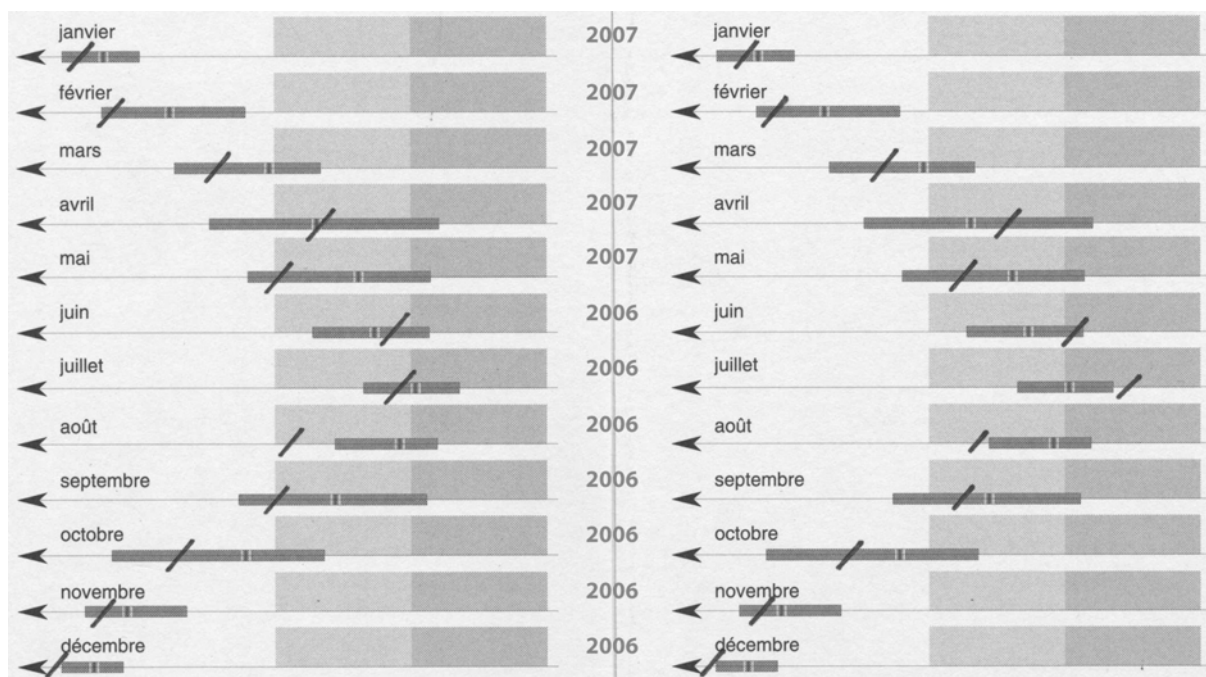


FIG. 3.4 – Évaluation de la performance de l'installation solaire à l'aide de la réglette solaire rapSOL-th. Gauche : calcul de la surface relative selon les instructions de la réglette ($Sr1$). Droite : calcul de la surface relative d'après les mesures ($Sr2$). Les données se trouvent dans le Tableau 3.6.

3.3 Monobloc de ventilation à double flux

Les variables de fonctionnement du monobloc de ventilation ont été mesurées durant toute la période de référence, soit du 1er juin 2006 au 31 mai 2007. Les consommations électriques des deux ventilateurs et de la pompe à chaleur ont été mesurées du 1er décembre 2006 au 31 mai 2007. Deux modèles, basés sur les mesures, ont été utilisés pour reconstruire ces consommations du 1er juin 2006 au 30 novembre 2006.

Sur la base de ces données, cette section analyse l'évolution de la consommation électrique du monobloc, l'effet sur la consommation électrique de l'obturation des filtres et les coefficients de performance (COP) du système double-flux et de la pompe à chaleur.

3.3.1 Simulation de la consommation électrique des ventilateurs

L'objectif de cette simulation est de reconstruire les données manquantes sur la base des mesures effectuées et d'un modèle qui tient compte des caractéristiques principales du système.

3.3.1.1 Modélisation

Le modèle aéraulique du monobloc de ventilation et du réseau de gaine est illustré à la Figure 3.5. Les trois éléments principaux générant les pertes de charge sont : le filtre (Δpf), l'échangeur de chaleur (Δpe) et le réseau de gaine de ventilation (Δpr). K_f , K_e et K_r représentent respectivement les constantes aérauliques associées à ces éléments³. La perte de charge du filtre est variable et dépend de l'obstruction de celui-ci. L'échangeur peut être by-passé par un volet dont l'ouverture α est réglable de 0 à 100%.

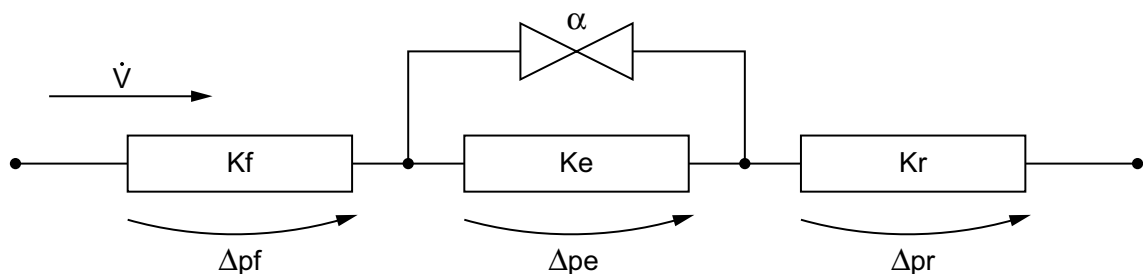


FIG. 3.5 – Modèle aéraulique du monobloc de ventilation et du réseau de gaine associé. K_f , K_e et K_r sont respectivement les constantes aérauliques des filtres, de l'échangeur et du réseau de gaines et Δpx les pertes de charges associées. Le by-pass de l'échangeur est représenté par l'élément α .

La consommation électrique du ventilateur de pulsion ou d'extraction Φ_{ven} est définie de la manière suivante :

$$\Phi_{ven} = \frac{\dot{V} \Delta p}{\eta} \quad (3.5)$$

où \dot{V} représente le débit volumique, Δp la perte de charge à travers le ventilateur et η l'efficacité globale du ventilateur. La perte de charge du ventilateur est égale à la somme des pertes de charge du système (filtre + échangeur + réseau de gaines) :

³ $K = \xi / 2S^2 [1/m^4]$, où ξ = coefficient de perte de charge apparent [-] et S = surface aéraulique apparente.

$$\Phi_{ven} = \frac{\dot{V}}{\eta} [\Delta pf + \Delta pe + \Delta pr] \quad (3.6)$$

Les deuxième et troisième termes peuvent être exprimés en fonction du débit \dot{V} , de la masse volumique de l'air ρ et des constantes aérauliques respectives ($\Delta p = K\rho\dot{V}^2$) :

$$\Phi_{ven} = \frac{\dot{V}}{\eta} \left[\Delta pf + K_e \rho (\dot{V}(1 - \alpha))^2 + K_r \rho \dot{V}^2 \right] \quad (3.7)$$

Le terme $(1 - \alpha)$ donne la part du flux qui traverse l'échangeur de chaleur. La perte de charge à travers le bypass est considérée comme nulle. En distribuant, on trouve l'équation suivante à laquelle on rajoute un terme constant (β) nécessaire à la robustesse de la régression multilinéaire :

$$\Phi_{ven} = \beta + \left(\frac{1}{\eta}\right) \dot{V} \Delta pf + \left(\frac{K_e \rho}{\eta}\right) \dot{V}^3 (1 - \alpha)^2 + \left(\frac{K_r \rho}{\eta}\right) \dot{V}^3 \quad (3.8)$$

À partir de la consommation électrique du ventilateur Φ_{ven} , du débit \dot{V} , de la perte de charge des filtres Δpf et de l'ouverture du bypass α qui sont des variables mesurées, la régression permet de déterminer les paramètres du modèle. Les résultats pour les deux ventilateurs se trouvent dans la Table 3.7 ci-dessous :

Variable	β	$1/\eta$	$(K_e \rho)/\eta$	$(K_r \rho)/\eta$
Unité	W	-	kg/m ⁷	kg/m ⁷
Ventilateur de pulsion	103.07	1.92	83.01	241.37
Ventilateur d'extraction	139.87	2.37	92.16	268.24

TAB. 3.7 – Résultats de la régression multilinéaire de l'équation 3.8 sur les mesures de décembre 2006 à mai 2007.

La Figure 3.6 illustre, pour un jour type, la superposition du modèle par rapport aux mesures. Le modèle simplifié utilisé permet d'obtenir une bonne estimation de la consommation électrique des ventilateurs et une reconstruction solide des données manquantes.

3.3.1.2 Discussion des résultats

Les paramètres calculés du modèle permettent également d'obtenir l'efficacité des ventilateurs (η) ainsi que les pertes de charges de l'échangeur (Δpe) et du réseau aéraulique (Δpr) pour les conditions de fonctionnement standard. Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 3.8.

Dans ce Tableau, les résultats d'une mesure ponctuelle effectuée par l'entreprise Menerga le 14 mars 2006 sont également présentés. Lors de ce relevé, les pertes de charge en divers points du système ont été mesurés, ce qui nous a permis de calculer les deux pertes de charge qui nous intéressent. À l'aide de la mesure de la perte de charge des filtres et de l'analyse de la consommation électrique des ventilateurs (section 3.3.5.2, page 76), la puissance électrique de ces derniers a pu être déterminée à 1886 W pour la pulsion et à 1840 W pour l'extraction. La puissance mécanique des deux ventilateurs est de 1118 W, produit d'une perte de charge de 660 Pa et d'un débit de 6100 m³/h. Ces valeurs conduisent donc à une efficacité des ventilateurs de 59% pour la pulsion et de 61% pour l'extraction.

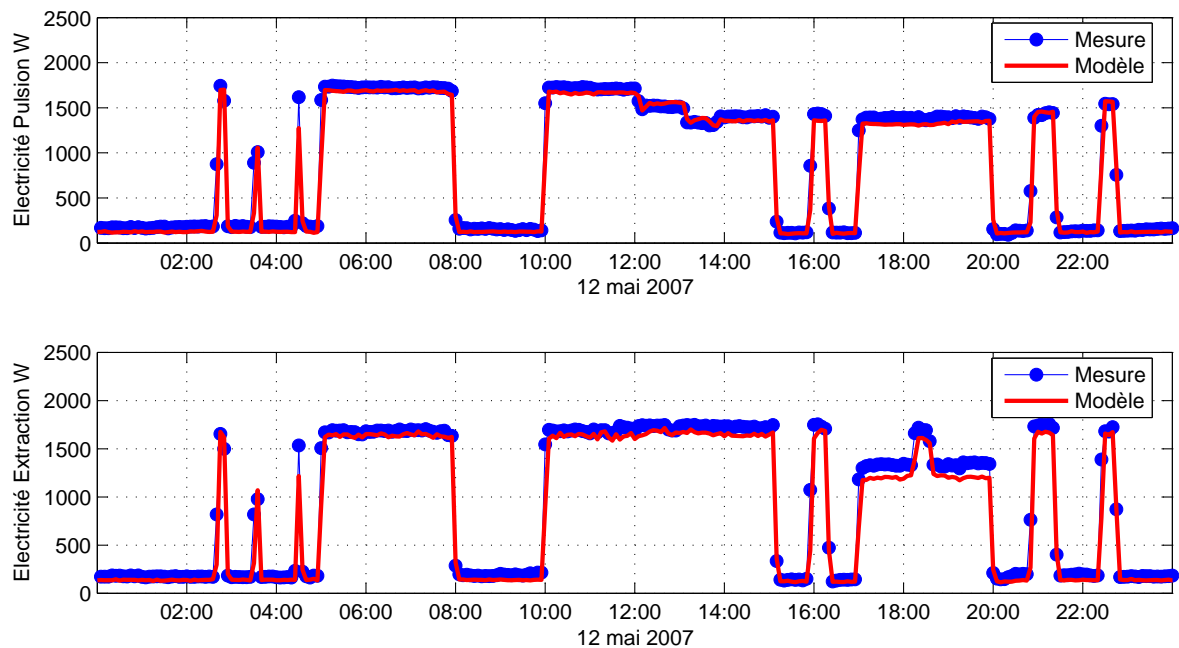


FIG. 3.6 – Superposition du modèle de consommation électrique des ventilateurs 3.8 sur les mesures d'un jour type. Les paramètres du modèle se trouvent dans le Tableau 3.7

	η [%]	Δpe [Pa]	Δpr [Pa]
Ventilateur de pulsion			
Résultats de la régression du modèle 3.8	52	124	361
Calculs d'après les mesures Menerga du 14/03/06	59	190	340
Ventilateur d'extraction			
Résultats de la régression du modèle 3.8	42	112	325
Calculs d'après les mesures Menerga du 14/03/06	61	250	360

TAB. 3.8 – Efficacité des ventilateurs (η) et pertes de charges de l'échangeur (Δpe) et du réseau aéronautique (Δpr) calculés à partir des paramètres obtenus par régression du modèle 3.8 et calculés pour un débit nominal de $6100 \text{ m}^3/\text{h}$. Comparaison avec les calculs réalisés sur la base de mesures effectuées par Menerga le 14 mars 2006 (débit $6100 \text{ m}^3/\text{h}$).

La comparaison des mesures in-situ avec les valeurs issues de la modélisation montre que ces dernières sont cohérentes.

Une étude portant sur des installations similaires [45] montre que l'efficacité des deux ventilateurs de pulsion et d'extraction se situe dans la moyenne des observations pour des appareils de même puissance, dont l'efficacité mesurée varie entre 40% et 65%. Le système a été dimensionné pour une perte de charge du réseau de 400 Pa. La mesure, tout comme la modélisation, confirme ce résultat avec une perte moyenne située entre 330 et 360 Pa. Les pertes de charges de l'échangeur obtenues par régression sont par contre sous-évaluées, et même d'un facteur deux pour la partie extraction.

Dans le cas de cette mesure ponctuelle, la puissance électrique des ventilateurs se répartit en moyenne comme ceci : 40% pour les pertes moteur-ventilateur, 32% pour le réseau aéraulique, 20% pour l'échangeur de chaleur, 7% pour les filtres et 1% pour le condenseur de la pompe à chaleur.

3.3.2 Simulation de la consommation électrique de la PAC

L'objectif de cette simulation est de reconstruire les données manquantes sur la base des mesures effectuées et d'un modèle simple.

Une puissance fixe pour chaque mode de fonctionnement a été définie : 4500 W en fonctionnement air-air et 6200 W en fonctionnement air-eau. Ces valeurs ont été ajustées de manière à obtenir des sommes cumulées correspondantes aux relevés des compteurs SIG. La Figure 3.7 illustre, pour un jour type, la superposition du modèle par rapport aux mesures.

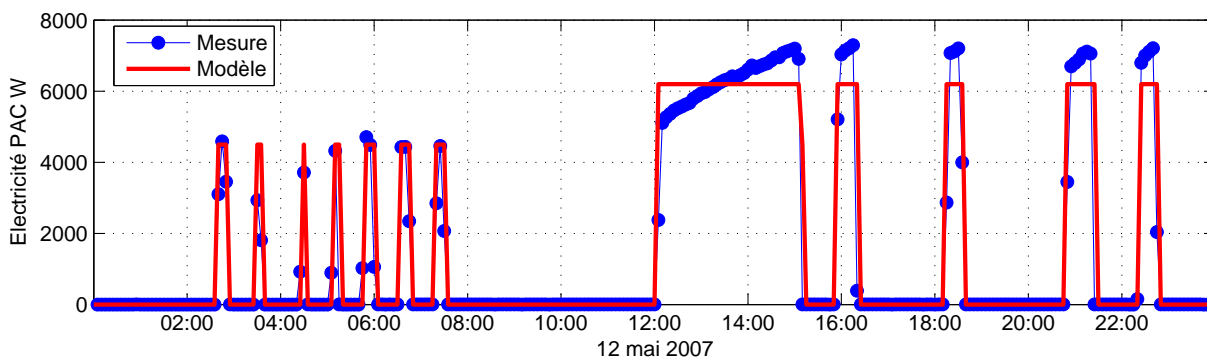


FIG. 3.7 – Modélisation de la consommation électrique de la pompe à chaleur

3.3.3 Profil de charge annuel du monobloc

La Figure 3.8 présente, pour l'année de référence, les consommations électriques en moyenne journalière des ventilateurs et de la pompe à chaleur ainsi que les pertes de charge des filtres et le débit d'extraction.

La consommation électrique des ventilateurs dépend du débit d'air et du niveau d'obstruction des filtres. En effet, les ventilateurs sont régulés pour maintenir un débit constant correspondant à une

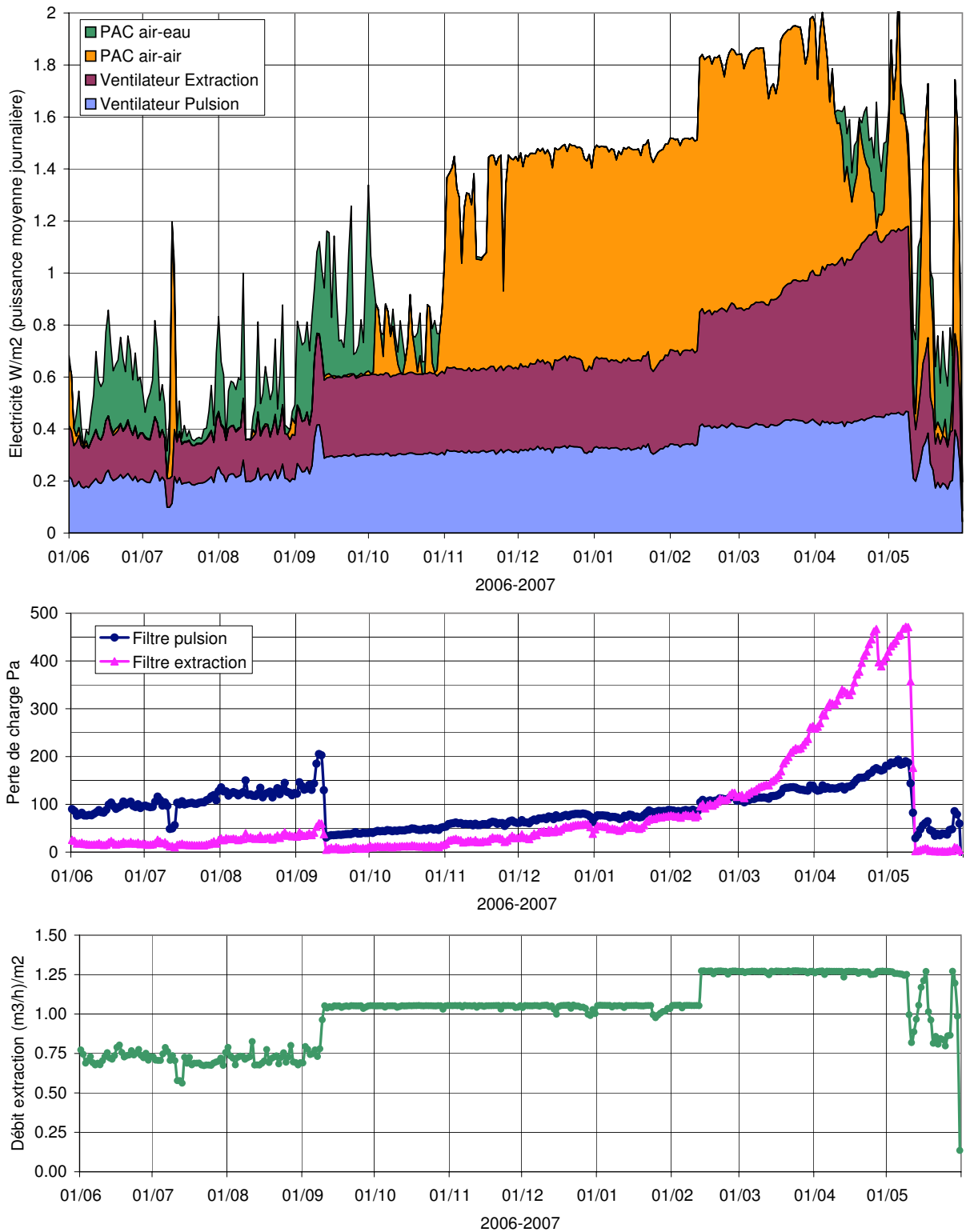


FIG. 3.8 – Valeurs moyennes journalières mesurées de décembre 2006 à mai 2007 et reconstruites pour les dates antérieures. Haut : consommation électrique du système de ventilation double-flux et de la pompe à chaleur du bâtiment Giacometti en W/m^2 , SRE = 4605 m^2 . Milieu : pertes de charges des filtres en Pa. Bas : débit d'extraction en $m^3/h/m^2$, volume chauffé net = 10'733 m^3 .

valeur de consigne. Par conséquent, l'obstruction progressive des filtres va provoquer une augmentation de la puissance consommée pour la même prestation fournie.

Le débit et les pertes de charge des filtres ont passablement évolué durant l'année de mesure, comme on peut l'observer sur les deux graphiques respectifs de la Figure 3.8. Le premier juin, le débit moyen journalier était de $0.71 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. La ventilation fonctionnait 20h par jour avec un régime en grande vitesse pendant les trois repas principaux et en petite vitesse sinon. Dès le 9 septembre, pour une raison inconnue, le débit était constamment en grande vitesse et le débit moyen journalier passe à $1.05 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Le 12 septembre, les deux filtres sont remplacés par des filtres neufs, bien que le filtre d'extraction soit encore peu obstrué. On peut observer jusqu'en février la constante augmentation de la perte de charge due à l'obstruction progressive des filtres. Le 12 février, le programme est modifié pour ventiler les logements 24h par jour. Le débit moyen journalier passe à $1.27 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. La forte augmentation de la perte de charge du filtre d'extraction que l'on peut observer dès le mois de mars provient, avec une forte probabilité, des pollens que l'on trouve en grande quantité dans l'air pendant cette période. Finalement, le 10 mai, le système fonctionne de nouveau en mode petite/grande vitesse et les filtres sont à nouveau remplacés.

Dans ce dernier mode de fonctionnement, le débit moyen journalier varie entre $0.81 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ et $1.27 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ comme on peut le constater sur le graphique. Ces variations sont dues au pilotage de la pompe à chaleur qui, lors de son fonctionnement, force le débit à passer en grande vitesse, comme le montre la Figure 3.9 ci-dessous.

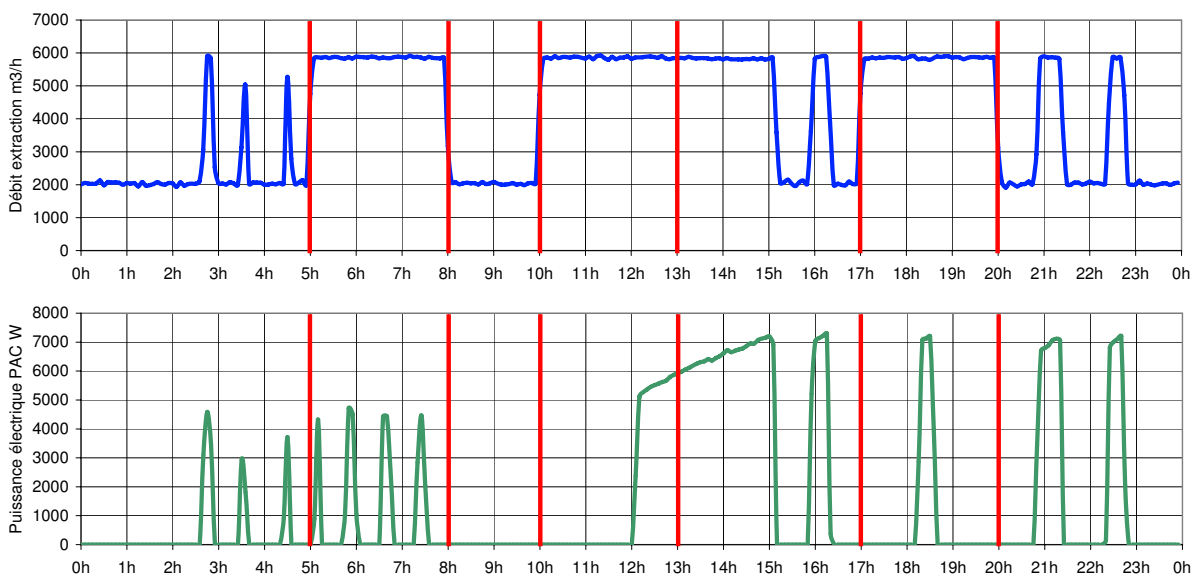


FIG. 3.9 – Débit d'extraction et puissance électrique de la PAC mesurés le 12 mai 2007. Les lignes rouges délimitent les périodes de fonctionnement petite/grande vitesse programmée. Les mesures sont en heure d'hiver, il faut rajouter 1h pour cette date.

Cet exemple montre l'évolution du débit d'extraction en fonction de l'utilisation de la pompe à chaleur. Les mesures sont en heure d'hiver, il convient donc de rajouter 1h pour cette date, le 12 mai 2007. La PAC effectue le post-chauffage de l'air pulsé entre 3h et 9h du matin et fournit l'appoint à l'ECS entre 13h et 24h. Dans tous les cas, chaque fois qu'elle est sollicitée, le débit bascule en grande vitesse.

Un débit de $0.81 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ correspond à des enclenchements de la PAC pendant les heures de repas, où le système fonctionne déjà en grande vitesse. Un débit de $1.27 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ correspond à une utilisation de la PAC 24h par jour. En période hivernale et dans l'entre-saisons, plus la température extérieure sera basse, plus la PAC sera sollicitée pour faire le post-chauffage de l'air et plus le débit moyen journalier sera donc élevé. En été, bien que la puissance d'appel soit plus élevée lorsque la PAC fonctionne en mode air-eau, les sollicitations pour l'appoint de l'ECS sont ponctuelles et le débit journalier n'augmente pas dans de grandes proportions comme le montre les mesures de la Figure 3.8 entre début juin et fin août.

3.3.4 Puissances d'appel horaires classées

La Figure 3.10 montre les puissances d'appel horaires classées des deux ventilateurs et de la pompe à chaleur.

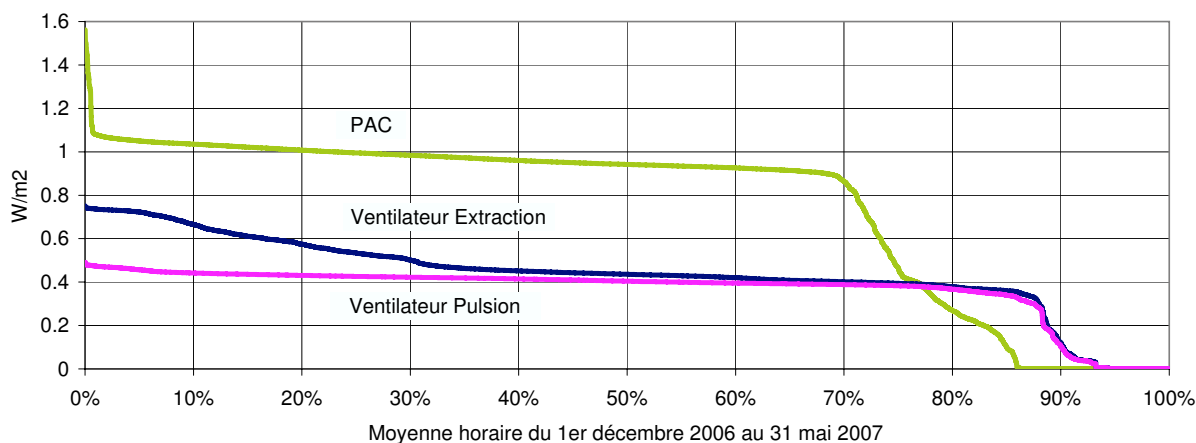


FIG. 3.10 – Puissances d'appel horaires classées des ventilateurs du double-flux et de la pompe à chaleur. Mesures effectuées entre le 1er décembre 2006 et le 31 mai 2007.

Les mesures ont été faites entre le 1er décembre et le 31 mai et ne couvrent donc pas une année entière. Il est important de considérer cette donnée dans l'interprétation des résultats concernant la pompe à chaleur. En effet, celle-ci possède deux modes de fonctionnement à caractère saisonnier : un mode air-air pour le post-chauffage de l'air pulsé en hiver et pendant les entre-saisons, et un mode air-eau pour fournir l'appoint à l'ECS pendant l'été. Sa consommation spécifique respective est d'environ $1 \text{ W}/\text{m}^2$ en mode air-air et environ 1.3 à $1.5 \text{ W}/\text{m}^2$ en mode air-eau. Durant la période de mesure, la pompe à chaleur a fonctionné pendant la plus grande majorité du temps en mode air-air, ce qui explique l'allure de la courbe classée que l'on peut observer sur le graphique.

La consommation spécifique des ventilateurs est de $0.4 \text{ W}/\text{m}^2$ lorsque ceux-ci fonctionnent à la valeur de consigne ($6000 \text{ m}^3/\text{h}$) et avec des filtres neufs. L'obstruction progressive des filtres a porté cette consommation à $0.5 \text{ W}/\text{m}^2$ pour la pulsion (200 Pa) et à $0.7 \text{ W}/\text{m}^2$, soit presque le double, pour l'extraction (480 Pa).

3.3.5 Performance des ventilateurs

3.3.5.1 Consommation électrique spécifique

La Figure 3.11 représente la consommation électrique spécifique des ventilateurs en fonction du débit. Les deux points de fonctionnement principaux se trouvent à 2000 m³/h et 6000 m³/h, qui sont respectivement les débits à petite et à grande vitesse. Seuls sont représentés les points pour lesquels les deux bypass de l'échangeur sont fermés. La consommation spécifique représente donc l'intégralité du travail effectué par les ventilateurs pour traverser l'échangeur de chaleur.

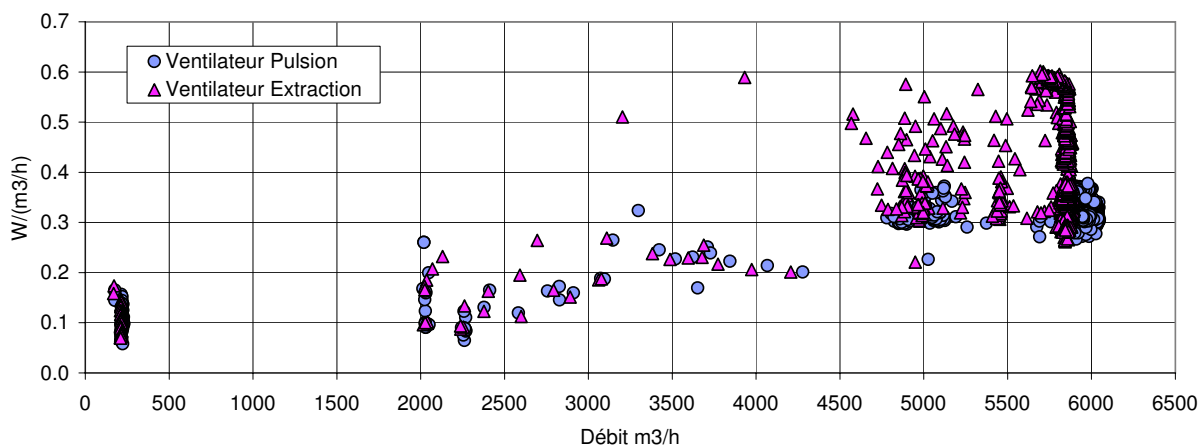


FIG. 3.11 – Consommation spécifique des ventilateurs du double-flux en fonction du débit (bypass fermés). Moyennes horaire. Mesures effectuées entre le 1er décembre 2006 et le 31 mai 2007.

Il est important de noter que le système a fonctionné en grande vitesse pendant quasiment toute la période de mesure des consommations électriques. C'est seulement à partir du 10 mai, soit trois semaines avant la fin des acquisitions, qu'il a retrouvé un fonctionnement normal en petite/grande vitesse. C'est d'ailleurs à cette même date que les filtres ont été remplacés.

La consommation spécifique des deux ventilateurs équipés de filtres neufs est de 0.15 W/(m³/h) en petite vitesse et de 0.3 W/(m³/h) en grande vitesse. On peut observer l'évolution de la consommation spécifique du ventilateur d'extraction à grande vitesse, qui est progressivement passé de 0.3 à 0.6 W/(m³/h) au fur et à mesure que le filtre s'obstruait. A noter que cette dernière valeur est associée à une perte de charge du filtre concerné de 480 Pa, valeur exceptionnellement haute sachant que les changements de filtres s'effectuent, en règle générale, entre 200 et 300 Pa.

Une campagne de mesure effectuée sur une dizaine d'installations similaires par Claude-Alain Roulet *et al.*[45] a révélé que la consommation spécifique moyenne de ces systèmes se situait entre 0.2 et 0.45 W/(m³/h). La performance des ventilateurs du double-flux est donc conforme à la moyenne des autres installations mesurées.

3.3.5.2 Obturation des filtres versus consommation électrique

La Figure 3.12 représente la consommation électrique des ventilateurs en fonction de la perte de charge des filtres respectifs. La régulation adapte la puissance électrique consommée par les ventilateurs en fonction des pertes de charge afin d'assurer un débit constant. La relation est linéaire⁴

⁴ $P_{pulsion} [W] = 1530 + 3.39 \Delta pf$ et $P_{extraction} [W] = 1659 + 3.61 \Delta pf$ (pertes de charge en Pa).

et peut être caractérisée par un rapport de l'ordre de 3.5 W par Pa.

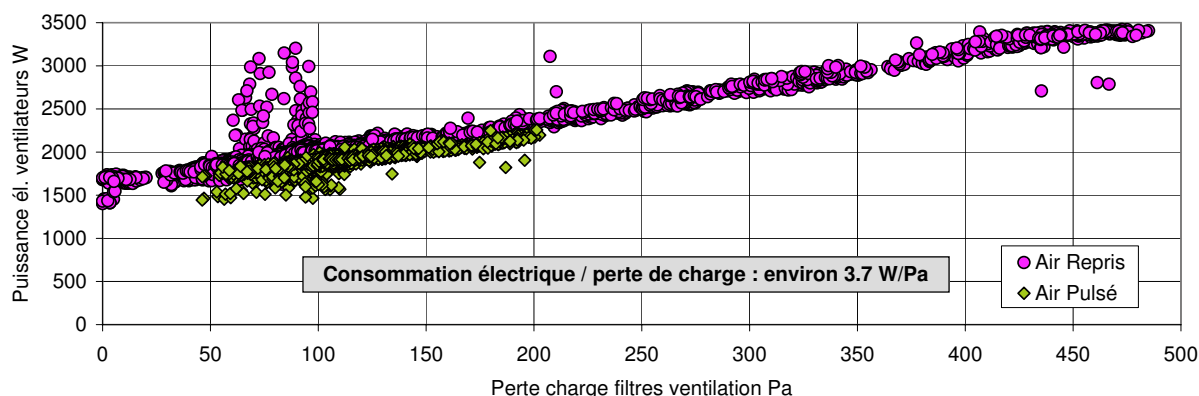


FIG. 3.12 – Consommation électrique des ventilateurs du double-flux en fonction de l'obstruction progressive des filtres (régulation à débit fixe). Valeurs horaires du 1er décembre 2006 au 31 mai 2007. Les surconsommations du ventilateur de l'air repris entre 50 et 100 Pa sont dues à des défauts de fonctionnement.

En considérant une obstruction linéaire des filtres de 200 Pa sur une année, la surconsommation électrique de chaque ventilateur serait de l'ordre de 3200 kWh/an, soit un quart de sa consommation annuelle. Avec un coût moyen de l'électricité de 22 centimes le kWh, le surcoût est d'environ 700 francs par an. Sachant que le coût d'un filtre neuf est de l'ordre de 200 à 400 francs, cet exemple met clairement en évidence l'importance d'avoir un suivi de qualité pour assurer une bonne performance économique et énergétique du système.

3.3.6 Coefficients de performance (COP)

Le coefficient de performance (COP) représente la quantité de chaleur fournie par un système pour chaque unité d'électricité consommée. La Figure 3.13 représente l'évolution du COP en fonction de la température extérieure pour les trois systèmes suivants : la ventilation à double-flux avec échangeur de chaleur, la pompe à chaleur en mode air-air (post-chauffage de l'air pulsé) et la pompe à chaleur en mode air-eau (appoint pour l'ECS).

3.3.6.1 Double-flux avec échangeur de chaleur

Le COP du système de double-flux est calculé en faisant le rapport entre la chaleur récupérée par l'échangeur et fournie aux logements, et l'électricité consommée par le ventilateur de pulsion. En effet, on considère que le système d'extraction d'air vicié fait partie des équipements standards installés dans tous les bâtiments neufs. L'association d'un réseau de pulsion et d'un échangeur de chaleur forme alors un système électro-thermique additionnel que l'on rajoute pour valoriser une partie des rejets thermiques et ainsi augmenter l'efficacité énergétique du bâtiment. Enfin, les points considérés pour cette analyse sont ceux pour lesquels les flux de pulsion et d'extraction traversent intégralement l'échangeur de chaleur (bypass de l'échangeur fermés).

Comme on peut le constater sur le graphique, il existe une grande dispersion des points de mesure. Celle-ci est due à l'obturation progressive du filtre de pulsion, dont la perte de charge résultante doit être compensée par une augmentation croissante de la consommation électrique du ventilateur

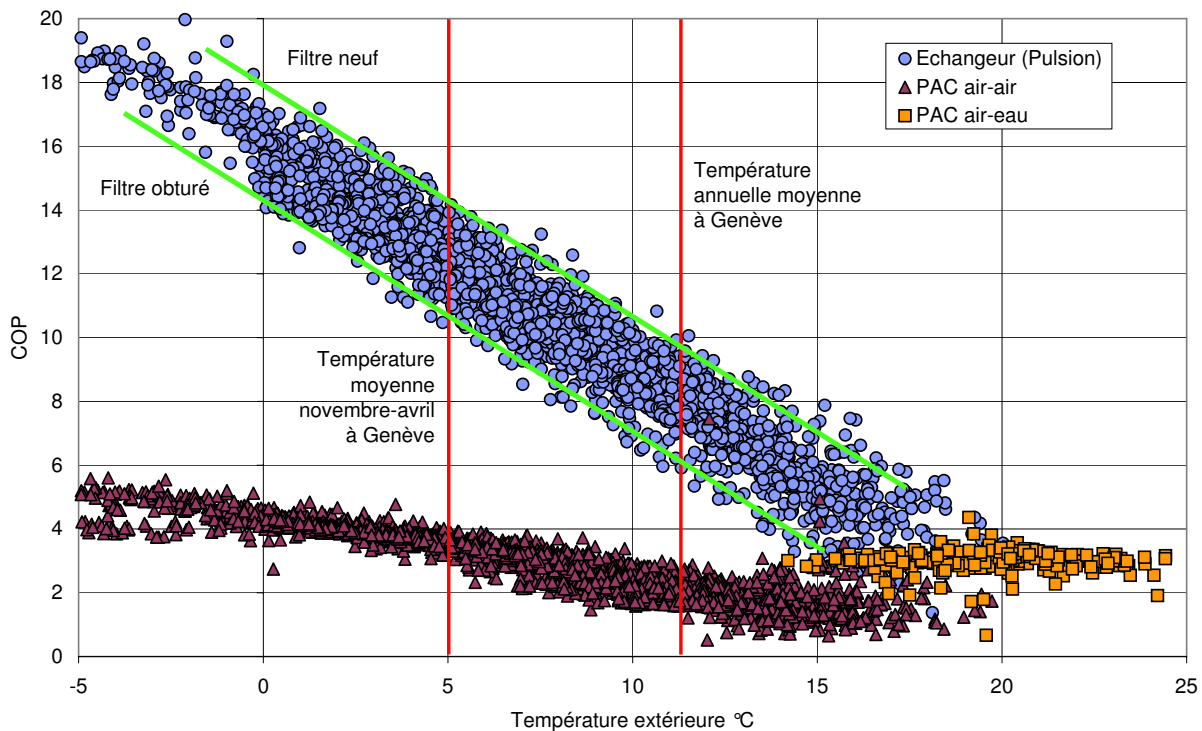


FIG. 3.13 – Coefficients de performance horaire de la ventilation à double-flux et de la pompe à chaleur en mode air-air et air-eau. Seul le ventilateur de pulsion est comptabilisé dans le calcul du COP pour le double-flux. Valeurs mesurées entre décembre 2006 et mai 2007. Sont représentées également les températures extérieures moyennes sur l'année et en période de chauffage (10 dernières années à Genève) ainsi que les limites du COP de l'échangeur en fonction de l'état du filtre.

afin de maintenir un débit constant. Les points du haut correspondent à une perte de charge d'environ 50 Pa (filtre neuf), et ceux du bas à environ 200 Pa. Ces 150 Pascals d'amplitude représentent une variation du COP de l'ordre de 4 unités.

La performance du système décroît linéairement avec la température extérieure. Une régression linéaire des mesures donne le résultat suivant :

$$COP_{Double-Flux} = (15.9 - 0.7 T_{ext}) \pm 1.6 \quad (3.9)$$

Lorsque la température extérieure est de 0 °C, une unité d'électricité consommée permet de produire 16 unités de chaleur. Une performance quatre fois plus élevée que celle de la pompe à chaleur en mode post-chauffage pour la même température. Le COP décroît ensuite de 0.7 unité par degré, mais il est encore supérieur à 5 à la température de non-chauffage de l'installation (15 °C).

Le concept énergétique du bâtiment amène le système de ventilation à double-flux à être exploité 365 jours par an. En période hivernale, il permet de valoriser les rejets thermiques dus à l'extraction d'air vicié. Pendant la période estivale, la pompe à chaleur sur air vicié fournit l'appoint nécessaire au solaire thermique pour garantir une production d'ECS indépendante des chaudières à gaz.

Bien que cette dernière prestation ne soit basée que sur l'exploitation du flux d'air extrait, la très bonne étanchéité du bâtiment impose également à la pulsion de fonctionner afin de ne pas mettre

les logements en dépression. Ce mode de fonctionnement confère à ce système un COP annuel moyen de 8, sachant que la température annuelle moyenne mesurée à Genève ces dix dernières années a été de 11 °C [38, 1996-2006].

L'arrivée des beaux jours favorisant l'ouverture des fenêtres et l'utilisation des balcons, est-il pertinent de continuer à pulser de l'air dans les logements en dehors de la période de chauffage ? Arrêter la pulsion d'air en même temps que le chauffage, entre mai et octobre, permettrait de baisser la consommation électrique de 5 MJ/m².an. De plus, la température moyenne extérieure étant de 5 °C pendant la période de chauffage [38, 1996-2006], la performance du système augmenterait de 50% pour atteindre un COP de 12, ce qui permettrait également d'avoir une bien meilleure valorisation de l'énergie électrique consommée.

Il est évident que la mise en place d'une telle gestion de la ventilation nécessite l'intégration dans l'enveloppe d'un système permettant de modifier le taux d'étanchéité de celle-ci. Un concept de ventilation alterné hiver/été permettrait d'augmenter la performance du système.

3.3.6.2 Pompe à chaleur

Le COP de la pompe à chaleur est calculé en faisant le rapport entre la chaleur fournie par le condenseur et l'électricité consommée par le compresseur.

Sa performance en mode air-air (post-chauffage de l'air pulsé) décroît linéairement avec la température extérieure. Ceci est dû au fait que la température de la source chaude - la sortie de l'échangeur de chaleur - varie linéairement avec la température extérieure. Une régression linéaire des mesures donne le résultat suivant :

$$COP_{PAC\ air-air} = (4.4 - 0.2 T_{ext}) \pm 0.7 \quad (3.10)$$

Une utilisation uniquement en période de chauffage lui permettrait d'atteindre un COP moyen de 3.4 (température extérieure moyenne de 5 °C).

En mode air-eau (appoint de l'ECS), le COP vaut environ 3 et est relativement constant. La PAC est pilotée en fonction de l'écart de température entre deux niveaux de la cuve de stockage. C'est la faible variation de cet écart de température qui lui confère cette stabilité du coefficient de performance.

3.3.7 Efficacité de l'échangeur de chaleur

L'efficacité de l'échangeur de chaleur, ou son taux de récupération, est caractérisée par la relation suivante :

$$\eta = \frac{T_{pulsion} - T_{ext}}{T_{reprise} - T_{ext}} \quad (3.11)$$

où $T_{pulsion}$ est la température à la sortie de l'échangeur, $T_{reprise}$ la température de retour des logements et T_{ext} la température de l'air neuf (air extérieur). Les valeurs horaires du taux de récupération au débit nominal (>5800 m³/h) sont représentées dans la Figure 3.14.

L'efficacité moyenne mesurée de récupération est de 65%. Une des sondes utilisées pour ce calcul n'a pas été étalonnée par nos soins. Une erreur sur la valeur absolue de celle-ci de ± 0.5 °C engendre une variation de ± 4% du résultat. On peut donc estimer que le taux de récupération réel se

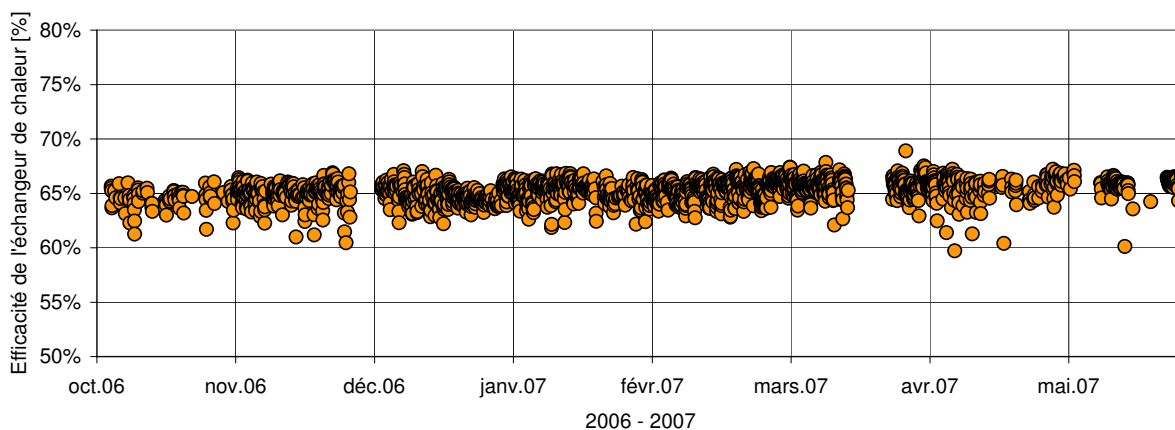


FIG. 3.14 – Efficacité de récupération de l'échangeur de chaleur. Moyennes horaires au débit nominal ($>5800 \text{ m}^3/\text{h}$) sans bypass de l'échangeur.

situe entre 60 et 70%.

Les logements sont en légère surpression afin d'éviter les infiltrations d'air froid. La pulsion est environ $100 \text{ m}^3/\text{h}$ plus élevée que l'extraction. Cette différence de débit représente moins de 2% d'écart par rapport à l'équilibre des flux et a donc un effet marginal sur le taux de récupération mesuré.

Le résultat mesuré est un peu inférieur à la valeur annoncée par le fabricant qui donne une efficacité de l'échangeur de 75% à l'équilibre des flux. De plus, la valeur annoncée dans le justificatif Minergie était de 80%. Cette surestimation des performances du système s'est naturellement traduite par une demande en chauffage plus élevée que prévue.

3.4 Chaudières à gaz et conduites à distance (CAD)

3.4.1 Bilan énergétique

Le bilan énergétique des chaudières à gaz et de la conduite à distance (CAD) est représenté à la Figure 3.15.

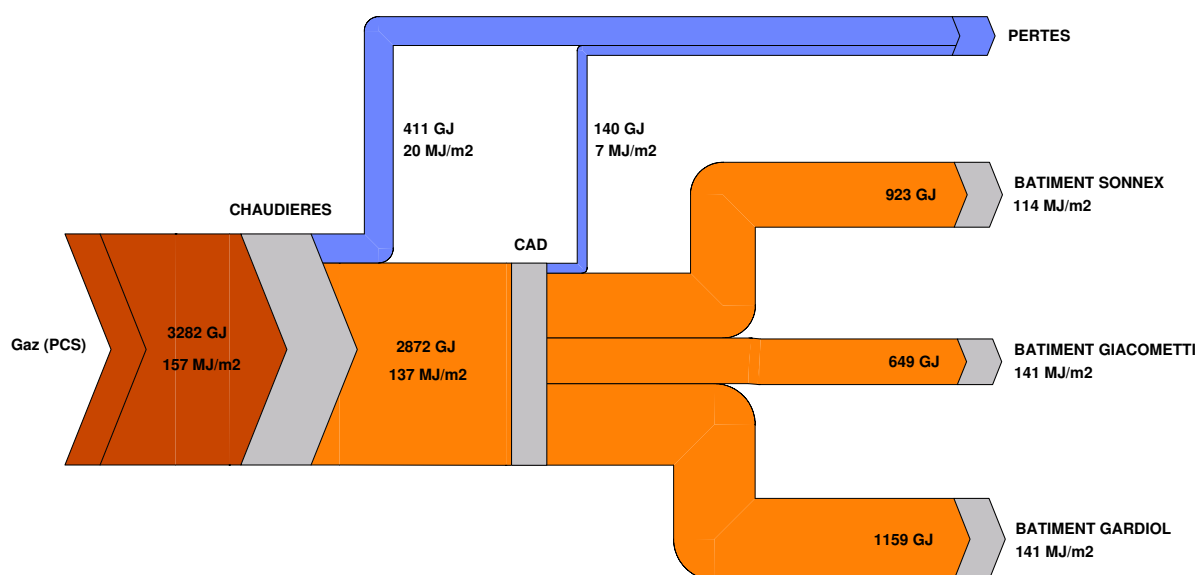


FIG. 3.15 – Bilan énergétique du gaz pour l'ensemble du complexe locatif du 1er juin 2006 au 31 mai 2007. Les valeurs concernant le gaz, le départ CAD, le bâtiment Giacometti et la première sous-station Sonnex sont issues des mesures CUEPE. Les autres données proviennent des compteurs de chaleur installés dans les sous-stations.

Le rendement annuel du système composé des deux chaudières en parallèle est de 87.5% (PCS). Les pertes annuelles de distribution du chauffage à distance sont de l'ordre de 5%. En raison de la proximité entre la sous-station Giacometti et les chaudières, ces pertes peuvent être réparties de manière égale entre les deux autres bâtiments, soit 9 MJ/m² pour le bâtiment Sonnex et 9 MJ/m² pour le bâtiment Gardiol, exprimés en fonction de la SRE de chacun.

L'indice de gaz rapporté à chaque bâtiment montre que les consommations des bâtiments Giacometti et Gardiol sont identiques avec 141 MJ/m², alors que le bâtiment Sonnex ne consomme que 114 MJ/m². La différence provient, dans une grande mesure, du fait qu'un étage entier est resté inhabité pendant toute la période de mesure.

3.4.2 Rendement des chaudières

Le CAD est alimenté par deux chaudières à gaz à condensation d'une puissance de 250kW chacune. Elles travaillent en parallèle et chacune peut moduler indépendamment sa puissance, ce qui permet au système de travailler dans un registre allant de 25kW à 500kW.

Les mesures ont été effectuées sur l'arrivée commune de gaz et sur le départ du CAD. Les résultats de ces mesures représentent donc le comportement d'un système composé des deux chaudières et de leur régulation, et non pas les caractéristiques propres des chaudières elles-mêmes.

3.4.2.1 Rendement dynamique moyen

Le graphique de gauche de la Figure 3.16 représente la puissance calorifique horaire fournie par les chaudières en fonction de l'énergie chimique du gaz au pouvoir calorifique supérieur (PCS). Chaque point correspond à un fonctionnement du circulateur de 60 minutes par heure, avec 15 minutes de fonctionnement avant et après la période sélectionnée. La diagonale tracée sur le graphique représente une conversion de 100%.

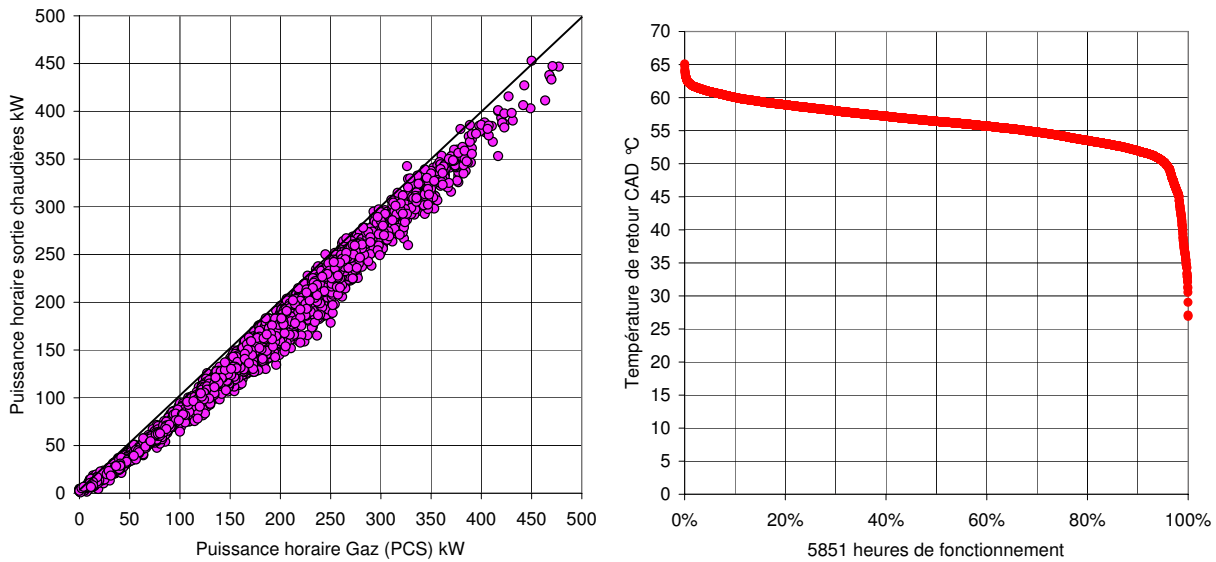


FIG. 3.16 – Gauche : Puissance calorifique horaire fournie par les chaudières en fonction de l'énergie chimique du gaz au pouvoir calorifique supérieur (rendement dynamique moyen). Droite : Températures classées du retour CAD.

Une régression linéaire des points avec origine à zéro met en évidence un rendement dynamique moyen du groupe de chaudières de 89% (PCS). La température moyenne de retour du CAD a été de 56°C et le taux de charge moyen de 27%, soit l'équivalent d'une seule chaudière fonctionnant à 54%. Pour ces paramètres de fonctionnement, le constructeur prévoit un rendement de chaudière d'environ 98% au pouvoir calorifique inférieur (PCI), ce qui correspond à 88% de rendement au PCS. La performance des chaudières correspond bien aux caractéristiques annoncées par le constructeur.

Le processus de condensation, qui permet de récupérer l'énergie latente contenue dans la vapeur d'eau issue de la combustion, ne commence à se produire que pour des températures de retour du fluide caloporteur situées en dessous du point de rosée des fumées. Ce point se situe, selon les caractéristiques données par le constructeur, entre 54°C et 58°C en fonction de la charge de la chaudière. Or, comme on peut l'observer sur le graphique de droite de la Figure 3.16, sur les 5851 heures de fonctionnement observées, les températures de retour du CAD ont été supérieures à 54°C pendant les 75% du temps. Il existe donc un potentiel d'amélioration du rendement de l'installation de plusieurs points en réduisant la température de ce retour. En effet, chaque baisse de 4°C de la température du retour augmente le rendement d'un peu plus de 1% [23, page 87].

3.4.2.2 Rendement quotidien et taux de charge horaire

Le graphique de gauche de la Figure 3.17 représente le rendement quotidien de l'ensemble des deux chaudières en fonction du taux de charge. Celui-ci est défini comme étant le rapport entre la puissance thermique moyenne fournie par les deux chaudières et la puissance totale disponible, soit 500kW. Par équivalence, les taux de charge entre 0 et 50% correspondent au fonctionnement d'une seule chaudière entre 0 et 100%.

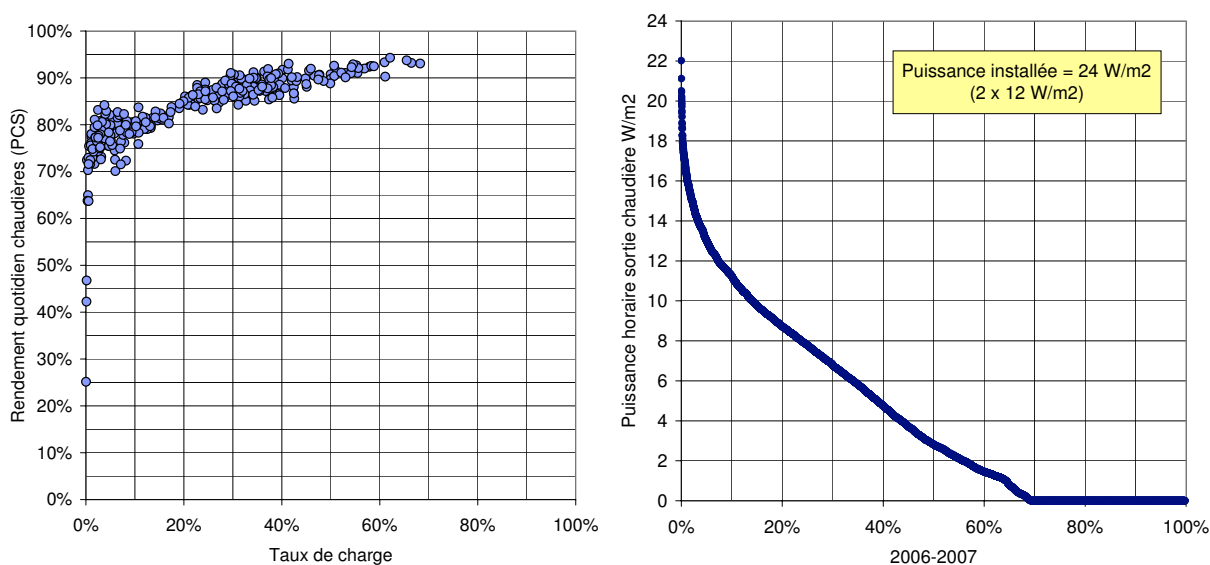


FIG. 3.17 – Gauche : Rendement quotidien des chaudières en fonction du taux de charge. Rendement calculé au PCS du gaz. Droite : Puissances horaires spécifiques des chaudières classées (8760 points).

Ce rendement quotidien intègre tous les effets dynamiques dûs aux cycles de marche/arrêt des chaudières. On peut observer qu'un rendement journalier moyen de 85% est atteint lorsque le taux de charge dépasse 20%. Un rendement de 90% est atteint lorsque la charge dépasse les 50%, soit l'équivalent d'une seule chaudière fonctionnant à 100%.

Une chaudière du même modèle et d'une puissance légèrement inférieure (200 kW) à celles du Pommier, a fait l'objet d'une analyse similaire lors du suivi énergétique de la cité solaire de Planles-ouates [23, pages 85 à 90]. Le rendement quotidien de cette chaudière dépassait les 90% dès que le taux de charge était supérieur à 20%. Cette meilleure performance est principalement due à une température de retour beaucoup plus basse, se situant entre 25°C et 55°C. Son rendement dynamique moyen était de 90% (PCS), similaire à celui des deux chaudières du Pommier.

Le graphique de droite de la Figure 3.17 représente les puissances horaires spécifiques des chaudières classées (8760 points). La puissance installée est de 24 W/m² (deux fois 12 W/m²). On peut observer que, pour cette saison 2006-2007, 93% de la demande annuelle aurait pu être couverte par une seule des deux chaudières. Il faut cependant rappeler que l'hiver 2006-2007 a été particulièrement doux.

3.5 Enveloppe thermique

3.5.1 Mesure des coefficients U de l'enveloppe

Une mesure ponctuelle de la performance de certains éléments de l'enveloppe a été effectuée. Nous avons mesuré le coefficient U d'un élément de façade bois de l'enveloppe nord-est ainsi que celui du double vitrage situé sur la même façade. Les éléments de la façade sud-ouest ont également fait l'objet d'une mesure mais une défaillance du matériel ne nous a pas permis d'interpréter les résultats.

Les mesures ont été réalisées entre le 21 février et le 1er mars 2005 dans l'appartement numéro 52 du bâtiment Giacometti. La Figure 3.19 illustre l'emplacement et le détail des éléments mesurés. Un fluxmètre a été posé sur la surface intérieure de l'élément. Cet élément permet de mesurer le flux de chaleur qui le traverse (positif ou négatif). Deux sondes de température ont été installées : une première à l'intérieur de la pièce et une seconde à l'extérieur.

Ces mesures permettent de déterminer le coefficient U dynamique de l'élément, exprimé en W/m^2K , qui inclut les effets d'inerties de ce dernier. Le coefficient U statique nécessite l'intégration des mesures sur un temps qui dépend de l'inertie de l'élément mesuré et de la précision demandée. Typiquement, pour une précision recherchée de 10%, le temps d'intégration sera de l'ordre de quelques heures pour un vitrage et de quelques jours pour un mur massif [46].

La graphique du haut de la Figure 3.20 illustre les mesures réalisées sur l'élément de façade bois. Un flux positif correspond à de la chaleur qui traverse l'élément de l'intérieur vers l'extérieur. Les variations que l'on peut observer sur la température intérieure et le flux de chaleur indiquent très certainement une ouverture nocturne de la fenêtre. Ces variations, couplées à l'inertie thermique de l'élément de façade, conduisent à un coefficient U dynamique qui oscille entre -0.1 et 0.7 W/m^2K (graphique du bas). L'intégration des mesures sur plusieurs jours donne un coefficient U statique de 0.22 W/m^2K . Cette valeur correspond bien à la performance prévue de l'élément (0.21 W/m^2K) tel que le montre le calcul de la Figure 3.18.

Calcul valeur U - élément(s) opaque(s)

Nom composant	Façade bois			
Nom composant				
Couches	densité [kg/m ³]	lambda [W/mK]	épaisseur [cm]	Rsi
Panneau carton-plâtre	900	0.210	1.3	0.062
Panneau carton-plâtre	900	0.210	1.3	0.062
Fibres de cellulose, en vrac	55	0.042	18.0	4.286
Panneau cellulose-plâtre	900	0.210	1.3	0.062
Bardage (Bois, Eternit, Pierre) ventilé	0	0.375	3.0	0.080
			Epaisseur totale [cm]	0.04
				Rse
Résistance totale R [m²K/W]				4.72
Valeur U = 1/R [W/m²K]				0.21

FIG. 3.18 – Calcul du coefficient U des éléments de façade bois de l'enveloppe nord-est (EnerCad).

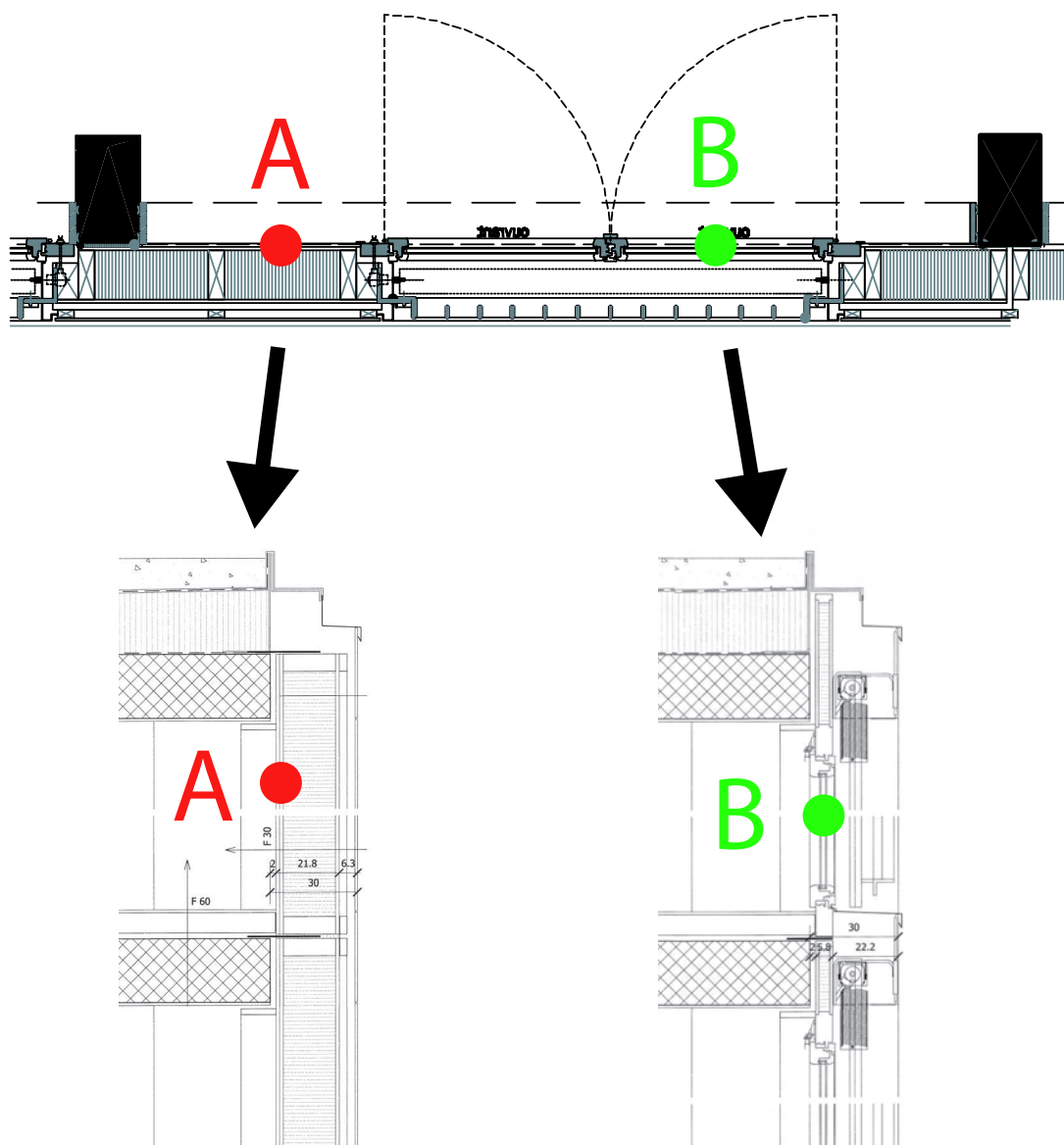


FIG. 3.19 – Emplacement et détail des éléments de l’enveloppe nord-est dont le coefficient U a été mesuré. A : élément de façade bois, B : double vitrage.

La Figure 3.21 illustre les mesures réalisées sur le double vitrage (haut) et le résultat concernant le coefficient U dynamique (bas). En plus de l’ouverture nocturne probable de la fenêtre, la position du store influence également le flux de chaleur à travers le vitrage, deux paramètres que nous ne maîtrisons pas et qui rendent les résultats difficiles à interpréter. Nous aurions dû demander aux locataires de relever les conditions d’utilisation ou alors leur donner des consignes à suivre le temps des mesures. On peut cependant tirer de ces mesures une conclusion positive. En effet, la valeur de pointe du coefficient U dynamique ne dépasse pas $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Cela signifie que la valeur statique est très certainement inférieure à la performance annoncée par le fabricant de $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

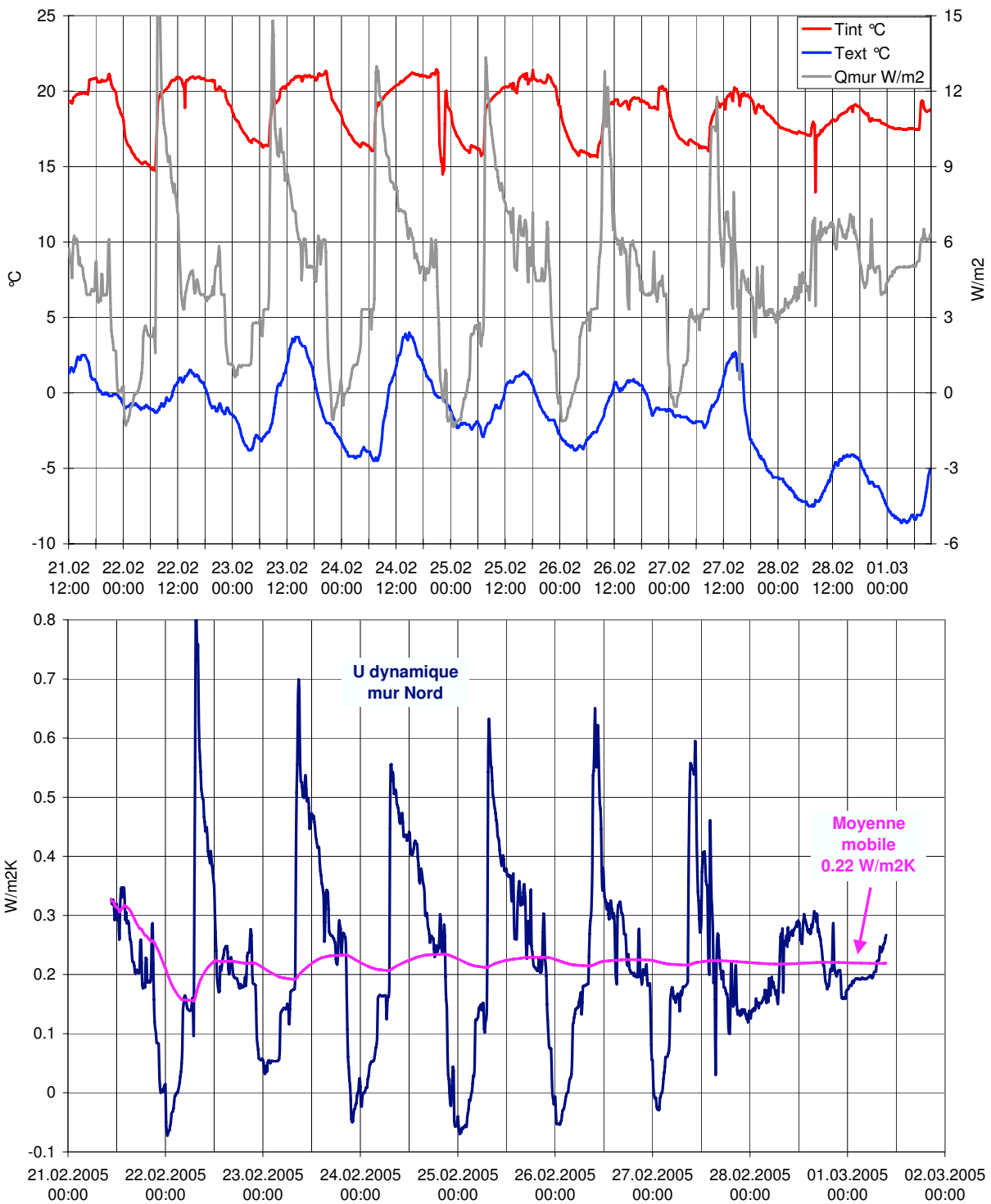


FIG. 3.20 – Mesure du coefficient U d'un élément de façade bois de l'enveloppe nord est effectuée entre le 21 février et le 1er mars 2005 (appartement no 52, bâtiment Giacometti). Haut : températures intérieure, extérieure et flux de chaleur. Bas : coefficient U dynamique et moyenne mobile.

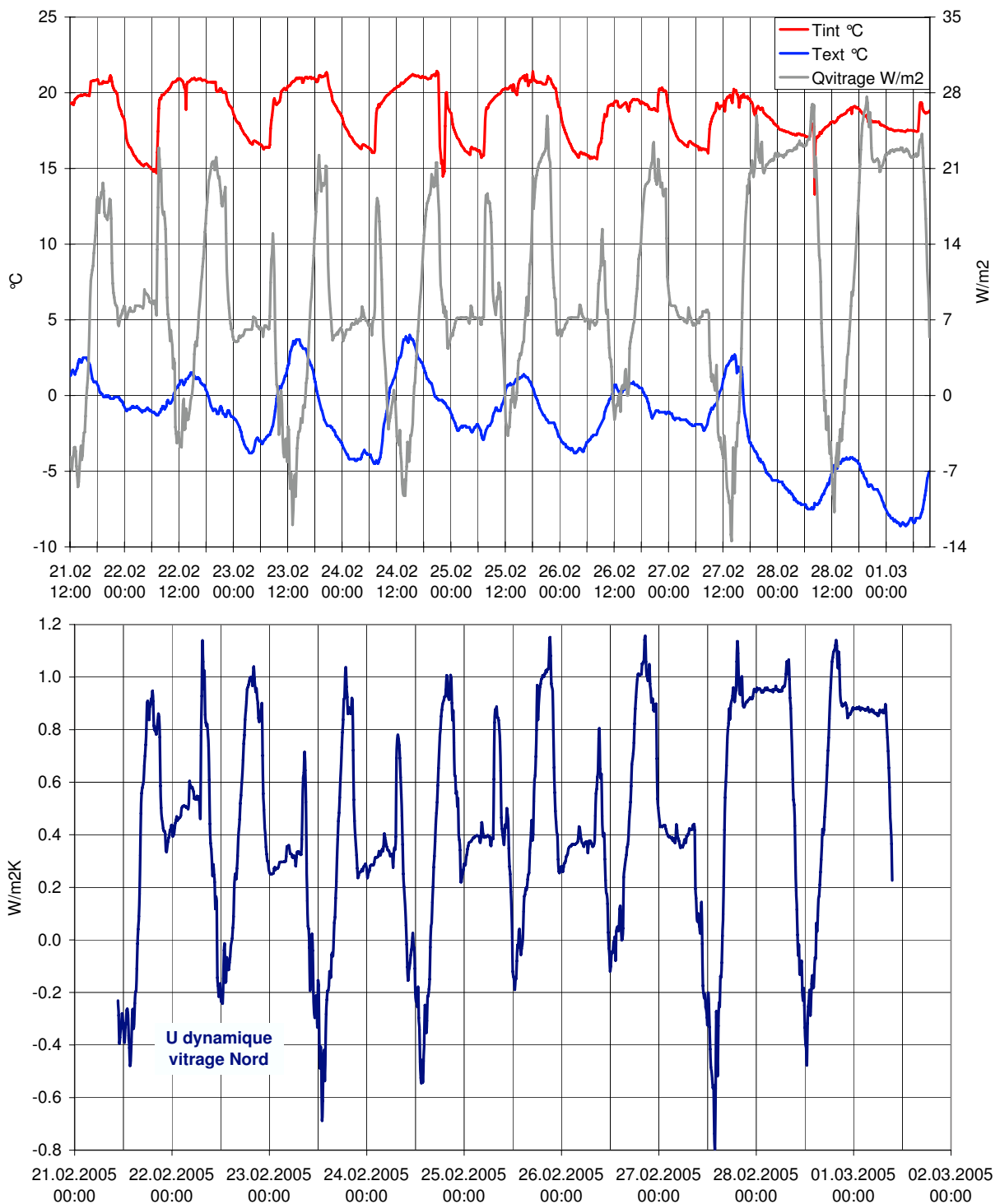


FIG. 3.21 – Mesure du coefficient U du double vitrage nord-est effectuée entre le 21 février et le 1er mars 2005 (appartement no 52, bâtiment Giacometti). Haut : températures intérieure, extérieure et flux de chaleur. Bas : coefficient U dynamique.

3.5.2 Analyse thermographique

Un relevé thermographique de l'enveloppe du bâtiment Giacometti a été réalisé par l'Ecole d'ingénieurs de Genève [47]. Les mesures ont été effectuées entre 6h et 7h du matin le 13 février 2008. La température extérieure était de -2°C .

Les prises de vue infrarouge ont été réalisées avec une émissivité uniforme de 0.95. Les images obtenues ainsi permettent uniquement de mettre en évidence les faiblesses de l'enveloppe de manière qualitative. En effet, il est nécessaire de corriger les différences d'émissivité des matériaux pour pouvoir analyser les températures de surface. L'analyse qualitative des images n'ayant pas montré de faiblesse particulière de l'enveloppe, nous n'avons pas approfondi l'examen. Voici, ci-dessous, quelques images choisies et commentées.

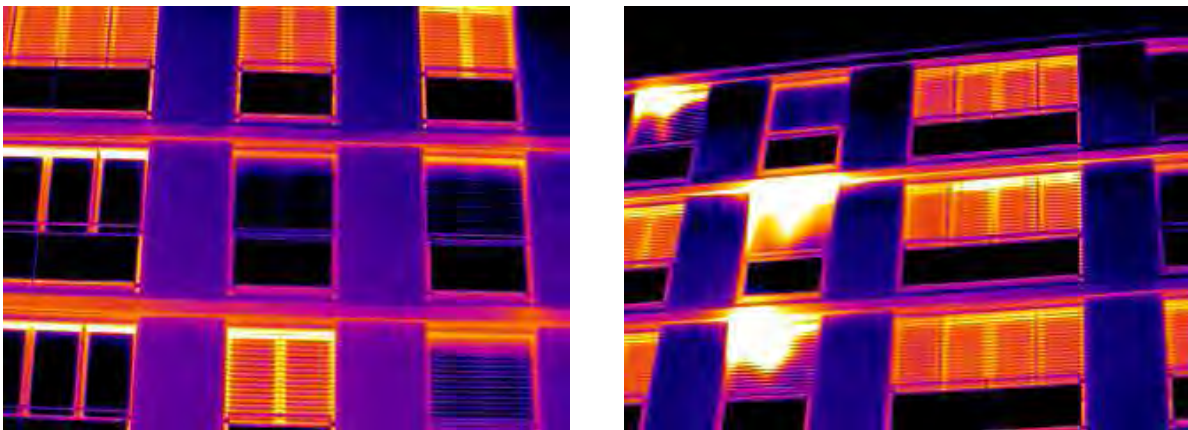


FIG. 3.22 – Thermographie non-traitée du bâtiment Giacometti, façade nord-est.

L'image de gauche de la Figure 3.22 met en évidence la relative faiblesse des cadres par rapport aux vitrages mais aussi des limites de ces images. En effet les vitrages (noir) ont certainement une température de surface plus élevée que les stores (rouge). Sur l'image de droite, les trois taches blanches représentent des fenêtres ouvertes, en plein hiver.

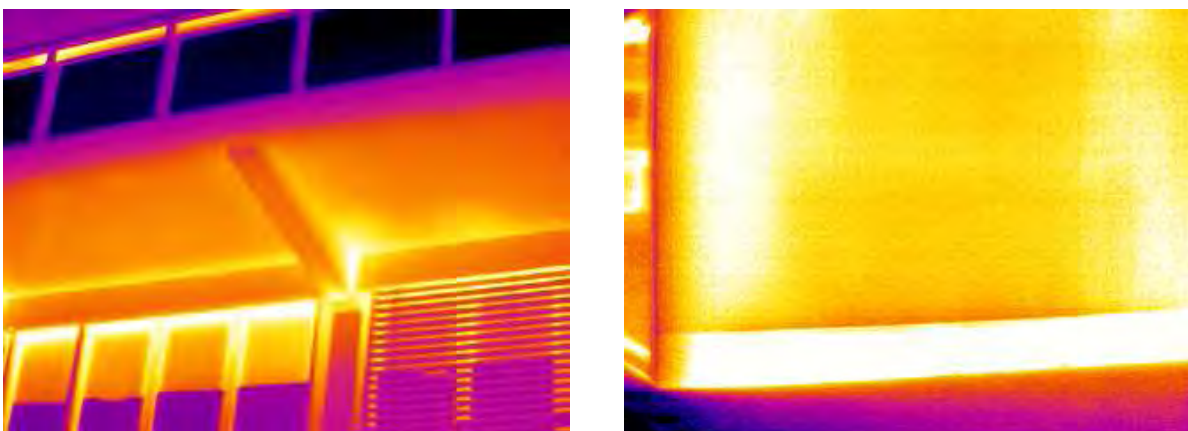


FIG. 3.23 – Thermographie non-traitée du bâtiment Giacometti. Gauche : console façade sud-ouest. Droite : pignon nord-ouest.

L'image de gauche de la Figures 3.23 montre que l'utilisation de consoles pour porter le balcon a permis de limiter les ponts thermiques aux attaches des consoles et aux assemblages des éléments (caisson de store). L'image de droite met en évidence les différences d'épaisseur de l'isolation située derrière les poteaux.

3.6 Conclusions

Les capteurs solaires thermiques se comportent de manière assez fidèle aux caractéristiques mesurées en laboratoire. L'installation dans son ensemble donne entière satisfaction.

L'exploitation optimale de la ventilation à double-flux requière un suivi de qualité (suivi des programmes petite-grande vitesse, obturation des filtres, maintenance de la pompe à chaleur, etc). Le fonctionnement du double-flux en période estivale est superflu dans un bâtiment comme celui-ci et un mode de fonctionnement hiver/été permettrait d'augmenter la performance annuelle du système. Le taux de récupération de chaleur mesuré est inférieur aux caractéristiques annoncées dans le justificatif Minergie.

La performance des chaudières à gaz modulantes est conforme aux données du fabricant.

L'enveloppe thermique ne présente pas de faiblesse particulière. La performance des éléments mesurés correspond à la performance calculée lors du projet.

Chapitre 4

Confrontation des résultats avec les objectifs énergétiques

4.1 Introduction

Le calcul prévisionnel de consommation énergétique, étape nécessaire à l'obtention de l'autorisation de construire, est effectué en conditions standards d'utilisation. La température des logements, le taux de renouvellement d'air, la consommation d'ECS, etc, sont des valeurs figées et bien définies. Durant sa phase d'exploitation, le comportement réel du bâtiment et de ses occupants, qui peut fortement différer des conditions standards, va se refléter directement dans sa consommation énergétique. Dès lors, il est évident que la comparaison directe du calcul standard et des mesures en exploitation est peu pertinente. Un ajustement de l'une ou l'autre des valeurs est donc nécessaire pour comparer l'objectif et la réalité.

Ce chapitre présente les objectifs énergétiques calculés en conditions standards et les résultats obtenus. La demande de chaleur est ensuite calibrée aux conditions réelles de fonctionnement en intégrant les mesures et observations effectuées dans le cadre de cette étude. Finalement, le bilan calibré est normalisé et comparé avec l'objectif initial.

La période de référence choisie pour effectuer les bilans et analyses va du 1er juin 2006 au 31 mai 2007. La méthode utilisée pour la correction climatique des mesures est décrite à l'annexe C.

4.2 Bilan énergétique calculé versus mesuré

La Figure 4.1 représente la consommation énergétique calculée en conditions standards ainsi que le résultat des mesures effectuées pour les trois premières saisons de chauffage (avec correction climatique).

La consommation calculée était de 92 MJ/m²an de gaz (PCS) et de 35 MJ/m²an d'électricité pour le fonctionnement du monobloc de ventilation double-flux ainsi que de la pompe à chaleur.

L'indice énergétique du premier hiver est de 254 MJ/m²an. Il baisse ensuite progressivement au cours des deux hivers suivants pour atteindre 193 MJ/m²an la troisième année. La consommation électrique des sous-systèmes électrothermiques (monobloc de ventilation double-flux et pompe à chaleur sur air vicié) est assez fidèle aux calculs prévisionnels.

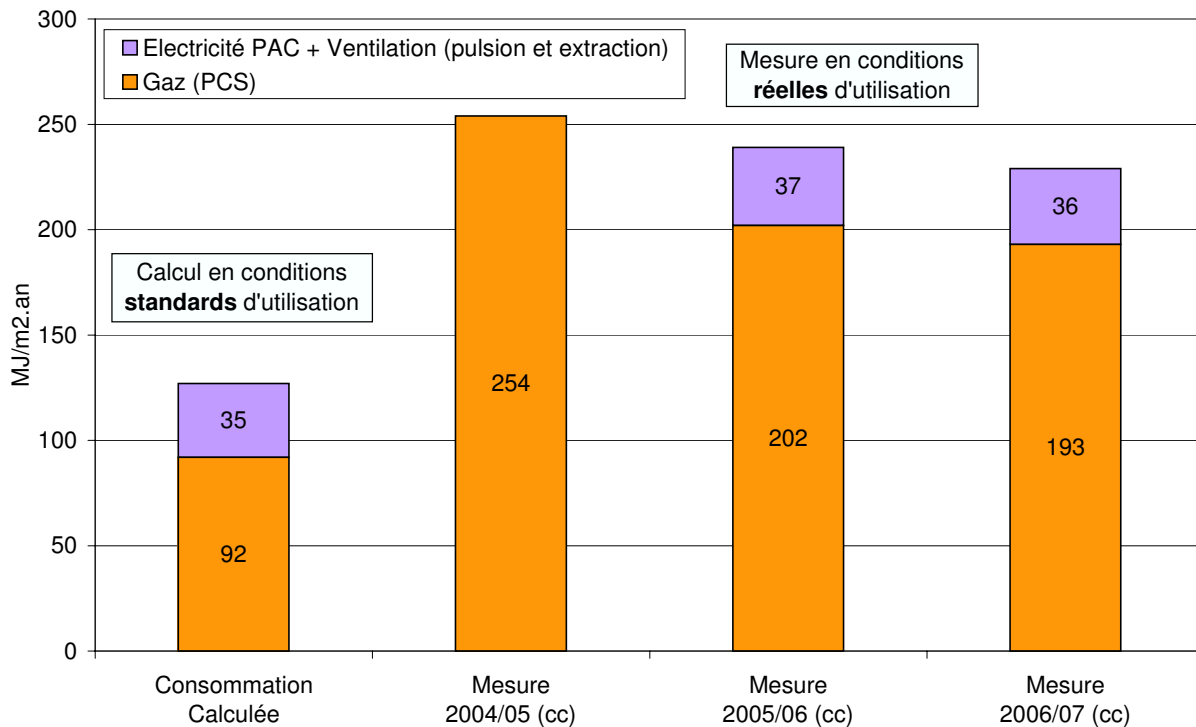


FIG. 4.1 – Comparaison entre la consommation énergétique calculée en conditions standards du bâtiment Giacometti et les mesures effectuées entre 2004 et 2007 (avec correction climatique). Mesure électrique non disponible pour l’hiver 2004/05.

La décroissance de la consommation énergétique provient essentiellement du séchage de la structure et des optimisations apportées aux systèmes techniques.

4.3 Bilan thermique calculé versus mesuré

La Figure 4.2 présente le bilan thermique calculé en conditions standards et mesuré lors de la saison 2006/07.

La demande de chaleur calculée lors du dimensionnement du projet s’élève à 87 MJ/m²an pour l’eau chaude sanitaire (ECS) et à 53 MJ/m²an pour le chauffage. Ce calcul intègre une prestation thermique de la ventilation à double-flux de 80 MJ/m²an. La production est assurée à hauteur de 25 MJ/m²an par l’installation solaire thermique, 35 MJ/m²an par la pompe à chaleur et 80 MJ/m²an par les chaudières à gaz au travers des conduites à distance.

4.3.1 Demande

La demande de chauffage est de toute évidence à l’origine des écarts de consommation. Avec 130 MJ/m²an observés contre 53 MJ/m²an calculés, elle est environ 2.5 fois plus élevée pour 2006/07 et environ 3 fois plus élevée pour un hiver normalisé. L’analyse des causes à l’origine de ce dépassement fait l’objet de la section suivante.

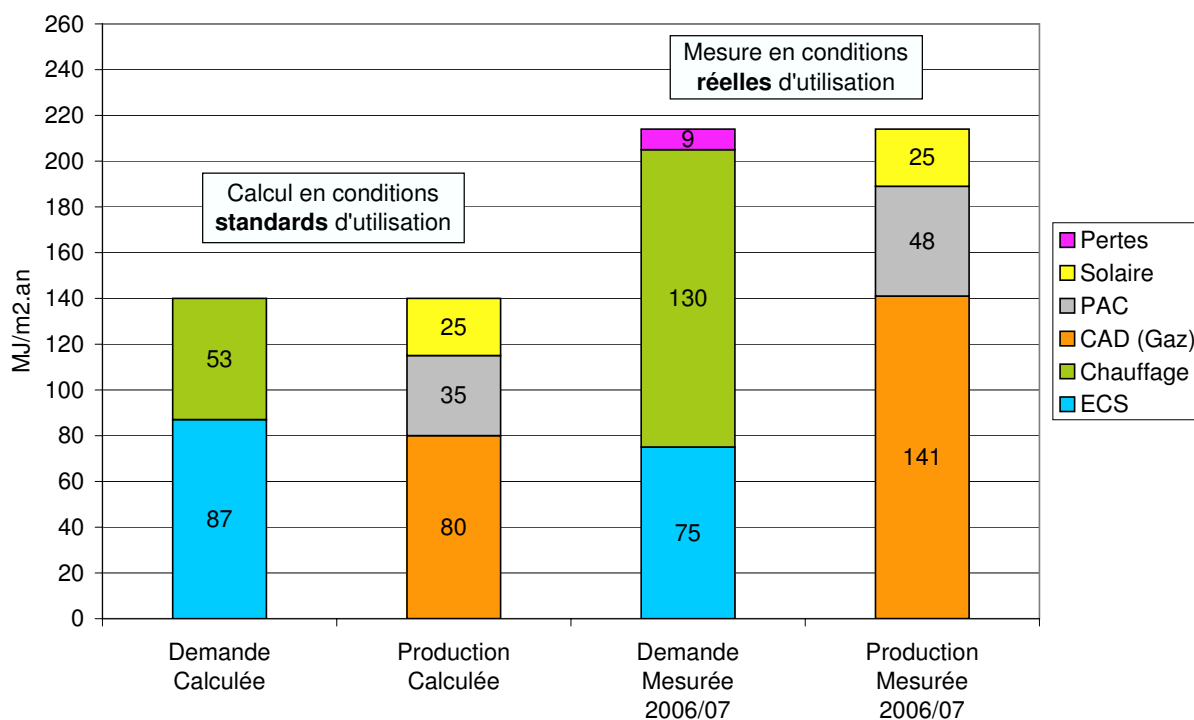


FIG. 4.2 – Demande et production de chaleur calculées en conditions standards d'utilisation et mesurées pendant l'hiver 2006/07. La demande de chauffage inclut la prestation thermique du récupérateur de chaleur. Il n'y a pas de correction climatique et cette saison a été particulièrement clémente.

La demande en eau chaude sanitaire (ECS) mesurée est environ 14% plus basse que prévue, avec 75 MJ/m²an observés contre 87 MJ/m²an calculés. Les habitants de ces logements consomment-ils moins d'eau chaude que la moyenne des usagers ? Probablement pas, comme semblent le montrer les résultats de la deuxième partie de ce travail (voir la section 7.3.3, page 134).

En effet, si l'on émet l'hypothèse que la consommation d'ECS est une fonction des usagers et non de la surface chauffée, alors la consommation par unité de plancher décroît avec la taille des pièces. Or, les appartements du Pommier sont effectivement plus spacieux que les constructions standards, avec une surface moyenne de 28 m² SRE par pièce, contre 21 à 25 m² SRE usuellement. Tout porte à croire qu'il ne s'agit que d'une baisse apparente de la consommation liée au choix de l'indicateur utilisé. Un indicateur tel que les MJ/pièce.an serait probablement plus adéquat que les MJ/m²an pour calculer et prévoir les consommations en ECS.

4.3.2 Production

Les systèmes de production de chaleur ont atteint leur objectif. L'installation solaire thermique a produit l'intégralité des 25 MJ/m²an prévus pour le pré-chauffage de l'ECS. La pompe à chaleur a fourni 39 MJ/m²an à l'air pulsé dans les logements et a injecté 9 MJ/m²an dans la cuve de stockage en majorité dédiés à la production estivale de l'ECS. Le solde énergétique a été fourni par le gaz qui a délivré 141 MJ/m²an de chaleur au lieu des 80 MJ/m²an prévus à travers les conduites à distance.

4.4 Demande de chauffage en conditions réelles d'utilisation

4.4.1 Valeurs observées versus conditions standards

Les différents paramètres de conception et d'exploitation ayant une influence directe sur la consommation de chauffage ont été analysés en détail. Les écarts entre les conditions standards et les observations ont ensuite été intégrés dans le fichier de calcul original (EnerCad) pour quantifier leur impact sur la demande de chaleur. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.1 et discutés ci-dessous.

Paramètre	Calcul initial	Nouveau calcul	$\approx \Delta Qh$ MJ/m ² an
Température des logements [°C]	20	22.5	+33
Ponts thermiques	partiel	complet	+20
Efficacité du récupérateur de chaleur [%]	80	65	+12
Gains internes électriques [MJ/m ² an]	100	76	+8
Taux de renouvellement d'air [m ³ /h/m ²]	0.7	1.12	+6
Coefficient U des vitrages Nord [W/m ² K]	0.8	1.0	+5
Conditions de calcul	MO 1993	SIA 2001	+4
Climat	Standard GE	Mesuré 06/07	-45
ΔQh total observé			+43
Ventilation naturelle (fenêtres ouvertes) [vol/h]	0	0.1	+19
Facteur de voilage (protections extérieures)	0	0.3	+10
ΔQh total considéré			+72

TAB. 4.1 – Différences observées entre les valeurs prévues et mesurées qui influencent la demande de chauffage et estimation de leur impact sur la demande.

Ce Tableau comprend des effets mesurés, listés dans la première partie du Tableau, et des effets estimés listés dans la seconde partie. L'augmentation totale de chaleur considérée est de 72 MJ/m²an par rapport aux conditions standards d'utilisation. Il en résulte une demande de chauffage en conditions réelles d'utilisation de 125 MJ/m²an (valeur mesurée : 130 MJ/m²an).

4.4.2 Description des paramètres d'influences

4.4.2.1 Température des logements

La température moyenne des logements mesurée pendant la période de chauffage est plus élevée de 2.5°C que la température de référence utilisée pour les calculs (20°C). Cet écart induit une augmentation de la demande de chaleur de 33 MJ/m²an, soit environ 15 MJ/m²an de gaz par degré. Exprimé en fonction de l'indice de gaz calculé en conditions standards (92 MJ/m²an), chaque degré supplémentaire représente une augmentation de 16% de la consommation.

4.4.2.2 Pont thermiques

Dans la première version du logiciel utilisé (EnerCad), l'intégralité des ponts thermiques dus aux intercalaires et aux raccords des fenêtres n'étaient pas pris en compte. L'intégration de ces ponts thermiques représente 20 MJ/m²an supplémentaires.

4.4.2.3 Efficacité du récupérateur de chaleur

Le monobloc de ventilation double-flux contient un récupérateur de chaleur. Son efficacité annoncée dans le justificatif Minergie était de 80%. Les mesures ont montré que cette efficacité n'était que de 65%. La différence représente 12 MJ/m²an de consommation supplémentaire.

4.4.2.4 Gains internes électriques

La consommation des appareils électriques situés à l'intérieur de la zone chauffée est estimée à 100 MJ/m²an en conditions standards (SIA). La consommation des logements mesurée n'est que de 63 MJ/m²an, auxquels nous avons rajouté les 2/3 de la consommation des services généraux, soit un total de 76 MJ/m²an. Cette consommation électrique plus faible que prévue diminue les apports internes et augmente la demande de chauffage de 8 MJ/m²an. Un ordre de grandeur confirmé par l'étude de Tommerup et al. [25].

Comment expliquer cette différence de la consommation électrique ? Premièrement, il est très probable que l'hypothèse formulée pour l'eau chaude sanitaire s'applique également au taux d'équipement en appareils électriques : ce taux est certainement aussi une fonction des usagers et non de la surface chauffée. Les déperditions thermiques de ces appareils sont donc diluées dans une plus grande surface chauffée, ce qui engendre une baisse proportionnelle des gains thermiques associés.

Deuxièmement, dans un esprit de cohérence par rapport à la qualité énergétique de l'ouvrage, le maître d'ouvrage a décidé d'équiper tous les logements d'appareils électroménagers de classe A. En réduisant les déperditions thermiques de ces appareils, ce choix contribue directement à une augmentation de la demande de chauffage. L'installation de matériel plus performant a contribué, dans ces bâtiments, à substituer de l'électricité par du gaz.

Il est également intéressant d'ajouter que toutes les cuisinières installées sont électriques. Cette homogénéité est le résultat d'une subvention indirecte qui consiste à accorder une dérogation à l'obligation de distribuer le gaz dans toutes les cuisines. Cette dérogation a pour effet de substituer du gaz par de l'électricité.

4.4.2.5 Taux de renouvellement d'air

Le taux de renouvellement d'air moyen nécessaire pour garantir une bonne qualité de l'air intérieur des logements doit être de 0.7 m³/h/m² (SIA). Le taux effectif moyen mesuré pendant la période de chauffage 2006/07 a été de 1.12 m³/h/m² (voir section 3.3.3). Cette surventilation du bâtiment a engendré une augmentation de la demande de chaleur de 6 MJ/m²an.

4.4.2.6 Vitrages Nord

A l'origine du projet, des vitrages de coefficient U = 0.8 W/m²K devaient être installés sur la façade nord-est du bâtiment. Entre la conception du projet et la réalisation de l'ouvrage, les méthodes de

certification des vitrages ont été modifiées et les vitrages posés ont été "reclassés" comme ayant un coefficient U de $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Cette modification engendre une hausse de $5 \text{ MJ/m}^2\text{an}$.

4.4.2.7 Conditions de calcul

Le passage des conditions de calcul Mopec 1993 à SIA 2001 engendre, dans le logiciel EnerCad, une augmentation de $4 \text{ MJ/m}^2\text{an}$ de la demande de chauffage.

4.4.2.8 Climat

Les conditions climatiques standards pour Genève ont été remplacées par les mesures de température et d'ensoleillement effectuées in-situ en toiture du bâtiment. La saison 2006/07 a bénéficié d'un hiver relativement chaud par rapport à la moyenne : $2411 \text{ DJ}_{20/12}$ contre $3072 \text{ DJ}_{20/12}$ pour une année normalisée. Ce climat favorable représente une diminution de la demande de chauffage de $45 \text{ MJ/m}^2\text{an}$ par rapport au climat standard.

4.4.2.9 Ventilation naturelle

Des visites in-situ ont confirmé un fait bien connu : tous les habitants d'un immeuble locatif ne gardent pas leurs fenêtres fermées durant toute la saison de chauffage. Une étude menée par le Cuepe sur un immeuble d'habitation similaire a estimé que le taux de ventilation naturel due à ce phénomène se situait entre 0.02 et 0.2 volume/heure [48]. Nous avons opté pour une valeur moyenne de 0.1 vol/h, soit $0.23 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Cet apport d'air frais représente, dans ce cas précis, une augmentation de $19 \text{ MJ/m}^2\text{an}$ de la demande de chauffage.

4.4.2.10 Facteurs de voilage

Les visites régulières de l'immeuble ont également révélés qu'une fraction non-négligeable des protections extérieures étaient constamment baissées. Nous avons évalué, de manière subjective, un taux de protections solaires constamment baissé d'environ 30%. Une valeur que corrobore une étude quantitative menée par le Cuepe sur un immeuble similaire [48]. Le facteur de voilage était de 0% dans le calcul initial, nous l'avons donc augmenté à 30%. Ces gains solaires manquants représentent une augmentation de la demande de chauffage de $10 \text{ MJ/m}^2\text{an}$.

4.5 Normalisation du bilan thermique

Une fois le bilan thermique calibré aux conditions réelles d'utilisation, il est possible de modifier les paramètres de fonctionnement principaux pour retrouver les conditions de calcul normalisées. La Figure 4.3 représente la répartition des flux de chaleur donnée par le logiciel de simulation (EnerCad) pour les différents cas suivants.

Le modèle calibré est représenté dans la première colonne "Mesuré". Les conditions climatiques sont celles qui ont été mesurées en 2006/07. La température intérieure a été définie à 23°C car le logiciel ne permet pas de sélectionner les demi-degrés. Le taux de renouvellement d'air est de $1.12 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ et on considère un taux de ventilation naturelle de 0.1 vol/h, soit $0.23 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. La demande de chauffage résultante est de $132 \text{ MJ/m}^2\text{an}$, soit $2 \text{ MJ/m}^2\text{an}$ de plus que la valeur mesurée.

La colonne "Corrigé climat" représente le bilan thermique du bâtiment pour une année climatique normalisée (Genève). La demande de chaleur en conditions réelles de fonctionnement, pour une

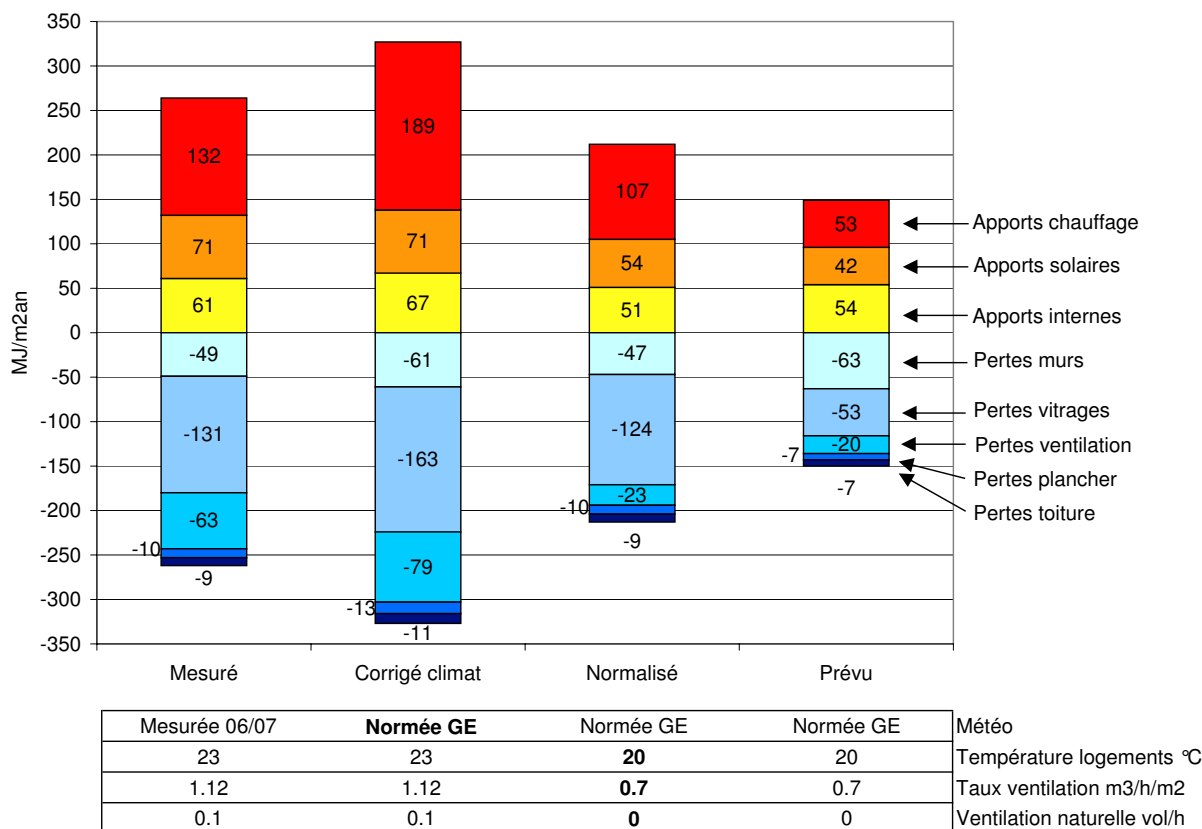


FIG. 4.3 – Répartition des flux de chaleur selon le bilan du logiciel de calcul (EnerCad). "Mesuré" = bilan calibré aux conditions réelles de fonctionnement. "Corrigé climat" = bilan calibré avec climat normalisé pour Genève. "Normalisé" = bilan corrigé du climat avec normalisation des paramètres de fonctionnement. "Prévu" = calcul de consommation initial en conditions normalisées.

année normalisée, serait de 189 MJ/m²an.

L'ajustement des paramètres de fonctionnement principaux permet d'atteindre le bilan "Normalisé" du bâtiment. Ce dernier est illustré dans la troisième colonne. La température des logements est abaissée à 20°C, le taux de renouvellement d'air est ramené à 0.7 m³/h/m² et la ventilation naturelle par les fenêtres ouvertes est supprimée. La demande de chaleur résultante est de 107 MJ/m²an.

La dernière colonne représente le bilan calculé initialement, que l'on peut comparer avec le résultat précédent. On peut en conclure que la demande de chaleur réelle en conditions normalisées est deux fois plus élevée que l'objectif (53 versus 107 MJ/m²an). La différence majeure provient des pertes par l'enveloppe qui sont plus élevées que prévu¹. La sous-estimation des ponts thermiques est la première cause de cette différence. La sous-estimation de la performance des systèmes techniques, la sur-estimation des gains électriques internes, ainsi que des vitrages moins performants que prévu contribuent également à creuser l'écart entre l'objectif et la réalité.

Cette analyse nous permet de découpler les effets de la performance du bâtiment et des conditions

¹Les éléments de l'enveloppe n'ont pas été saisis de la même manière dans le bilan initial et dans le bilan recalculé. On ne peut donc pas comparer directement les deux postes "pertes murs" et "pertes vitrages", il faut considérer l'ensemble des deux flux.

d'utilisation de celui-ci sur la demande de chauffage. La Table 4.2 donne les valeurs respectives de chacun de ces deux effets.

Demande de chauffage		
Objectif normalisé	53	MJ/m ² an
Performance réelle du bâtiment	+ 54	MJ/m ² an
Conditions d'utilisation du bâtiment	+ 82	MJ/m ² an
Consommation réelle corrigée climat	189	MJ/m ² an

TAB. 4.2 – Effets du bâtiment et de son utilisation sur la demande de chauffage.

Le comportement des habitants a plus d'impact sur la consommation du bâtiment que la sous-performance intrinsèque de celui-ci. Un résultat que relève également Pettersen [49] sur les bâtiments conventionnels. Celui-ci a utilisé des outils statistiques (Monte Carlo) pour étudier l'influence du climat, de l'enveloppe thermique et des habitants sur la consommation énergétique des bâtiments. Selon l'auteur, la demande de chauffage d'un bâtiment ne peut pas être estimée avec une précision inférieure à $\pm 35-40\%$ si le comportement des habitants n'est pas connu. Nos résultats confirment cette incertitude et montrent qu'elle augmente - logiquement - avec la performance du bâtiment.

4.6 Bilan énergétique normalisé

La demande de chauffage normalisée est de 107 MJ/m²an. La demande observée de consommation en ECS est de 75 MJ/m²an, ce qui représente une demande globale de chaleur de 182 MJ/m²an. L'installation solaire thermique ainsi que la pompe à chaleur ont fourni en 2006/07 l'équivalent de 73 MJ/m²an. La demande nette de chaleur est donc de 109 MJ/m²an. Avec un rendement annuel des chaudières de 87% (PCS), la consommation de gaz normalisée est finalement de 125 MJ/m²an, soit 36% de plus que l'objectif calculé de 92 MJ/m²an.

4.7 Conclusions

La demande de chauffage réelle est 3.5 fois plus élevée que la valeur calculée en conditions normalisées : 189 MJ/m²an au lieu de 53 MJ/m²an. Deux catégories d'effets sont à l'origine de l'écart observé : les effets liés à la performance intrinsèque du bâtiment (+54 MJ/m²an) et les effets liés aux conditions d'utilisation de celui-ci (+82 MJ/m²an).

Dans la première catégorie, les facteurs prépondérants sont la sous-estimation des ponts thermiques linéaires ainsi que la sur-estimation de la performance des systèmes techniques et des gains solaires. Dans la seconde catégorie, le comportement moyen des habitants déplace le point de fonctionnement normé du bâtiment vers un état où la température intérieure et le taux de renouvellement de l'air sont plus élevés.

La consommation d'ECS est normale et les systèmes de production de chaleur ont atteint leur objectif.

Chapitre 5

Bilan des investissements réalisés dans l'efficacité énergétique

5.1 Introduction

Ce chapitre présente le bilan économique et énergétique des solutions d'efficacité énergétique qui ont été intégrées dans le concept du Pommier. Le coût de kWh de gaz économisé (négakWh) est calculé et les investissements sont mis en regard avec l'économie réalisée sur l'achat des énergies. La substitution gaz-électricité engendrée par les systèmes actifs est discutée et un bilan en énergie primaire est réalisé.

5.2 Investissement dans l'efficacité énergétique

5.2.1 Présentation des résultats

La Table 5.1 présente le coût d'investissement des quatre solutions d'efficacité énergétiques suivantes : l'enveloppe thermique, l'installation solaire thermique, la ventilation à double-flux avec récupérateur de chaleur et la pompe à chaleur sur air vicié. L'impact de ces solutions sur la consommation d'énergie ainsi que les diverses subventions dont le projet a bénéficiées sont également indiqués. Tous les prix sont donnés TTC. Les différentes hypothèses de calcul retenues pour cette analyse sont présentées et discutées ci-dessous :

- L'investissement dans l'enveloppe représente le surcoût de l'amélioration de la performance des vitrages et de l'augmentation de l'épaisseur d'isolation par rapport à une réalisation répondant strictement à la norme SIA 380/1.
- L'investissement dans l'installation solaire thermique englobe les capteurs, les conduites, le ballon de stockage et la main d'oeuvre.
- L'investissement dans l'installation de ventilation à double-flux avec récupérateur de chaleur représente le surcoût par rapport à une installation d'extraction simple estimé à 1'500 CHF par appartement.
- L'investissement dans les pompes à chaleur sur air vicié représente le surcoût par rapport à une solution avec batterie de chaud en lieu et place du condenseur.

Efficacité énergétique	Unité	Enveloppe	Solaire	Double-flux	PAC air vicié	Total	Total+subv.
Investissement	CHF	210'000	380'000	1'015'960	75'000	1'680'960	1'021'960
Invest/coût bâtiment	%	0.4%	0.7%	2.0%	0.1%	3.3%	2.0%
Temps amortissement	an	50	20	20	20	-	-
Annuité (taux 6.5%)	CHF/an	14'262	34'487	92'205	6'807	147'761	99'853
Maintenance	CHF/an	-	1'000	8'200	1'000	10'200	10'200
TOTAL INVEST	CHF/m2an	0.7	1.7	4.8	0.4	7.6	5.3
Bilan énergie gaz	MJ/m2an	-50	-28	-85	-52	-215	-215
Bilan énergie électrique	MJ/m2an	0	1	10	16	27	27
Achat gaz	CHF/m2an	-1.3	-0.7	-2.1	-1.3	-5	-5
Achat électricité	CHF/m2an	0.0	0.1	0.6	1.0	1.7	1.7
TOTAL ÉNERGIE	CHF/m2an	-1.3	-0.6	-1.5	-0.3	-3.7	-3.7
BILAN FINAL	CHF/m2an	-0.6	1.1	3.3	0.1	3.8	1.5
Coût du négakWh	ct/kWh	5	23	23	9	15	12
Subventions	Unité	Minergie	Solaire	DIFC-ECS	Gaz cuisine	Total	Total
Montant	CHF	300'000	138'000	128'000	93'000	659'000	659'000
Temps amortissement	an	50	20	50	50	-	-
Annuité	CHF/an	20'374	12'524	8'693	6'316	47'908	47'908

TAB. 5.1 – Évaluation économique des solutions d'efficacité énergétique et subventions du projet. Prix de l'électricité 22 ct/kWh et prix du gaz 9 ct/kWh. Taux d'amortissement 6.5%.

- Nous avons considéré un prix de l'électricité de 22 ct/kWh, qui correspond à la moyenne sur 24 heures du tarif Vital Bleu double de SIG. Nous avons considéré un prix du gaz de 9 ct/kWh (taxe de puissance incluse).
- Le taux d'amortissement utilisé est de 6.5%. Les raisons de ce choix sont détaillées dans la section 6.4.2.2, page 120. La durée d'amortissement choisie est de 50 ans pour l'enveloppe et de 20 ans pour les systèmes techniques.
- La non installation du décompte individuel de chauffage et d'ECS représente une subvention indirecte. Nous l'avons estimée à 1'100 CHF par appartement. Cette solution permet également d'éviter les frais liés au relevé des compteurs généralement imputés à la charge des locataires. Nous ne l'avons cependant pas pris en compte.
- Le projet a également bénéficié d'une dérogation concernant la distribution du gaz dans toutes les cuisines¹. Nous avons estimé le montant de cette subvention indirecte à 800 CHF par appartement.
- Le coût du kWh de gaz économisé (négakWh) est calculé en faisant le ratio entre le coût d'intégration du système exprimé sous forme d'annuité (investissement, frais de maintenance, frais d'électricité) et la quantité annuelle de gaz économisé exprimée en kWh.

Il est également important de relever que l'intégration des systèmes dans le bâtiment nécessite un investissement supplémentaire en temps de travail. Les architectes du projet l'estiment à environ 10% des honoraires d'architecte et d'ingénieur CVS. Notamment, en ce qui concerne l'intégration du double-flux qui nécessite une grande attention au niveau de l'acoustique pour éviter les liaisons phoniques entre appartements. Ce surcoût n'a pas été facturé dans ce projet car les honoraires étaient forfaitaires.

5.2.2 Coût du kWh de gaz économisé (négakWh)

5.2.2.1 Présentation des résultats

La Figure 5.1 présente le coût du kWh de gaz économisé pour chacun des quatre systèmes, le total brut et le total avec subventions. Un taux de 6.5% a été utilisé pour le calcul des annuités (voir 6.4.2.2). La comparaison avec le prix du gaz actuel permet d'en tirer les conclusions suivantes.

L'enveloppe thermique produit un négakWh à 5 centimes. Au prix du gaz actuel et sans subventions, investir dans l'enveloppe pour économiser un kWh de gaz coûte environ deux fois moins cher que de brûler ce même kWh. Il est intéressant de relever que les intérêts du capital représentent environ 70% de ce coût (50 ans @ 6.5%).

L'installation solaire thermique produit un négakWh à 23 centimes. La subvention solaire ramène ce coût à 14 ct/kWh, qui reste encore 1.5 fois plus élevé que le prix du gaz actuel. Un effort supplémentaire de 4% sur le taux d'intérêt permettrait d'atteindre l'équilibre économique. Aux prix des énergies actuels, cette installation représenterait une augmentation nette des charges de chauffage sans subventions de 1.1 CHF/m²an, soit environ 50 francs par personne par an.

¹Règlement d'application de la loi sur les constructions et les installations diverses (LCD), art. 79 : "Le gaz doit être distribué, en règle générale, dans toutes les cuisines des grandes maisons destinées à l'habitation et, partout où le réseau d'adduction le permet, des petites maisons destinées à l'habitation."

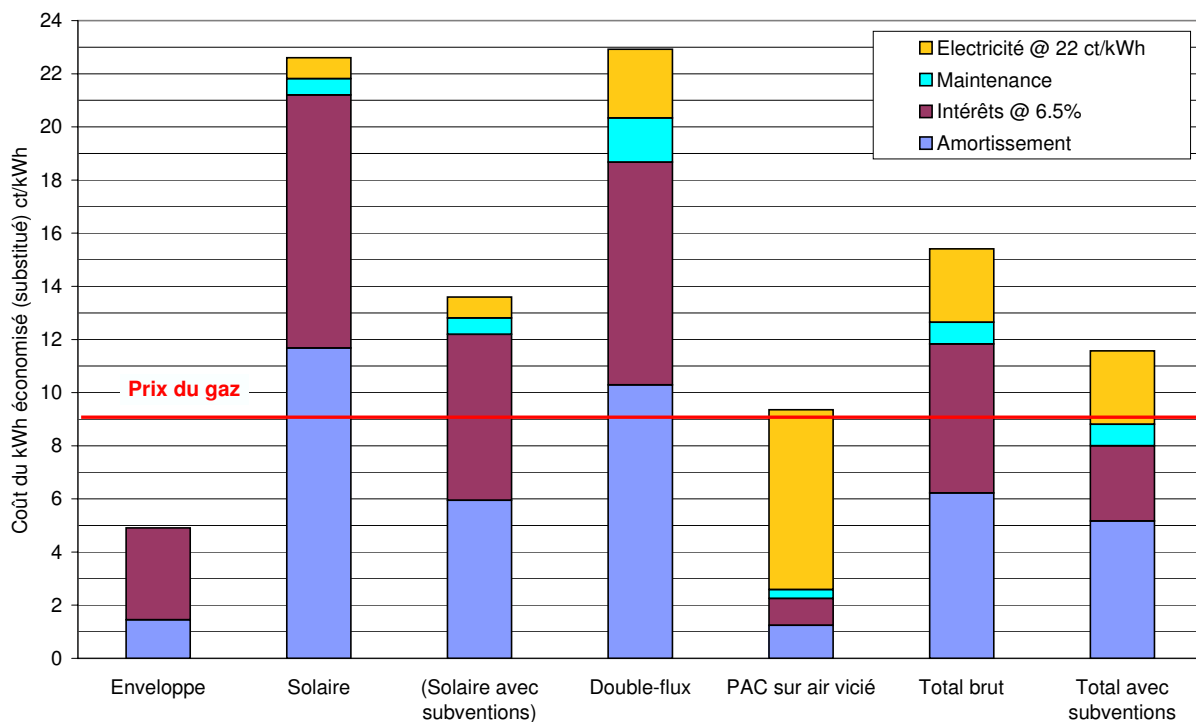


FIG. 5.1 – Coût du kWh de gaz économisé (négakWh). Prix de l'électricité à 22 ct/kWh. Amortissement sur 50 ans pour l'enveloppe et 20 ans pour les systèmes au taux de 6.5%.

La ventilation à double-flux avec récupérateur de chaleur produit un négakWh au même coût que l'installation solaire thermique, soit 23 centimes. Même un emprunt à taux zéro, qui ramènerait ce coût à 15 centimes, ne permettrait pas de rendre ce système compétitif aujourd'hui face au gaz. Aux prix des énergies actuels, cette installation représenterait une augmentation nette des charges de chauffage sans subventions de 3.3 CHF/m²an, soit environ 150 francs par personne par an.

De plus, il est probable que le coût réel du négakWh produit par le double-flux soit plus bas que les 23 centimes mesurés. En effet, l'étanchéité des bâtiments Minergie est bien meilleure que celle des bâtiments traditionnels. Il en résulte un taux de renouvellement d'air plus bas et, en comparaison, un gain global en énergie plus élevé que celui mesuré uniquement sur l'installation elle-même.

La pompe à chaleur sur air vicié produit un négakWh à 9 centimes, soit au même coût que le gaz. Cependant, cet équilibre économique est fortement dépendant du prix de l'électricité, puisque l'achat de cette énergie représente plus de 70% du coût du négakWh.

Le regroupement des actions permet d'obtenir un coût du négakWh global (total brut) de 15 centimes, que les subventions ramènent à 12 centimes. La part fixe, représentée par l'amortissement des installations et les frais de maintenance, représente environ 9 centimes et la part variable, due à l'achat d'électricité, environ 3 centimes.

Jakob [50] et Jakob et al. [51] estiment que le coût du négakWh de l'isolation thermique se situe entre 5 et 13 ct/kWh et celui du système de ventilation à double-flux entre 17 et 30 ct/kWh. Les conditions d'amortissement ne sont pas identiques, mais l'ordre de grandeur confirme la validité de nos mesures.

Finalement, il ne faut pas oublier qu'une enveloppe thermique performante (isolation et ventilation) fournit également des co-bénéfices non chiffrables [50, 52]. Par exemple, des températures de surface plus élevées, une meilleure protection contre le bruit et une réduction des courants d'air contribuent à augmenter le niveau de confort intérieur. Également, une meilleure régulation de l'hygrométrie intérieure contribue à préserver la structure du bâtiment sur le long terme.

5.2.2.2 Les effets de la taxe sur le CO₂ et du taux d'intérêt

La taxe sur le CO₂, entrée en vigueur en Suisse le 1^{er} janvier 2008, représente un surcoût d'environ 0.3 ct/kWh sur le prix du gaz. Elle pourra atteindre 0.9 ct/kWh dès 2010 si les objectifs de réduction des émissions de CO₂ ne sont pas atteints. Si on peut saluer l'introduction de cette taxe, force est de constater qu'elle restera un levier marginal dans le déploiement de ces systèmes d'efficacité énergétique tant que son niveau ne sera pas adapté aux enjeux actuels.

Le taux d'intérêt représente un mode de subvention efficace. Dans notre exemple, une baisse de 1% du taux d'intérêt représente une baisse du négakWh total brut d'environ 1 centime, soit l'équivalent du plafond légal de la taxe sur le CO₂. Un emprunt à taux zéro représente une baisse du négakWh total brut de 5 centimes, ce qui le ramène à 10 centimes, soit 1 centime de plus que le prix de gaz actuel.

5.2.2.3 La prise en compte des externalités négatives

La prise en compte des externalités négatives des énergies permet de déplacer le point d'équilibre économique. L'arrêté neuchâtelois 740.104 concernant les coûts externes de l'énergie (ACEE) propose d'ajouter environ 3 ct/kWh pour le gaz et environ 5 ct/kWh pour l'électricité [53]. En intégrant ces valeurs, on obtient un prix du gaz actuel avec coûts externes de 14 ct/kWh et un coût du négakWh total brut de 16 centimes. Si cette méthode montre toute la pertinence des choix effectués, elle ne représente cependant pas les coûts réels supportés par les acteurs concernés.

5.2.3 Investissement versus économies sur les charges

L'intégration des systèmes présentés ci-avant représente un investissement total brut de 7.6 CHF/m²an (voir Table 5.1). Le gain réalisé sur l'achat des énergies est de 3.7 CHF/m²an, avec un prix du gaz de 9 ct/kWh et un prix de l'électricité de 22 ct/kWh.

Cela signifie qu'à loyer chauffé constant (loyer + charges de chauffage) et sans subventions, le maître d'ouvrage ne pourrait reporter que 49% de son investissement sur les loyers. Les subventions obtenues dans le cadre de ce projet permettent d'augmenter cette part à 70%. Un report intégral représenterait aujourd'hui une augmentation nette des charges de 175 francs par personne par an sans subventions et 70 francs/cap.an avec subventions.

Si l'investissement est figé pour plusieurs décennies, le gain sur l'achat des énergies dépend directement du prix de ces dernières. La Figure 5.2 illustre l'évolution, en fonction du prix du gaz et de l'électricité, de la fraction de l'investissement brut que le maître d'ouvrage peut répercuter sur les loyers pour garantir un loyer chauffé constant.

La répartition est fortement liée au prix du gaz bien qu'elle soit également sensible au prix de l'électricité. Nous nous situons aujourd'hui dans la zone orange, dans laquelle moins de 70% de

		Gaz ct/kWh					
		8	10	12	14	16	18
Électricité ct/kWh	18	45%	61%	77%	93%	109%	125%
	20	44%	59%	75%	91%	107%	123%
	22	42%	57%	73%	89%	105%	121%
	24	39%	55%	71%	87%	103%	119%
	26	37%	54%	69%	85%	101%	117%
	28	36%	51%	67%	83%	99%	115%

FIG. 5.2 – Fraction de l’investissement brut (sans subventions) que le maître d’ouvrage peut répercuter sur les loyers pour garantir un loyer chauffé constant. Évolution en fonction du prix des énergies. Orange : moins de 70%, Jaune : de 70% à 100%, Vert : plus de 100%.

l’investissement brut peut être répercuté sur les loyers. Avec un prix du gaz entre 12 et 14 ct/kWh, la part répercutable se situe entre 70% et 100% de l’investissement (zone jaune). La part manquante, à charge du maître d’ouvrage, peut alors être raisonnablement subventionnée par la collectivité. Finalement, dès que le gaz franchit la barre des 15 ct/kWh, la totalité des investissements bruts peut être reportée sur les loyers avec, en prime, un gain net pour les locataires.

5.2.4 L’électricité du double-flux dans les charges de chauffage ?

Par rapport à une installation de ventilation normale, qui ne fait que rejeter de la chaleur à l’extérieur, une installation à double-flux permet de valoriser une partie de ces rejets, moyennant une certaine consommation d’électricité supplémentaire (ventilateur de pulsion). La prestation thermique fournie par le double-flux a pour effet une baisse des charges de chauffage. La question qui se pose est alors la suivante : peut-on imputer l’électricité consommée par le ventilateur de pulsion dans le compte de chauffage des locataires ?

Un tour de table des autres services cantonaux de l’énergie révèle que ces derniers n’ont, jusqu’ici, jamais été confrontés à cette question. La question a été posée au service juridique de l’état de Genève, en la personne de Madame L. Stahl-Monnier, qui a émis un avis de droit sur la question. Elle estime qu’il est possible, au sens strict de la loi, de facturer aux locataires l’électricité consommée par les ventilateurs de pulsion des systèmes à double-flux sur la base de l’article 257b al. 1 CO :

Bonjour, pour répondre à votre demande, il faut remonter d’un niveau législatif et regarder ce que dit la loi. Selon l’article 257a al. 1 CO, les frais accessoires sont dus pour les prestations fournies par le bailleur ou un tiers en rapport avec l’usage de la chose. Pour les habitations et les locaux commerciaux, on entend par frais accessoires les dépenses effectives du bailleur pour des prestations en rapport avec l’usage de la chose, telles que frais de chauffage, d’eau chaude et autres frais d’exploitation, ainsi que les contributions publiques qui résultent de l’utilisation de la chose (art. 257b

al. 1 CO). Les frais de chauffage et d'eau chaude ne sont dès lors pas forcément les seuls que l'on puisse prendre en considération sous la dénomination frais accessoires. L'article 5 OBLF ne nous est pas utile, puisqu'il concerne uniquement les frais de chauffage et de préparation d'eau chaude. Il ne peut donc pas s'appliquer aux frais d'électricité nécessaires au fonctionnement d'une installation de récupération de chaleur sur la ventilation.

Il s'agit donc de déterminer si les frais d'électricité précités peuvent entrer dans la notion de frais accessoires au sens de l'article 257b al. 1 CO.

Selon Davit Lachat (Le bail à loyer, 1997, p. 221ss), l'expression "autres frais d'exploitation" recouvre les frais d'électricité, de gaz, de climatisation ou bien les frais de concierge, d'exploitation de l'ascenseur ou encore les redevances pour le réseau de télévision par câble. (Attention, ne font pas partie des frais accessoires les frais d'électricité, par exemple, qui découlent d'une relation directe entre le fournisseur et le locataire). Cette liste n'est selon lui pas exhaustive. A contrario, ne peuvent être facturés comme frais accessoires les dépenses que le bailleur consacre à l'entretien ou à la rénovation des locaux, ni les prestations du bailleur sans rapport avec l'usage de la chose louée. David Lachat explique encore que des frais accessoires ne peuvent être mis à la charge du locataire s'il ne bénéficie pas de la prestation correspondante (p. ex. un locataire dépourvu de téléviseur n'a pas à s'acquitter de la redevance pour le réseau de télévision par câble si la prise de son logement a été plombée).

En l'espèce, l'on peut soutenir que le locataire bénéficie de la prestation correspondante puisque son logement est ventilé et qu'il voit ses frais de chauffage diminuer. Par ailleurs, si les frais de climatisation sont cités, ceux de ventilation devraient également pouvoir être pris en considération dans la notion de frais accessoires.

Dès lors, stricto jure, il est possible de facturer au locataire des frais accessoires relatifs aux frais d'électricité de la ventilation sur la base de l'article 257b al. 1 CO.

Je n'ai pas trouvé de jurisprudence qui pourrait confirmer ces avis, aucun cas d'espèce n'étant le même. Je vous suggère cependant de consulter un avocat spécialiste en la matière qui pourrait vous parler mieux que moi de la pratique en la matière.

L. Stahl-Monnier, service juridique de l'État de Genève, 9 juillet 2007.

Dans le cas du Pommier, et au prix actuel des énergies, le double-flux engendre une baisse de 2.1 CHF/m²an sur l'achat du gaz (locataires) et une hausse de 0.6 CHF/m²an sur l'achat d'électricité (maître d'ouvrage). Le transfert de l'électricité du ventilateur de pulsion dans le compte chauffage aurait pour conséquence une baisse nette de 1.5 CHF/m²an en faveur des locataires.

5.3 Substitution gaz-électricité

De nombreux systèmes actifs ont été intégrés dans le concept énergétique du Pommier. Ces systèmes substituent du gaz par de l'électricité avec une performance propre à chacun d'eux. Un

phénomène déjà observé par Abel [54] en 1994. La Figure 5.3 illustre ce phénomène.

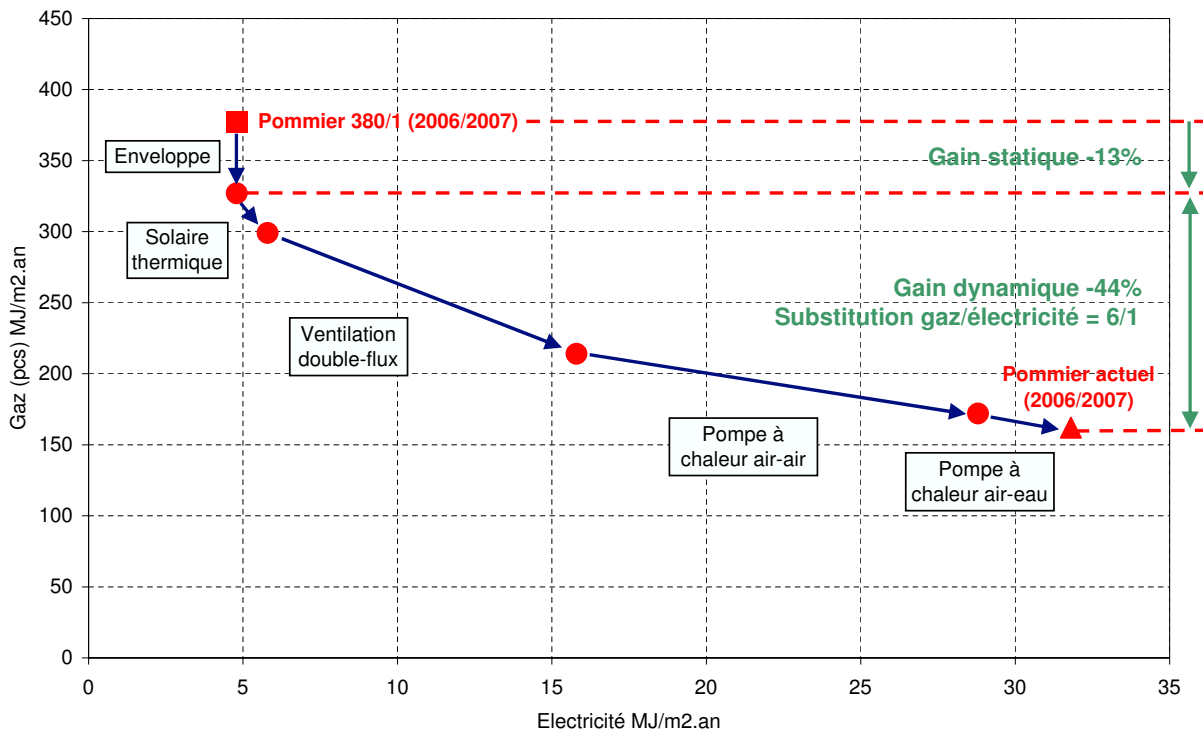


FIG. 5.3 – Substitution gaz-électricité des systèmes d'efficacité énergétique. Seule la consommation du ventilateur de pulsion est prise en compte pour le double-flux.

Le carré rouge (en haut à gauche) représente le point de fonctionnement virtuel du bâtiment, s'il avait été construit uniquement selon les normes en vigueur et chauffé avec du gaz (scénario standard). La consommation électrique est celle nécessaire au fonctionnement de la chaudière et des pompes de circulation. L'amélioration de l'enveloppe thermique baisse uniquement la demande de gaz. Puis, l'intégration progressive des sous-systèmes entraîne une substitution croissante du gaz vers l'électricité. Le triangle rouge (en bas à droite) représente le point de fonctionnement réel mesuré en 2006/07. La consommation de gaz est réduite de 57% par rapport au scénario standard, mais la demande en électricité est multipliée par un facteur 6. L'enveloppe thermique contribue à hauteur de 13% à la réduction de la demande de gaz et les systèmes techniques à hauteur de 44%.

Il est important de faire la différence entre la contribution de l'enveloppe et celle des systèmes techniques. L'enveloppe thermique est un système passif qui génère un gain "statique". Celui-ci est pérenne et ne nécessite pas de suivi particulier. En revanche, les installations techniques sont des systèmes actifs qui génèrent un gain "dynamique", dont la pérennité dépend fortement de la qualité du suivi de ces installations.

La Table 5.2 présente le coefficient de performance (COP) des systèmes actifs ainsi que la contribution de l'enveloppe pour la saison 2006/07. Plus le COP est élevé, mieux l'électricité est valorisée.

La performance annuelle des systèmes varie presque d'un facteur 10 entre le meilleur et le moins bon. L'ensemble des systèmes actifs permet de substituer 6 unités de gaz pour chaque unité d'électricité consommée. La résultante de l'effet de l'enveloppe et des systèmes actifs donne un COP

Indicateur	Gaz	Électricité	COP
Unité	MJ/m ² an	MJ/m ² an	-
Solaire thermique	-28	+1	28
Ventilation double-flux	-85	+10	8.5
Pompe à chaleur sur air vicié (air-air)	-42	+13	3.2
Pompe à chaleur sur air vicié (air-eau)	-10	+3	3.3
Total systèmes actifs	-165	+27	6.1
Enveloppe	-50	0	∞
Systèmes actifs + enveloppe	-215	+27	8.0

TAB. 5.2 – Coefficient de performance (COP) des systèmes actifs pour la saison 2006/07. Seule la consommation du ventilateur de pulsion est comptabilisée pour le double-flux.

annuel de 8 pour le concept du Pommier. En supposant que l'électricité qui alimente ces bâtiments soit produite par une mauvaise centrale à gaz dont le rendement ne dépasse pas les 33%, et bien cette combinaison permettrait encore de diviser par 2.7 la consommation de gaz et les émissions de CO₂ associées par rapport au scénario standard.

5.4 Bilan en énergie primaire

5.4.1 Facteurs de conversion

La Figure 5.3 représente les deux vecteurs énergétiques nécessaires à la production de chaleur dans les bâtiments du Pommier : le gaz et l'électricité. Le premier est extrait de l'environnement et le deuxième est produit de multiples façons à partir d'autres énergies puisées elles aussi dans l'environnement. Le bilan en énergie primaire permet de remonter la chaîne énergétique et de quantifier l'énergie totale puisée dans l'environnement nécessaire à la fourniture des deux vecteurs énergétiques ci-dessus.

Le choix du facteur de conversion est un élément clé dans cette évaluation. Si la définition du facteur de conversion des énergies fossiles ne pose pas de problèmes, il en est autrement pour l'électricité, dont le facteur de conversion reste très controversé. En effet, sur le réseau électrique européen auquel la Suisse est connecté, les consommateurs créent la demande et les fournisseurs s'exécutent en injectant sur ce réseau de l'électricité produite à partir de diverses sources d'énergie comme par exemple le charbon, le gaz ou l'hydraulique. Les flux électriques vont alors s'écouler entre les fournisseurs et les consommateurs en empruntant des chemins qui dépendent des caractéristiques propres de ces réseaux (lois de Kirchhoff).

Ainsi, lorsqu'un particulier ou une entreprise achète un kWh auprès d'un fournisseur et consomme ce kWh du réseau, il n'a aucun moyen technique à sa disposition pour en distinguer l'origine. Les flux physiques n'ont pas de liens directs avec les flux commerciaux. Or, il se trouve que la Suisse échange avec le réseau européen presque autant d'électricité qu'elle ne consomme. En 2006, elle a produit 62 TWh d'électricité, en a exporté 46 TWh sur le réseau européen et importé 49 TWh de celui-ci. Sachant que plus de 50% de l'électricité produite sur le réseau européen est d'origine

fossile, nul besoin de faire de grands calculs pour en conclure que le kWh électrique consommé en Suisse est fort différent du "mix" de production helvétique.

L'institut Paul Scherrer (PSI) s'est penché sur le problème en réalisant plusieurs scénarios sur les échanges d'électricité entre la Suisse et le réseau européen [55]. Sur la base de cette étude et de la base de données Ecoinvent, la SIA a entrepris de définir des facteurs de conversion pour son cahier technique SIA 2031 concernant le certificat énergétique des bâtiments. Après plusieurs rounds de négociation, la SIA a finalement pris position pour un facteur de conversion de l'électricité de 2.97 MJ/MJ et un facteur du gaz naturel de 1.15 MJ/MJ [36]. Nous avons décidé d'adopter ces valeurs pour cette étude.

5.4.2 Présentation des résultats

La Figure 5.4 est une représentation de la Figure 5.3 exprimée en énergie primaire. Les lignes vertes représentent des isoénergies, soit des lignes sur lesquelles la somme du gaz et de l'électricité est constante.

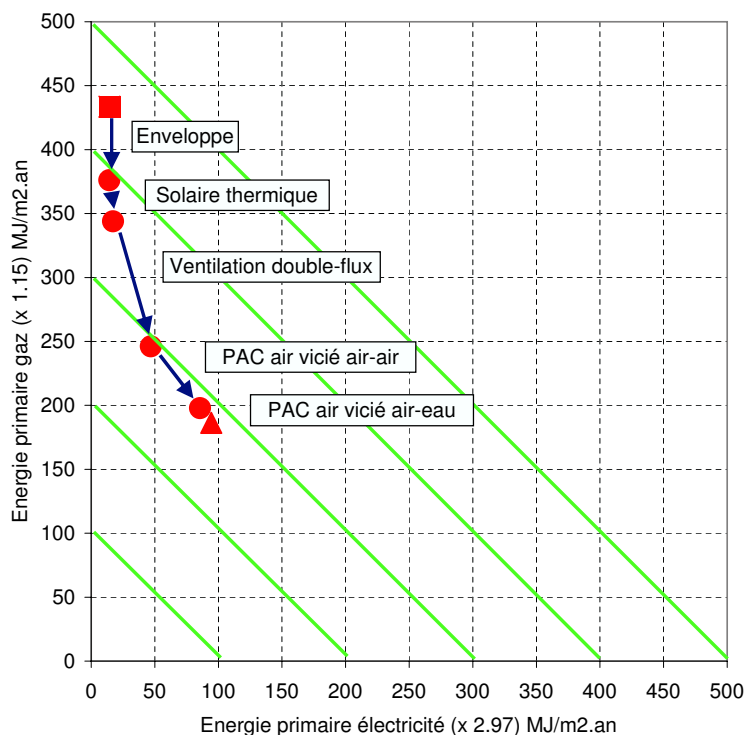


FIG. 5.4 – Bilan en énergie primaire. Les facteurs de conversion utilisés sont tirés du cahier SIA 2031 [36] : gaz naturel 1.15 MJ/MJ et électricité 2.97 MJ/MJ. Les lignes vertes représentent des isoénergies : la somme gaz + électricité est constante.

La consommation en énergie primaire du scénario standard (carré rouge) est de 448 MJ/m².an. On peut observer ensuite que l'intégration successive de l'amélioration de l'enveloppe, de l'installation solaire thermique et de la ventilation à double-flux permet de baisser à chaque étape la quantité totale d'énergie primaire consommée pour atteindre 293 MJ/m².an. Ces systèmes permettent de franchir des isoénergies.

Le graphique illustre bien l'effet marginal de la pompe à chaleur dont l'intégration glisse quasiment le long d'une isoénergie. Ce système fait passer la consommation totale d'énergie primaire de 293 à 281 MJ/m².an. On peut en conclure que cette technologie, dans ce cas précis, possède un bilan neutre en énergie primaire.

Une forte réduction de la consommation de gaz jointe à une augmentation de la demande électrique se solde finalement par une réduction nette de 167 MJ/m².an d'énergie primaire par rapport au scénario standard.

5.4.3 Variante avec concept global électro-thermique

L'origine de l'électricité qui alimente les systèmes actifs joue un rôle important dans le bilan en énergie primaire du bâtiment. Par le choix d'une source de production renouvelable certifiée, le facteur de conversion de l'électricité peut être réduit et le bilan nettement amélioré. Le bilan peut également être amélioré avec la filière fossile si, par exemple, les rejets thermiques des centrales sont valorisés.

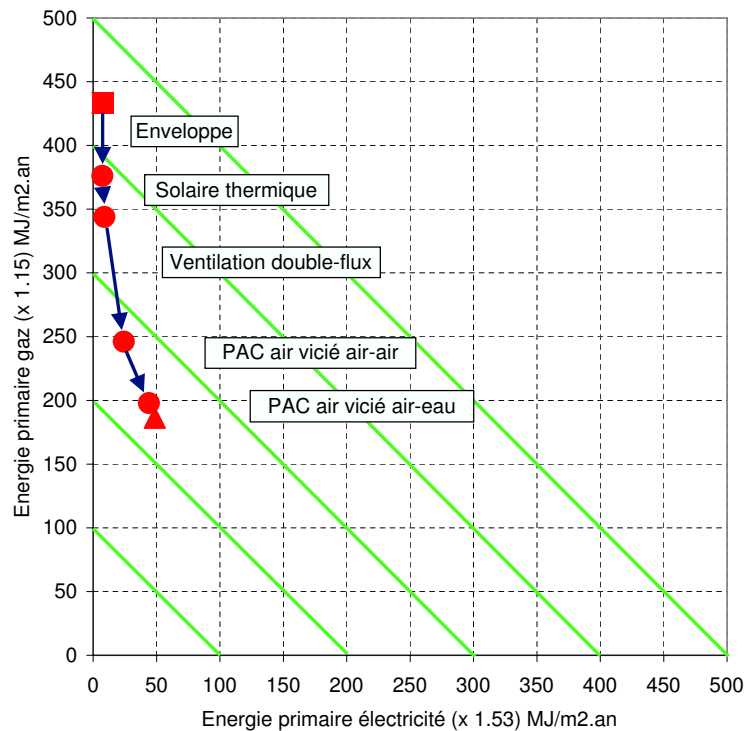


FIG. 5.5 – Bilan en énergie primaire. Le facteur de conversion pour le gaz naturel est tiré du cahier SIA 2031 [36] : 1.15 MJ/MJ. Celui de l'électricité est calculé dans le texte : 1.53 MJ/MJ. Les lignes vertes représentent des isoénergies : la somme gaz + électricité est constante.

La Figure 5.5 présente un deuxième bilan en énergie primaire dans lequel une nouvelle valorisation de l'électricité est proposée. Dans ce cas, on considère que l'électricité produite provient d'une centrale à gaz chaleur-force dont le bilan est le suivant : 47% d'électricité injectée sur le réseau, 28% de chaleur valorisée par un chauffage à distance et 25% de chaleur rejetée dans l'environnement, soit un rendement global de 75%.

On considère également qu'à travers un mécanisme de certification, seuls les systèmes destinés à la production de chaleur ou à la valorisation des rejets thermiques dans les bâtiments peuvent être alimentés par l'électricité provenant de la centrale chaleur-force.

Si les conditions ci-dessus sont respectées, nous pouvons définir un nouveau facteur de conversion en énergie primaire pour l'électricité produite par la centrale de la manière suivante :

$$f_{elec} = \frac{1}{\eta_{centrale}} \cdot f_{gaz} = \frac{1}{0.75} \cdot 1.15 = 1.53 \text{ MJ/MJ} \quad (5.1)$$

où $\eta_{centrale}$ représente le rendement global de la centrale et f_{gaz} le facteur de conversion pour le gaz naturel selon le cahier SIA 2031 [36].

Ce nouveau facteur pour l'électricité améliore le bilan global de l'installation et permet une réduction nette de 206 MJ/m²an d'énergie primaire par rapport au scénario standard. L'effet de la pompe à chaleur n'est plus marginal puisqu'elle permet de réaliser un gain de 35 MJ/m²an contre 12 MJ/m²an dans le scénario précédent.

L'avantage de ce système est qu'il permet de s'affranchir de la contrainte de lieu entre production et consommation grâce à la grande couverture du réseau électrique. Cependant, il doit impérativement respecter la contrainte de temps, à savoir une production électrique en phase avec la demande thermique des bâtiments de manière à pleinement valoriser les rejets de chaleur de la centrale.

Si les émissions de CO₂ de la centrale sont compensées, alors ce concept représente un couplage intelligent entre une production locale d'électricité et de chaleur et un système de maîtrise de la demande. En effet, le mécanisme compensatoire permettra de déclencher des travaux qui autrement ne seraient pas mis en oeuvre par manque de rentabilité. C'est notamment le cas dans le secteur du bâtiment, où les investissements dans l'efficacité énergétique sont supportés par les propriétaires, tandis que les baisses de charges profitent aux locataires.

5.5 Conclusions

Au prix du gaz actuel et sans subventions, investir dans l'enveloppe pour économiser un kWh de gaz coûte environ deux fois moins cher que de brûler ce même kWh.

L'installation solaire thermique possède un coefficient de performance annuel très élevé (28), mais elle n'est aujourd'hui pas rentable d'un point de vue strictement économique. Ce système est simple et performant et sa diffusion à large échelle doit être soutenue par la collectivité publique.

Le coefficient de performance annuel du double-flux est très bon (8.5), mais il n'est aujourd'hui pas non plus rentable d'un point de vue strictement économique. Cette évaluation ne prend cependant pas en compte les co-bénéfices non chiffrables générés par ce système.

Le bilan global de la pompe à chaleur sur air vicié est plutôt mauvais. Cet équipement est à l'équilibre économique, mais l'achat d'électricité représente plus de 70% du négakWh produit. De plus, le coefficient de performance est très moyen (3.2-3.3). Son bilan en énergie primaire est neutre ou positif en fonction de la valorisation choisie pour l'électricité. Nous sommes d'avis que ce système représente une complication inutile du concept énergétique.

Le prix actuel des énergies fossiles ne permet pas encore au maître d'ouvrage de répercuter sur les loyers la totalité de l'investissement brut réalisé dans l'efficacité énergétique sans une augmentation sensible des charges des locataires. Un prix du gaz à 15 ct/kWh permettrait de réaliser l'exercice avec en prime un gain net pour les locataires, toutes choses étant égales par ailleurs.

L'ensemble des systèmes actifs permet de substituer 6 unités de gaz pour chaque unité d'électricité consommée. Le concept global permet de réduire la consommation d'énergie primaire de 167 MJ/m²an par rapport à un scénario standard en considérant une valorisation nationale de l'électricité (cahier SIA 2031 [36]). L'alimentation électrique des systèmes par une centrale à gaz chaleur-force dont une partie des rejets thermiques est valorisée permet, sous certaines conditions, d'augmenter le gain en énergie primaire à 206 MJ/m²an par rapport au scénario standard.

Deuxième partie

MISE EN PERSPECTIVE DES RÉSULTATS DU POMMIER

Préambule

Dans la première partie, les mesures d'efficacité énergétique mises en oeuvre dans les bâtiments du Pommier ont fait l'objet d'une évaluation en profondeur.

Dans cette deuxième partie, ces résultats vont être mis en perspective par rapport à l'exploitation d'objets similaires traditionnels construits selon les normes en vigueur (SIA 380/1).

Le sixième chapitre décrit et définit les indicateurs utilisés pour effectuer la comparaison des performances énergétique et économique des bâtiments.

Dans le septième chapitre, ces indicateurs sont appliqués à neuf bâtiments de taille similaire et les résultats analysés. Afin de faciliter les comparaisons, seuls des bâtiments chauffés au gaz ont été sélectionnés.

Le huitième et dernier chapitre présente les conclusions et recommandations de ce travail.

Chapitre 6

Indicateurs de comparaison

6.1 Introduction

Ce chapitre présente les indicateurs retenus pour mettre en perspective la performance globale des bâtiments du Pommier par rapport à des réalisations similaires traditionnelles. La comparaison porte notamment sur les performances énergétique et économique des bâtiments et de leurs installations techniques.

Pour faciliter la comparaison des données, seuls des bâtiments équipés de chaudière à gaz ont été sélectionnés pour cette étude.

6.2 Définitions

Par usage, les prestations de chauffage, ventilation et sanitaire sont toujours découplées. La première fournit une prestation thermique au bâtiment. La deuxième, qui fournit une prestation aéraulique, fournit également une prestation thermique dans certains cas (e.g. double-flux). La troisième transporte, entre autres, l'ECS jusqu'aux points de soutirage et contribue donc également à la prestation thermique. On peut observer que le découplage entre prestation thermique et prestation aéraulique ne se superpose pas avec la répartition comptable des soumissions. Pour la suite de ce travail, nous proposons les définitions suivantes :

Système thermique : On considère le système thermique comme l'ensemble des installations hydrauliques traditionnelles permettant d'assurer la double prestation de chauffage des locaux et de distribution de l'ECS jusqu'aux points de soutirage. En effet, on considère que l'eau froide est une installation de base existante et que le circuit de distribution et de maintien en température de l'ECS est une prestation supplémentaire que l'on inclut dans le système thermique. Ce choix est motivé par le fait que l'on pourra ainsi comparer, dans un travail ultérieur, des systèmes de production centralisés avec des systèmes décentralisés. Les honoraires de l'ingénieur chauffagiste sont également pris en compte dans le coût du système thermique.

Système aéraulique : On considère le système aéraulique comme l'ensemble des installations nécessaires pour assurer la prestation de ventilation des locaux, avec ou sans production de chaleur. Cette définition large inclut les systèmes d'extraction simple et les systèmes de ventilation à double-flux qui fournissent également une prestation thermique. Les honoraires de l'ingénieur ventilation sont également pris en compte dans le coût du système aéraulique.

6.3 Indicateurs de performance énergétique

Nous avons retenu, pour l'évaluation de la performance énergétique, la mesure de l'indice de dépense de chaleur (IDC), la consommation spécifique d'électricité pour les systèmes techniques et l'analyse de la signature énergétique.

6.3.1 Indice de dépense de chaleur IDC

On définit l'IDC comme étant l'énergie primaire nécessaire pour fournir les prestations thermiques au bâtiment (chauffage et ECS). Il est exprimé en MJ/m².an.

Lorsque le justificatif thermique était disponible, nous avons estimé l'IDC normalisé en faisant des hypothèses sur la consommation d'ECS et la performance des systèmes techniques (solaire, double-flux, chaudière, etc). En effet, ce document atteste d'une qualité thermique minimale de l'enveloppe, mais aucune appréciation n'est faite concernant les systèmes de production et de distribution de la chaleur¹.

Pour simplifier et homogénéiser les comparaisons, un pouvoir calorifique supérieur de 37.5 MJ/m³ a été utilisé pour le gaz. Cette valeur est extraite d'une étude similaire réalisée par le Cuepe sur la cité solaire de Plan-les-Ouates à Genève [23, page 86].

Nous avons ensuite comparé ces valeurs avec les mesures corrigées des effets du climat. Les facteurs de corrections climatiques utilisés ont été calculés pour la période allant du 1er juin au 31 mai, depuis 1996 jusqu'à 2008, sur la base des mesures de l'institut suisse de météorologie [38]. Les hypothèses de calcul et les résultats sont présentés à l'annexe C.

6.3.2 Consommation électrique des systèmes techniques

La consommation électrique du système thermique est obtenue par le relevé du compteur SIG dédié (chaufferie). Elle englobe la consommation de la chaudière et celle des pompes de circulation.

La consommation du système aéraulique est plus difficile à obtenir car les installations de ventilation sont généralement raccordées sur le compteur SIG des services généraux. Pour les bâtiments dont les charges d'exploitation du système aéraulique ont été calculées, mais la consommation non mesurée, une estimation a été effectuée en prenant 2 kWh/m².an pour un système d'extraction simple et 5 kWh/m².an pour un système à double-flux [45, 56, mesures effectuées dans le cadre de ce travail].

Toutes les valeurs sont exprimées en kWh et en MJ/m².

6.3.3 Signature énergétique

La signature énergétique consiste à représenter la demande de puissance thermique du bâtiment en fonction de la température extérieure. La relation linéaire qui existe entre ces deux variables permet de quantifier, entre autres, la sensibilité thermique du bâtiment (pertes par l'enveloppe et

¹À noter que, à Genève, depuis le 1er décembre 2001, un "concept énergétique" doit être fourni aux autorités compétentes pour les constructions destinées au logement dont la surface brute de plancher chauffé est supérieure à 3000 m². Cette démarche, qui vise à limiter les besoins en énergie du projet, englobe également une évaluation de la performance des systèmes techniques.

par renouvellement d'air) et le facteur de surdimensionnement de la chaudière.

Nous avons exprimé la signature du gaz en W/m^2 (SRE) en utilisant le pouvoir calorifique supérieur du gaz ($PCS = 37.5 \text{ MJ/m}^3$). Les données proviennent majoritairement des carnets de chaufferie dans lesquels le chauffagiste relève à chaque passage l'index du compteur de gaz. La température extérieure provient des mesures journalières effectuées à Genève-Cointrin par l'Institut suisse de météorologie de 1996 à 2008 [38].

6.3.4 Autres indicateurs

D'autres indicateurs en lien avec la consommation d'énergie ont également été calculés. Il s'agit notamment de la puissance thermique installée et de la surface brute moyenne des pièces.

La puissance thermique installée a été exprimée en W/m^2 . Il s'agit uniquement de la puissance de la chaudière qui est disponible en tout temps. L'installation solaire thermique, par exemple, fournit aussi une puissance thermique mais elle n'est pas disponible en tout temps. Pour cette raison, ces systèmes n'ont pas été intégrés dans le calcul de la puissance installée.

La surface brute moyenne des pièces a été calculée par le simple ratio entre la SRE et le nombre de pièce. La cuisine est comptée comme une pièce à vivre à Genève.

6.4 Indicateurs de performance économique

Le coût d'investissement et les charges d'exploitation sont les deux indicateurs principaux que nous avons utilisés pour évaluer la performance économique des systèmes.

6.4.1 Coût d'investissement

6.4.1.1 Considérations générales

Il existe une différence entre le prix d'une installation technique arrêté (hors taxes) lors de l'adjudication des travaux et le coût final de cette même installation. Ces différences font habituellement l'objet d'un ou de plusieurs avenants au contrat de base. Ces avenants peuvent justifier, par exemple, de prestations supplémentaires (crédit) ou manquantes (débit), d'une indexation des prix due au renchérissement du coût de la vie ou encore d'un réajustement du taux de la TVA. Afin d'intégrer ces différences ainsi que la TVA, nous avons pris soin de ventiler sur les prix de la soumission la différence entre le coût final TTC payé par le maître d'ouvrage et le prix d'adjudication HT de cette dernière.

Le coût d'investissement est exprimé en CHF/m² en prenant la SRE comme référence. On mentionne également le ratio par rapport au coût total de l'ouvrage (sans le terrain).

6.4.1.2 Système thermique

Le coût d'investissement du système thermique comprend :

- Le système de production de chaleur (chaudière, solaire thermique, etc)
- Le raccordement de la chaudière à la conduite de gaz
- La taxe de raccordement au réseau de gaz (50 CHF/kW)

- Le circuit de distribution de la chaleur dans les logements
- La distribution de l'ECS jusqu'aux points de soutirage
- Le circuit de maintien en température de l'ECS
- Les honoraires de l'ingénieur

Il est important de souligner que, sauf dérogation, la présence du gaz dans l'immeuble est indépendante du système de production de chaleur puisque sa distribution dans les cuisines des immeubles locatifs est une obligation légale à Genève.

6.4.1.3 Système aéraulique

Le coût d'investissement du système aéraulique comprend :

- Le système de ventilation (simple ou double-flux)
- Le réseau de gaine de distribution (et de reprise pour le double-flux)
- Les honoraires de l'ingénieur

Dans le cas d'un système à double-flux muni d'une pompe à chaleur sur air vicié, on considère que celle-ci fait partie intégrante du système de ventilation. Ce choix est motivé par le fait qu'il n'est pas toujours possible d'extraire le prix de ces éléments de la soumission globale de ventilation.

6.4.2 Charges d'exploitation

6.4.2.1 Considérations générales

Les éléments retenus pour quantifier les charges d'exploitation sont les suivants :

- L'amortissement du système thermique/aéraulique
- Les frais fixes
- Les coûts de maintenance et dépannage
- L'achat d'énergie
- Les honoraires relatifs à la gestion du compte chauffage

Les charges globales sont réparties entre les charges indirectes des locataires, payées à travers le loyer, et les charges directes représentées par le compte chauffage. Les résultats sont exprimés en CHF/m² (SRE). On indique également le ratio des charges par rapport à l'état locatif (loyers) et la proportion de ces dernières imputable à l'achat d'énergie.

6.4.2.2 Amortissement du système

Les systèmes techniques sont composés de plusieurs éléments dont chacun possède sa propre durée de vie. Un calcul précis demanderait la prise en compte de chacune de ces variables et le calcul des réinvestissements nécessaires pour les éléments dont la durée de vie est inférieure à la période d'amortissement globale prise en compte. Cette précision de calcul n'est cependant pas nécessaire pour une étude comparative comme celle-ci, dans la mesure où les mêmes hypothèses sont appliquées à tous les bâtiments et que les systèmes techniques de ces derniers sont relativement proches en terme de matériel installé. Nous avons donc fait le choix d'amortir tous les systèmes sur une période de 20 ans. Cette valeur est représentative de la moyenne des amortissements individuels des éléments composants les installations techniques [57].

Les immeubles locatifs construits par la CIA sont entièrement financés par les fonds propres de la Caisse. Elle s'emprunte donc de l'argent à elle-même, mais à quel taux ? En discutant avec le directeur de la division immobilière de la CIA, Monsieur John Lateo, nous sommes arrivés à la conclusion que l'utilisation du taux de rendement brut des immeubles représentait la meilleure manière de calculer leur amortissement, ainsi que celui des installations techniques. Quelques explications.

Le taux de rendement brut est défini comme le rapport entre l'état locatif - la somme annuelle des loyers perçus par le propriétaire, parkings inclus - et la valeur d'un immeuble [58]. On définit également le taux de rendement net, comme étant le rapport entre les revenus nets après paiement de toutes les charges et l'investissement personnel du bailleur en fond propre. Le cadre législatif genevois limite le taux de rendement brut à environ 6.5% ainsi que le montant des loyers, et gèle ces derniers pendant les dix premières années d'exploitation du bâtiment. Ces contraintes sont intégrées dans le plan financier présenté par la CIA, qui doit être validé par l'autorité compétente. Il est généralement admis que, pendant les dix premières années de l'utilisation du bâtiment, les charges d'exploitation moyennes ne représenteront que 1% du coût de l'investissement, garantissant ainsi un équilibre du taux de rendement net aux alentours des 5.5%. Après cette période, les investissements effectués sur le bâtiment pourront éventuellement être répercutés sur les loyers, afin de ne pas diminuer ce taux de rendement net.

A l'instar d'une banque qui investit son capital dans un prêt financier à un taux d'intérêt donné, la CIA investit son capital dans l'immobilier à un taux d'intérêt correspondant au taux de rendement brut. Les charges d'exploitation, qui définissent le taux de rendement net de la Caisse, représentent pour la banque l'équivalent des frais de gestion interne. Pour ces raisons, nous avons choisi d'adopter un taux d'intérêt correspondant à un taux de rendement brut de 6.5%.

6.4.2.3 Frais fixes

Les frais fixes retenus sont de deux ordres : l'assurance des installations techniques et le coût d'opportunité dû à la surface occupée par ces dernières.

Les installations techniques des bâtiments concernés n'ont pas d'assurance propre. Elles sont indirectement couvertes par l'assurance générale de l'immeuble, dont le montant de la prime annuelle représente environ 1% du coût de l'immeuble. Dans la mesure où le coût du système technique rentre en compte dans l'évaluation du montant assuré, nous avons estimé la valeur d'assurance des installations techniques à 1% de leur coût d'investissement.

La surface occupée par les installations techniques ne peut pas être louée. La CIA estime ce coût d'opportunité (manque à gagner) à environ 100 CHF/m² par an. C'est la valeur que nous avons retenue. On peut relever, par exemple, la différence entre une ventilation à double-flux installée au sous-sol et une installation d'extraction simple posée en toiture. La première représente un coût d'opportunité contrairement à la seconde.

6.4.2.4 Coûts de maintenance et dépannage

Les coûts d'exploitation des installations techniques se répartissent sur trois comptes différents. Les prestations qui entrent dans la catégorie des "frais de chauffage et de préparations d'eau

chaude" définies selon les articles 5 à 8 de l'OBLF², comme par exemple le contrat d'entretien de la chaufferie ou le ramonage des conduits de fumées, sont facturées directement aux locataires via le compte chauffage, dont la gestion est habituellement confiée au régisseur. Tous les autres frais sont à la charge du propriétaire à travers le compte d'exploitation du bâtiment également sous gestion du régisseur. Il se peut aussi que certains travaux soient pris en charge directement par le propriétaire.

Tous les frais ont été répartis entre les charges imputables au système thermique - en faisant la distinction entre compte chauffage et compte d'exploitation - et les charges imputables au système aéraulique. Les valeurs sont en général des moyennes représentatives de plusieurs années d'exploitation.

6.4.2.5 Achat d'énergie

Les énergies prises en compte sont le gaz et l'électricité de la chaufferie pour le système thermique et l'électricité des ventilateurs pour le système aéraulique. Pour harmoniser les comparaisons, tous les calculs ont été faits pour la période de consommation allant du 1er juin 2006 au 31 mai 2007, avec un tarif du gaz de 9 ct/kWh et un tarif de l'électricité de 22 ct/kWh.

6.4.2.6 Honoraires de gestion du compte chauffage

Les honoraires du régisseur relatifs à la gestion du compte de chauffage sont à la charge directe des locataires à travers ce même compte. Nous avons donc inclus ces frais dans les charges globales d'exploitation.

6.4.3 Autres indicateurs

Les autres indicateurs économiques que nous avons calculés sont :

- Le coût de l'ouvrage en CHF/m²
- L'état locatif (loyers) en CHF/m²
- Le ratio : coût du système (thermique, aéraulique) / coût de l'ouvrage en %
- Le ratio : charges d'exploitation / état locatif en %
- Le ratio : achat d'énergie / charges d'exploitation en %

6.5 Commentaire sur la performance technique des systèmes

Deux indicateurs liés à la performance technique des systèmes ont été évalués. Le premier consiste à quantifier la fiabilité de l'installation en mesurant le temps moyen entre deux pannes (mean time between failures - MTBF). Le second tente d'évaluer la complication de l'installation en appliquant une analyse du système par la méthode dite de l'arbre des défaillances (voir [59] pour une présentation de la méthode).

²Ordonnance sur le bail à loyer et le bail à ferme d'habitations et de locaux commerciaux (OBLF). L'article 5 al.1 de l'OBLF stipule notamment "*Entrent en ligne de compte comme frais de chauffage et de préparation d'eau chaude les dépenses effectives directement en rapport avec l'utilisation de l'installation de chauffage ou de l'installation générale de préparation d'eau chaude*". Pour plus de détail sur l'interprétation du droit du bail, on peut se référer à l'ouvrage de Lachat [58], chapitre 14.

Le premier indicateur donne des résultats très intéressants, mais sa mise en oeuvre est assez fastidieuse. L'applicabilité du deuxième indicateur est bonne, mais les résultats sont décevants en terme d'informations obtenues. Nous avons finalement décidé de ne pas les utiliser dans la suite de ce travail. Des informations sur la mise en oeuvre de ces indicateurs, ainsi que sur les résultats de leur évaluation, sont disponibles dans l'étude suivante [60].

La performance technique des systèmes sera indirectement évaluée par le coût des frais de maintenance et de dépannage.

6.6 Conclusions

Une définition claire des systèmes thermiques et aérauliques a été effectuée en premier lieu. Cette étape, nécessaire, permet de bien définir les limites des systèmes étudiés.

Dans un deuxième temps, une liste d'indicateurs a été proposée pour évaluer la performance économique et énergétique de ces systèmes. L'évaluation de la performance technique a été explorée, mais les indicateurs n'ont pas donné entière satisfaction et n'ont pas été retenus.

Il ressort clairement de cette expérience que l'accès à l'information représente la contrainte majeure à l'établissement des indicateurs. En raison du grand nombre d'intervenants, la conception, l'installation et l'exploitation des installations techniques d'un bâtiment génèrent une multitude d'informations dispersées dans l'espace et dans le temps. La récolte de ces informations est un poste chronophage qui ne doit pas être négligé dans le processus de formation des indicateurs.

Chapitre 7

Analyse comparative de plusieurs bâtiments

7.1 Introduction

Ce chapitre compare la performance énergétique et économique du complexe Minergie du Pommier avec neuf autres immeubles de logements : huit réalisations standards et une réalisation Minergie. Les réalisations standards, au sens où nous l'entendons, sont des bâtiments dont l'enveloppe répond uniquement aux exigences légales et dont la production de chaleur est simplement assurée par une chaudière - à gaz dans notre cas.

7.2 Présentation des bâtiments sélectionnés

Dans une optique de comparaison des performances, nous avons recherché des bâtiments dont les caractéristiques sont aussi proches que possible des immeubles du Pommier. Nous avons, pour cela, demandé à la CIA de sélectionner parmi les objets de son parc une dizaine d'immeubles répondants aux critères suivants :

- Immeuble de logements locatif standard (SIA 380/1)
- Surface de référence énergétique (SRE) $\geq 2000 \text{ m}^2$
- Combustible de chauffage : gaz naturel
- Construction récente ≤ 10 ans
- Proche du quartier du Pommier dans la mesure du possible

Huit bâtiments, ou ensemble de bâtiments, ont été retenus et analysés. Un neuvième ensemble a été rajouté par la suite. Il s'agit d'un immeuble Minergie appartenant à la CODHA.

À posteriori, nous savons qu'il aurait fallu compléter cette liste avec le critère suivant : "projet non-réalisé par une entreprise générale". En effet, l'opacité des coûts liée à la prestation globale fournie par les entreprises générales ne permet pas de calculer l'investissement réellement effectué dans les systèmes thermiques et aérauliques. Or, l'amortissement de ces postes représente une part importante dans le calcul des charges d'exploitation. Ce cas concerne trois des huit bâtiments sélectionnés pour lesquels ces calculs n'ont pas pu être effectués.

Chaque bâtiment fait l'objet d'une fiche de description détaillée que l'on trouve à l'annexe E. Cette fiche contient des données techniques, énergétiques et économiques relatives à l'exploitation des systèmes thermiques et aérauliques du bâtiment. Pour faciliter l'exercice de comparaison, un acronyme a été décerné à chaque immeuble. Le Pommier est symbolisé par POMB1.

Caractéristiques	FINS	GIAC	SOU M	TAMB	CARA	MARB	POMB2	POMC12	POMB1	ZABOU
Label Minergie	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓
Mise en service	1997	1997	2000	2001	2001	2003	2004	2005	2004	2004
Nbr de bâtiments	1	1	2	1	2	3	1	4	3	2
Nbr de chaufferies	1	1	1	1	1	3	1	2	1	1
Nbr de Logements	21	30	32	80	42	125	25	118	117	29
SRE [m ²]	2'264	3'526	4'212	10'303	4'073	14'124	3'471	12'658	20'915	4'044
Solaire thermique [m ²]	-	-	-	136	-	-	44	-	194	72
Double-flux	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓ ^(a)	✓
Distribution de chaleur ^(b)	Rad	Plaf	Sol	Rad	Sol	Sol	Sol	Sol	Rad	Sol
Combustible	gaz	gaz	gaz	gaz	gaz	gaz	gaz	gaz	gaz	bois
IDC [MJ/m ² .an] ^(c)	579	544	575	471	515	484	386	527	209	267
ECS [MJ/m ² .an] ^(d)	86	104	106	97	89	-	-	112	76	89
Électricité chauff. [MJ/m ² .an] ^(e)	6.4	5.3	7.8	7.7	8.1	2.1-6.2	9.7	8.4	4.9	5.6
Électricité ventil. [MJ/m ² .an] ^(f)	7.2	-	18.0	-	16.6	-	18.0	7.2	36.0	11.3

(a) Une pompe à chaleur est également installée sur l'air vicié.

(b) Rad = radiateurs, Sol = chauffage au sol, Plaf = chauffage par plafond.

(c) Moyenne sur plusieurs années des indices corrigés du climat. Gaz calculé au PCS (ZABOU = gaz équivalent).

(d) Moyenne sur plusieurs années d'exploitation. Hypothèse 176 MJ/m³.

(e) Moyenne sur plusieurs années d'exploitation.

(f) Valeur POMB1 mesurée, les autres estimées. Voir le texte.

TAB. 7.1 – Caractéristiques générales des bâtiments étudiés. Tous les objets font partie du parc de la CIA à l'exception de ZABOU qui appartient à la CODHA. POMB1 est le complexe du Pommier.

Le Tableau 7.1 propose une synthèse des caractéristiques principales de ces immeubles à laquelle on pourra se référer pour avoir une vue globale des objets étudiés. Ces données ont fait l'objet d'une étude détaillée dont les résultats sont présentés dans la section suivante.

7.3 Performance énergétique

7.3.1 Consommation gaz-électricité

7.3.1.1 Présentation des résultats

La Figure 7.1 représente la consommation moyenne des fluides destinés à la production et à la distribution de la chaleur : gaz et électricité. Les consommations de gaz ont été corrigées des variations climatiques sur la base du modèle standard décrit à l'annexe C. L'indice électrique englobe la consommation de tous les systèmes actifs permettant de produire et de distribuer la chaleur : chaudière, pompes de circulation, ventilateur de pulsion dans le cas d'un double-flux et pompe à chaleur.

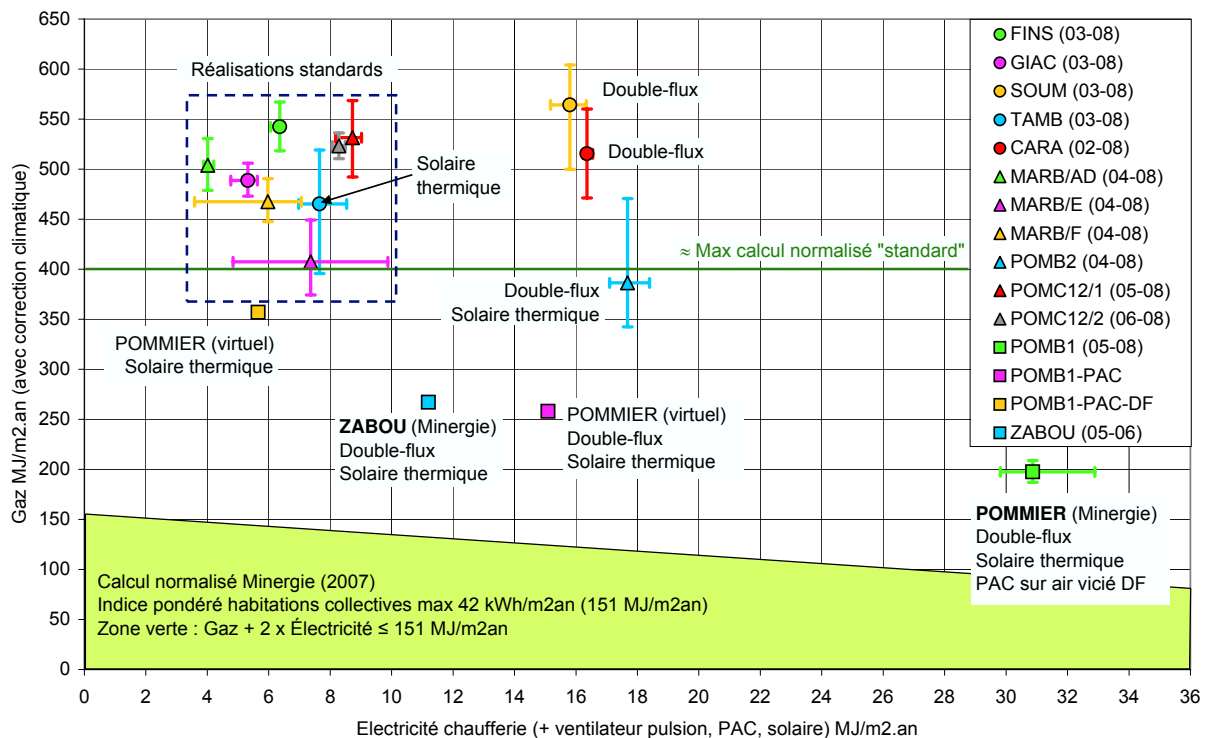


FIG. 7.1 – Consommation moyenne des fluides destinés à la production et à la distribution de la chaleur - gaz et électricité - exprimée en MJ/m².an. Les consommations de gaz ont été corrigées des variations climatiques. Les années d'observation sont indiquées dans la légende. L'électricité englobe tous les systèmes actifs permettant de produire et de distribuer la chaleur. Les barres d'erreurs représentent les variations annuelles extrêmes observées (avec correction climatique). ZABOU est chauffé au bois mais exprimé ici en équivalent-gaz.

Les observations couvrent généralement plusieurs années d'exploitation. Celles-ci sont indiquées entre parenthèses sur la légende de la Figure. La fenêtre d'observation correspond à la disponibilité des données sur les consommations électriques. Les indices du gaz peuvent donc différer des

valeurs données dans la Table 7.1. Ces indices varient d'une année à l'autre et les extrêmes observés - avec correction climatique pour le gaz - sont illustrés par les barres d'erreurs sur le graphique.

L'ensemble ZABOU est chauffé au bois mais a été représenté ici en équivalent-gaz en considérant un rendement annuel de la chaudière de 80% PCS. Le complexe MARB est composé de trois bâtiments indépendants, chacun possédant sa propre chaufferie (MARB/AD, /E et /F). Idem pour POMC12/1 et /2. Les complexes SOUM, CARA, POMB1 et ZABOU sont composés de plusieurs bâtiments, mais ils partagent une chaufferie centralisée.

Le complexe du Pommier est représenté par POMB1. Les mesures effectuées sur ces bâtiments nous ont permis de considérer les deux scénarios suivants. Dans le premier, la pompe à chaleur sur air vicié (PAC) n'est pas installée. Cette alternative est représentée sur le graphique par le bâtiment virtuel POMB1-PAC. Dans le deuxième scénario, c'est l'intégralité du système de ventilation à double-flux, dont la PAC fait partie, qui n'est pas installé. Cette alternative est représentée sur le graphique par le bâtiment virtuel POMB1-PAC-DF.

L'indice de gaz normalisé que l'on peut attendre d'une réalisation standard est de l'ordre de 400 MJ/m²an. Cette valeur a été obtenue sur la base des justificatifs thermiques des bâtiments étudiés (voir l'annexe E pour les hypothèses de calcul). Cette limite est indiquée sur le graphique.

La zone verte représente l'espace des consommations possibles pour l'obtention du label Minergie, selon les valeurs mentionnées dans le règlement 2007. L'indice pondéré maximum pour la catégorie des habitations collectives est de 42 kWh/m²an, soit 151 MJ/m²an. Les facteurs de pondération utilisés sont de 1 pour le gaz et de 2 pour l'électricité.

Minergie comptabilise la consommation électrique des deux ventilateurs du double-flux, mais pas celle de la chaufferie (chaudière et pompes de circulation). Dans notre cas, nous avons pris en compte uniquement la consommation du ventilateur de pulsion, mais par contre, nous avons intégré celle de la chaufferie. En terme de consommation annuelle, cette dernière compense approximativement celle du ventilateur manquant, rendant ainsi la comparaison des valeurs tout à fait pertinente.

Finalement, l'impact d'une installation solaire thermique sur la consommation d'énergie d'une réalisation standard est plus petit que les fluctuations "naturelles" que l'on peut observer sur le gaz et l'électricité. Un système solaire thermique intégré dans un immeuble de logement génère approximativement entre 25 et 45 MJ/m² de chaleur par an et la consommation électrique moyenne des circulateurs est de l'ordre de 1 MJ/m²an. Son intégration n'est donc pas "visible" dans une analyse comme celle-ci : l'outil de mesure n'est pas adapté.

7.3.1.2 Performance des réalisations standards

Les réalisations standards évoluent dans une zone de consommation annuelle moyenne centrée sur 470 MJ/m² de gaz et 7 MJ/m² d'électricité, avec une dispersion assez importante de l'ordre de ± 100 MJ/m² pour le gaz et ± 3 MJ/m² pour l'électricité. On rappelle ici que les indices du gaz ont été corrigés des variations climatiques au moyen des facteurs décrit à l'annexe C. Sans être une correction absolue, cette méthode permet néanmoins de s'assurer que l'influence du climat sur la consommation a été fortement réduite.

7.3.1.3 Mouvements "Browniens" dans l'espace des consommations

Malgré la normalisation climatique des mesures, on observe que la grande majorité des bâtiments "oscillent" autour de leur position moyenne. Aucune tendance générale ne semble se dessiner, on assiste plutôt à ce que l'on pourrait qualifier de mouvement "Brownien", pour reprendre l'expression du célèbre botaniste écossais. Les trois facteurs principaux que l'on trouve très certainement à l'origine de ces variations sont :

1. Une correction incomplète des effets climatiques
2. Le comportement des habitants
3. La performance des installations techniques

Le modèle de normalisation climatique utilisé corrige uniquement l'effet dû aux variations de température. En revanche, des facteurs d'influence comme l'ensoleillement ou le vent ne sont pas pris en compte dans ce modèle.

Le comportement des habitants influence directement la demande de chaleur (bain versus douche, fenêtre entrebâillée en hiver, etc). Ce facteur est de nature stochastique, mais on peut éventuellement en diminuer les effets en augmentant le degré de connaissance des utilisateurs.

La performance des installations techniques agit sur l'efficacité des processus de transformation, de stockage et de transport de la chaleur. C'est un facteur probabiliste dans la mesure où le taux de panne moyen de chaque élément peut être déterminé par l'expérience. Un suivi de qualité des installations permet d'en atténuer les conséquences sur la consommation d'énergie.

L'ensemble CARA est le seul des bâtiments étudiés ayant fait l'objet d'un contrat de maintenance incluant un objectif d'amélioration de la performance. Cette action, qui a engendré une baisse notable de l'indice de chaleur, se matérialise évidemment sur le graphique par une forte variation verticale.

Il ressort de cette analyse que l'information joue un rôle essentiel dans la pérennité de la performance énergétique. Elle permet de modifier le comportement d'un système complexe (ensemble des habitants) et de réguler la performance d'un système compliqué (installations techniques).

7.3.1.4 Benchmarking des réalisations Minergies

La mise en oeuvre d'une très bonne enveloppe thermique et l'intégration de systèmes actifs permettent à l'ensemble Minergie ZABOU de consommer environ 40% de gaz en moins que les réalisations standards (470 MJ/m²an de gaz et 7 MJ/m²an d'électricité), mais au prix d'une consommation électrique 1.6 fois plus élevée. Le complexe du Pommier (POMB1) consomme environ 60% de gaz en moins, mais 4.4 fois plus d'électricité !

Le Tableau 7.2 présente le facteur de substitution global gaz-électricité des réalisations les plus performantes ($\Delta\text{Gaz}/\Delta\text{Électricité}$). Ces variations sont exprimées relativement à la consommation moyenne des bâtiments standards. Le facteur global représente la somme vectorielle de l'action sur l'enveloppe et de l'intégration de systèmes actifs.

L'indice du gaz de l'ensemble Minergie ZABOU est proche de celui qu'aurait eu le Pommier si la pompe à chaleur sur air vicié n'avait pas été installée (POMB1-PAC). En revanche, ZABOU valorise beaucoup mieux sa consommation électrique supplémentaire : chaque unité électrique permet

(MJ/m ² an)	Caractéristiques	Gaz	Électricité	Δ Gaz/ Δ Électricité
Référence	Standard	470	7	0
ZABOU	Minergie + DF + SOL	267	11.2	-48
POMB1-PAC	Minergie + DF + SOL	258	15.1	-26
POMB1	Minergie + DF + SOL + PAC	198	30.9	-11
POMB2	Standard + DF + SOL	386	17.7	-8

TAB. 7.2 – Consommations en MJ/m²an et facteur de substitution global gaz-électricité des réalisations performantes. Les variations sont exprimées relativement à la consommation moyenne des bâtiments standards. DF = double-flux, SOL = solaire thermique, PAC = pompe à chaleur sur air vicié du DF.

d'économiser 48 unités de gaz, contre 26 pour le Pommier.

Le bâtiment standard POMB2, qui intègre des systèmes actifs sans amélioration conséquente de l'enveloppe thermique, substitue 8 unités de gaz par unité d'électricité. Le Pommier, tel qu'il est exploité aujourd'hui, possède la plus faible consommation de gaz, mais sa valorisation de l'électricité est à peine supérieure à celle du bâtiment standard POMB2.

7.3.1.5 L'effet "attracteur" des seuils normalisés

Tous les bâtiments standards ont une consommation moyenne de gaz qui se situe au-dessus de la limite normalisée des 400 MJ/m²an. Le dépassement moyen est de l'ordre de 70 à 90 MJ/m²an. La même observation peut être faite avec les réalisations Minergie, dont le dépassement de l'indice de gaz est de l'ordre de 100 à 120 MJ/m²an par rapport à la limite du standard (zone verte).

Il est intéressant de constater que l'écart moyen entre la mesure et le seuil calculé est du même ordre de grandeur pour les bâtiments standards et les bâtiments Minergies. De plus, relativement au seuil standard des 400 MJ/m²an, on constate qu'un abaissement de l'indice maximum de gaz d'environ 250 MJ/m²an pour atteindre le standard Minergie, provoque une baisse de la consommation réelle de gaz du même ordre de grandeur - environ 200 à 270 MJ/m²an - avec toutefois une augmentation de la consommation électrique de l'ordre de 4 à 24 MJ/m²an.

Ces observations mettent en évidence l'effet "attracteur" des seuils normalisés et leur rôle prépondérant dans la stratégie énergétique des bâtiments. La position de ces seuils est plus importante que les dépassements qui semblent constants et maîtrisés. Le standard Minergie induit un glissement "SUD-EST" dans l'espace des consommations gaz-électricité.

7.3.2 Signature énergétique

7.3.2.1 Présentation des résultats

La signature énergétique d'un bâtiment représente la puissance de chauffage requise par le bâtiment en fonction de la température extérieure. La signature gaz a été réalisée pour tous les bâtiments étudiés (voir les annexes E). Un exemple de signature est représenté à la Figure 7.2.

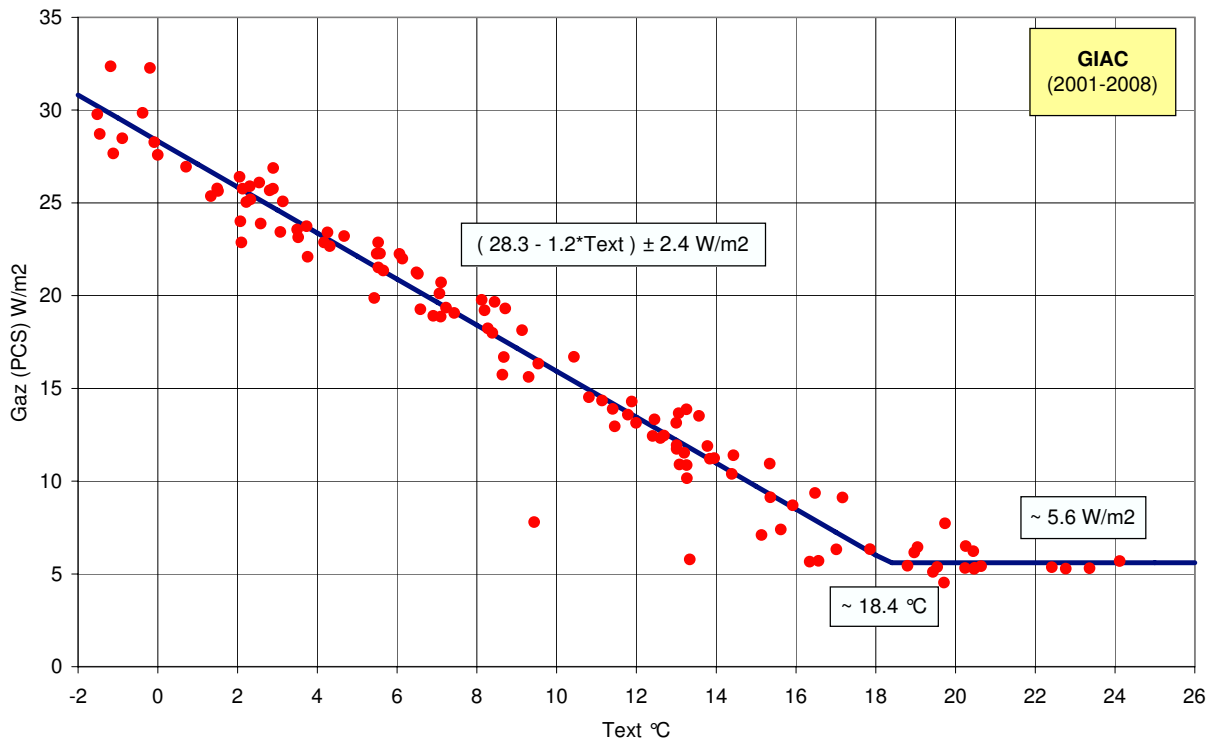


FIG. 7.2 – Exemple de signature énergétique gaz d’un bâtiment standard (GIACO). La puissance thermique est exprimée en W/m^2 au pouvoir calorifique supérieur.

La puissance thermique est exprimée en W/m^2 au pouvoir calorifique supérieur du gaz. Les températures proviennent de l’Institut suisse de météorologie [38]. Les données pertinentes relevées sur ces signatures sont : la pente, l’ordonnée à l’origine (puissance à $0^\circ C$), la température de non chauffage et la puissance fournie en dehors des périodes de chauffage (production uniquement de l’ECS).

7.3.2.2 Caractéristiques des signatures

La pente de la signature représente la sensibilité thermique de l’enveloppe. Cette sensibilité englobe aussi bien les pertes par transmission à travers l’enveloppe physique (murs, fenêtres, etc) que les pertes par renouvellement d’air. La puissance fournie lorsque la température extérieure est de $0^\circ C$ (ordonnée à l’origine) reflète également la sensibilité de l’enveloppe mais intègre en plus la puissance nécessaire à la préparation de l’ECS, les pertes techniques ainsi que les gains gratuits.

La Figure 7.3 présente ces deux grandeurs mesurées en fonction de l’IDC moyen corrigé des variations climatiques. Ces deux graphiques confirment la corrélation qui existe entre les caractéristiques de la signature et la consommation annuelle du bâtiment. L’ordonnée à l’origine est un indicateur beaucoup plus précis pour estimer l’IDC moyen, notamment dans la plage comprise entre 15 et $30 W/m^2$. On peut estimer la consommation moyenne simplement avec la relation suivante :

$$IDC_{normalise} = (23.8P_o - 180) \pm 19.2 \quad MJ/m^2an \quad (7.1)$$

où P_o représente la puissance fournie à $0^\circ C$ exprimée en W/m^2 .

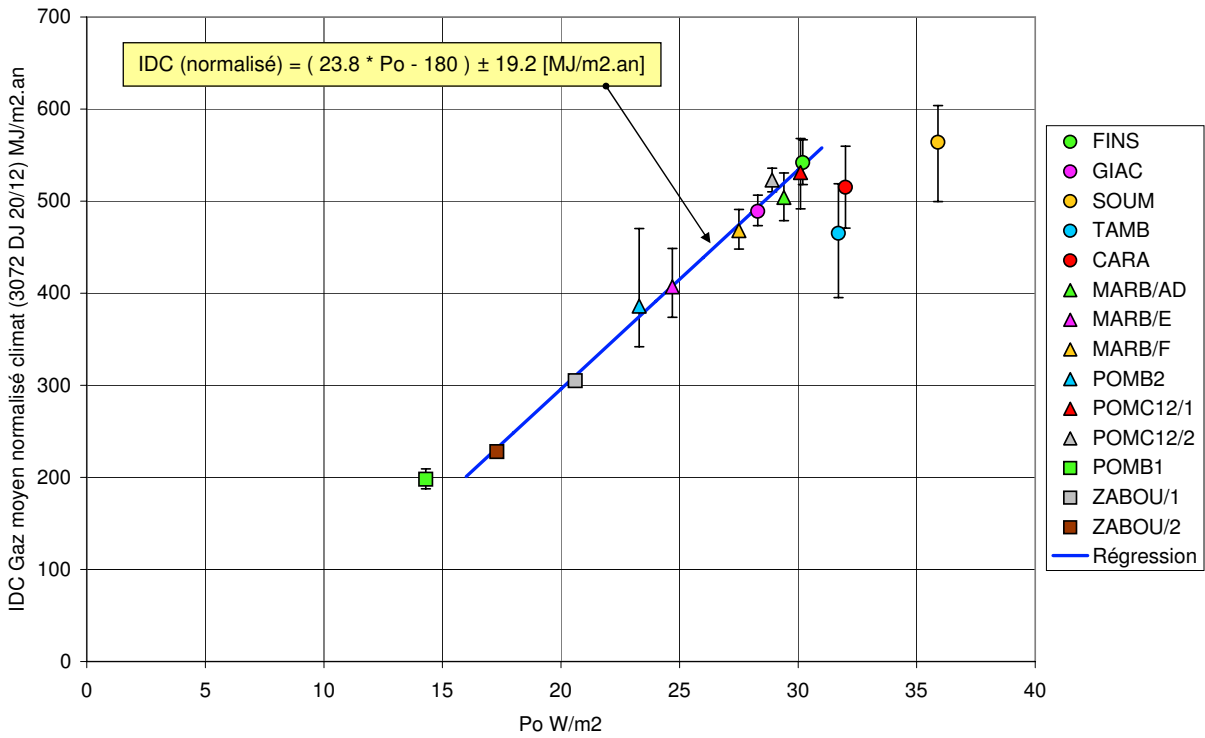
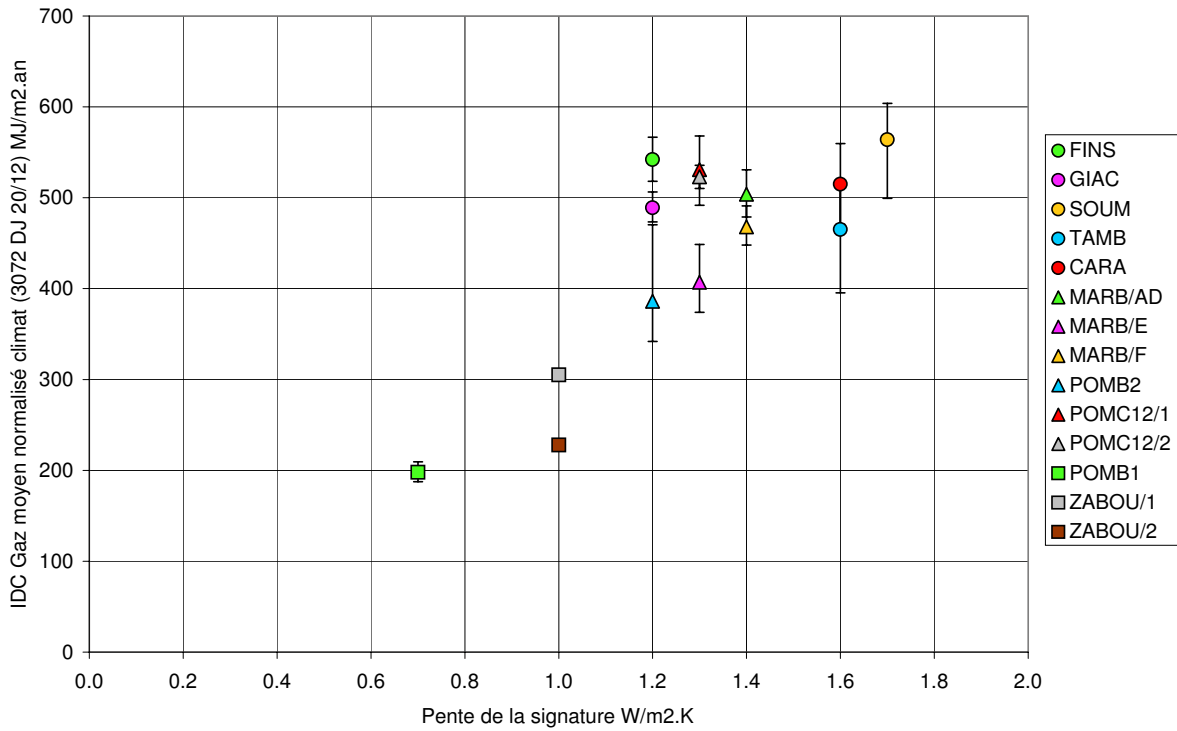


FIG. 7.3 – Pente (haut) et ordonnée à l’origine (bas) des signatures représentées en fonction de l’IDC moyen corrigé du climat. Les barres d’erreurs représentent les valeurs min/max atteintes lors de l’exploitation.

7.3.2.3 Puissance thermique estivale

En dehors des périodes de chauffage, la signature devient horizontale car la production d'ECS est très peu sensible à la température extérieure. Sur la plupart des signatures, on observe cette transition aux alentours des 18°C. La Figure 7.4 représente la puissance demandée de quelques bâtiments lorsque la température extérieure est supérieure à 20°C.

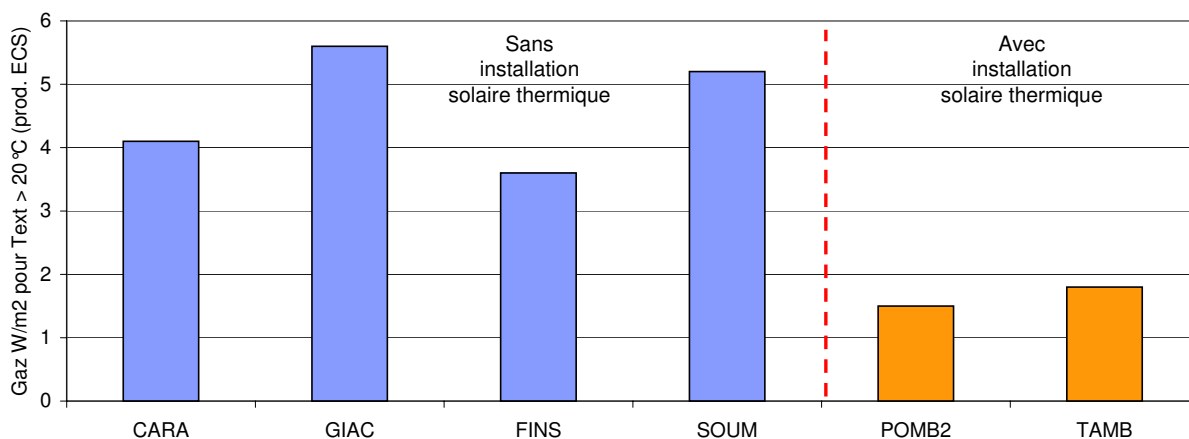


FIG. 7.4 – Puissance demandée en période estivale servant uniquement à la production de l'ECS. Seuls les deux bâtiments situés à droite (en orange) possèdent une installation solaire thermique.

La puissance moyenne est de l'ordre de 4 W/m² pour un bâtiment standard. L'intégration d'une installation solaire thermique permet de diviser cette puissance par deux comme le montre les mesures des bâtiments POMB2 et TAMB (surface installée d'environ 0.5 m² par habitant).

7.3.2.4 Dimensionnement des chaudières

La signature permet de mesurer, ou d'extrapoler, la puissance demandée lorsque la température atteint la valeur de dimensionnement des installations. Cette température est de -5°C pour Genève. Le ratio entre la puissance installée et cette puissance à -5°C donne une indication sur le dimensionnement de la chaudière.

La Figure 7.5 représente ce facteur en fonction de la puissance installée. Il est important de garder à l'esprit, lors de l'analyse de ces mesures, que le facteur de dimensionnement dépend non seulement de la puissance de la chaudière installée, mais également de la consommation de l'immeuble.

En admettant une réserve de puissance de 15% pour la relance matinale, on peut en conclure que toutes les installations dont la puissance spécifique dépasse 40 W/m² sont actuellement surdimensionnées. Les bâtiments MARB et POMB2, qui se situent entre 55 et 60 W/m², sont étonnants dans la mesure où ce sont des bâtiments récents qui ont été réalisés respectivement en 2003 et en 2004.

Les bâtiments Minergie permettent de passer sous la barre des 30 W/m² installés. Ces mesures montrent cependant que la puissance installée pourrait être encore réduite aux alentours de 18 W/m² pour POMB1 et de 25 W/m² pour ZABOU.

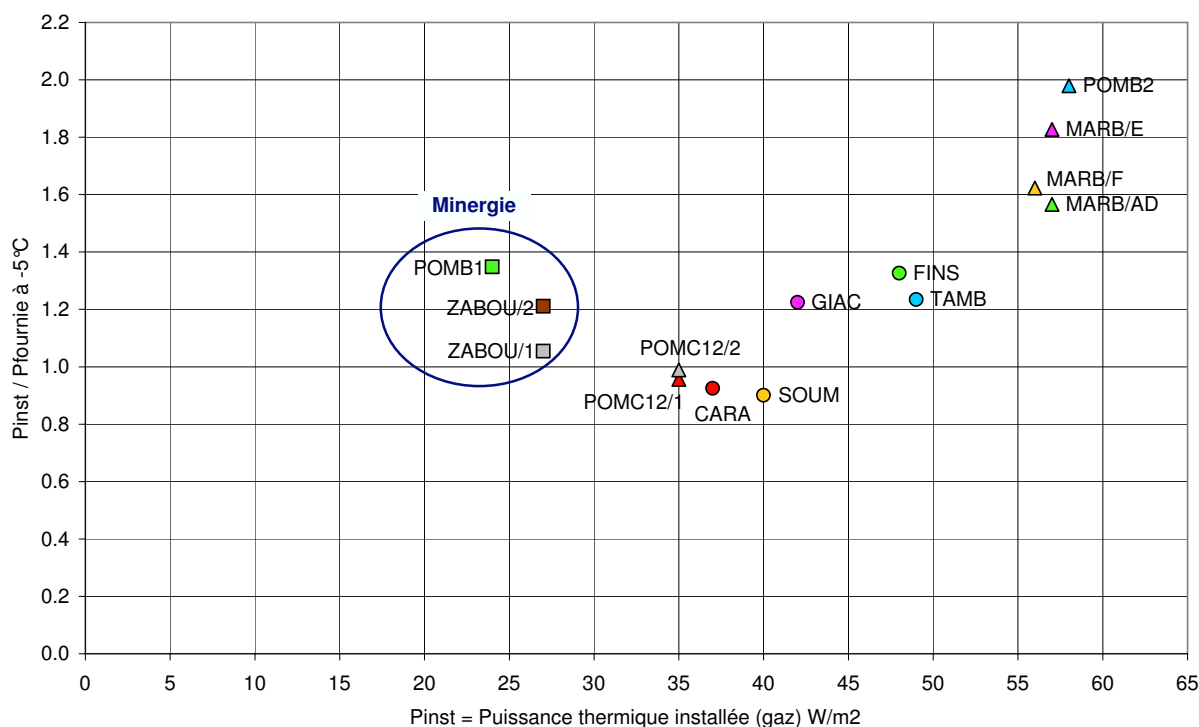


FIG. 7.5 – Facteur de dimensionnement des chaudières représenté en fonction de la puissance installée. Ce facteur représente le ratio entre la puissance installée et la puissance demandée lorsque la température extérieure correspond à la valeur de dimensionnement, soit -5°C pour Genève.

Les contraintes liées au dimensionnement de la puissance de chauffage favorisent naturellement un surdimensionnement de l'installation. En effet, l'incertitude sur la demande finale de chaleur, que l'ingénieur en charge du dossier ne maîtrise pas, amène naturellement ce dernier à intégrer dans ses calculs une certaine marge de sécurité. Une installation qui ne délivre pas la performance souhaitée sera une source de problème pour ce dernier, alors que l'inverse n'est pas vrai.

Concernant les réalisations Minergie, il est probable qu'à ce facteur s'en rajoutent deux autres : une couverture de sécurité pour pallier au dysfonctionnement des systèmes actifs et une confiance limitée - mais justifiable au regard des expériences passées - dans la performance des nouvelles enveloppes thermiques.

7.3.3 Consommation d'eau chaude sanitaire (ECS)

Le volume d'ECS consommé a été relevé sur certains bâtiments. La quantité d'énergie associée au chauffage de ce volume d'eau dépend de la température du réseau et de la température de distribution. Pour simplifier, nous avons utilisé un facteur constant de 176 MJ/m^3 basé sur les hypothèses suivantes : température annuelle moyenne du réseau de 13°C et température de distribution de l'ECS de 55°C . Le graphique du haut de la Figure 7.6 représente les consommations annuelles moyennes en $\text{MJ/m}^2\text{an}$ ainsi que la surface moyenne des pièces (SRE).

La consommation d'ECS varie entre 76 et $121 \text{ MJ/m}^2\text{an}$ avec une moyenne, sur les bâtiments observés, de $97 \text{ MJ/m}^2\text{an}$. Cette valeur est environ 30% plus élevée que la valeur de dimensionnement suggérée par la SIA ($75 \text{ MJ/m}^2\text{an}$).

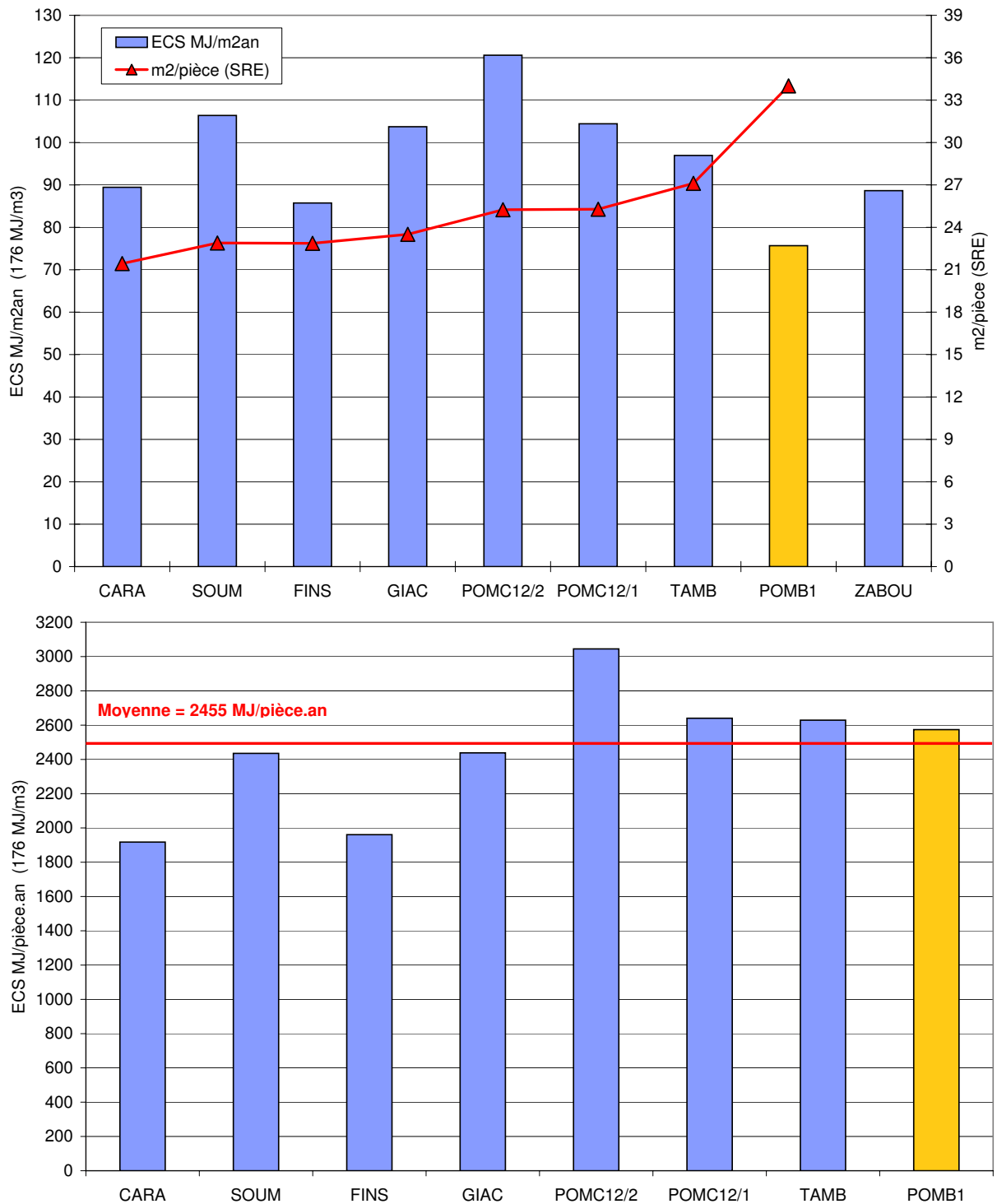


FIG. 7.6 – Consommation d'ECS annuelle moyenne exprimée en MJ/m².an (haut) et en MJ/pièce.an (bas), basée sur un contenu énergétique moyen de 176 MJ/m³. La surface spécifique des pièces est également représentée (SRE).

Avec une consommation de 76 MJ/m²an pour l'ECS, le complexe du Pommier (POMB1) est le seul objet à être dans la cible SIA. Il faut cependant relativiser cette bonne performance. En effet, tout porte à croire que la consommation de l'ECS dépend avant tout du nombre d'usagers et de leurs habitudes. On peut également supposer que le nombre de pièces est mieux corrélé au nombre d'habitants que la surface du logement. La surface spécifique des pièces du Pommier est environ 40% plus élevée que la moyenne des autres bâtiments. La consommation des habitants est "diluée" sur une plus grande surface. Pour illustrer ce fait, nous avons représenté dans le graphique du bas de la Figure 7.6 la consommation annuelle exprimée en MJ par pièce.

Le Pommier se situe parfaitement dans la moyenne des consommations qui se trouve à 2455 MJ par pièce et par an.

7.3.4 Indice de dépense de chaleur (IDC)

7.3.4.1 Évolution de l'IDC

La Figure 7.7 représente l'évolution de l'IDC normalisé des bâtiments étudiés.

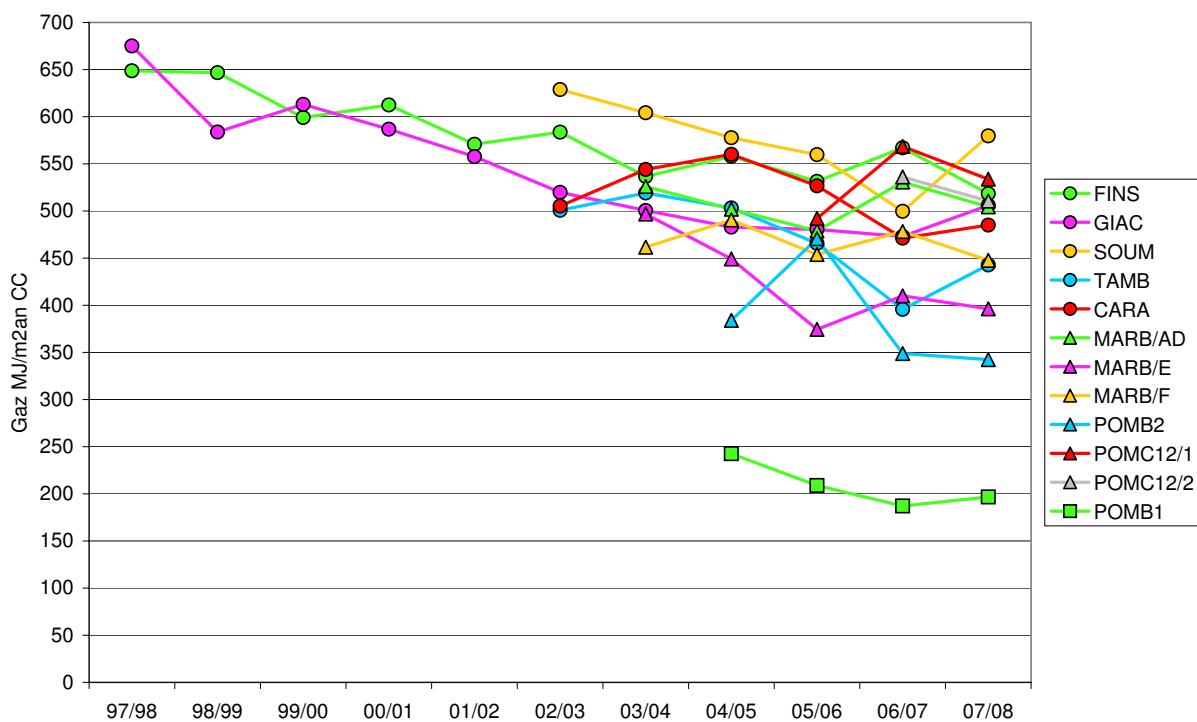


FIG. 7.7 – Évolution de l'IDC normalisé des bâtiments.

L'indice des anciens bâtiments comme FINS, GIAC et même SOUM a régulièrement baissé au cours des années pour finalement se stabiliser. Le fruit certainement d'une optimisation des installations. Il est intéressant de constater que, lors de leur mise en service, les bâtiments plus récents ne sont pas forcément plus performants que les anciens bâtiments optimisés. On constate également que l'indice peut varier considérablement les premières années d'exploitation.

7.3.4.2 IDC calculé versus mesuré

Nous avons estimé la consommation des bâtiments en conditions normalisées sur la base du justificatif thermique de ceux-ci. Ce document, prérequis obligatoire pour l'obtention de l'autorisation

de construire, certifie que l'enveloppe thermique du bâtiment répond aux exigences légales en vigueur au moment de la procédure. Nous avons ensuite fait des hypothèses concernant la performance des systèmes actifs installés, en choisissant délibérément des valeurs pessimistes par rapport aux performances réelles que peuvent afficher les meilleurs systèmes :

Objet	Valeur	Commentaire
Demande en ECS	75 MJ/m ² an	Selon SIA 380/1
Gain double-flux simple	45 % des pertes ventilation	Selon [45]
Solaire thermique	600 kWh/m ² capteur.an	Selon [39] et ce travail
Rendement global	80 % (PCS)	Selon ce travail

TAB. 7.3 – Hypothèses retenues pour l'estimation de l'IDC des bâtiments.

Toutes ces valeurs sont disponibles dans les fiches des immeubles se trouvant à l'annexe E. La Figure 7.8 représente cet IDC estimé (calculé) ainsi que la valeur moyenne mesurée et normalisée.

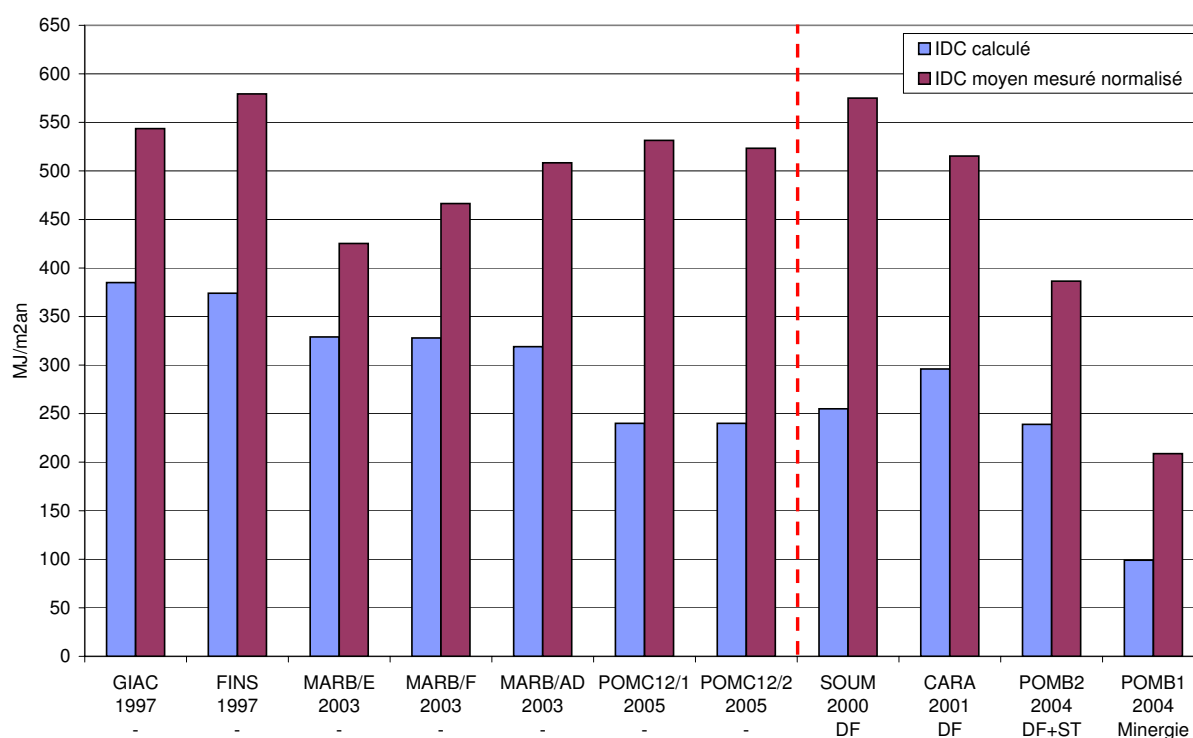


FIG. 7.8 – IDC calculé versus IDC mesuré normalisé. DF = double-flux et ST = solaire thermique.

La réalité des consommations se situe entre 30% et 120% au dessus de la valeur calculée, avec une valeur moyenne de 70%. Cet écart n'a rien de surprenant, dans la mesure où la normalisation des mesures corrige les effets liés au climat, mais pas les conditions d'utilisation du bâtiment comme la consommation d'ECS, la température des logements ou le taux de renouvellement d'air. Une sous-évaluation de la performance thermique de l'enveloppe accroît également cette différence (ponts thermiques, exfiltration d'air, etc).

Finalement, la qualité de l'exécution peut également affecter négativement la performance énergétique des bâtiments. Le complexe MARB illustre bien l'incertitude qui plane sur l'estimation de la

consommation réelle. Les trois immeubles qui forment ce complexe sont de conception identique (E et F identiques en tous points) et pourtant chacun possède un IDC différent.

7.4 Diffusion des solutions Minergie observées

7.4.1 Objectif et stratégie

Réduire la consommation d'énergies fossiles dans les bâtiments est une priorité dictée par la double contrainte environnementale et économique. Pour atteindre cet objectif, il faut non seulement développer des réalisations à haute performance énergétique, mais également assainir le patrimoine bâti en diffusant les solutions les plus pertinentes.

La stratégie employée pour construire des bâtiments à haute performance énergétique repose sur les trois piliers complémentaires suivants :

1. Réduire la demande nette de chaleur
2. Intégrer des énergies renouvelables
3. Valoriser les rejets thermiques

Le premier est mis en oeuvre, par exemple, au moyen d'une enveloppe thermique performante (isolation, ponts thermiques, etc) ou d'une utilisation optimale des gains solaires. On parle alors de systèmes passifs, car leur exploitation ne nécessite pas d'énergie : on substitue de l'énergie de chauffage par de la matière et/ou de la matière grise.

La mise en oeuvre des points 2 et 3 nécessite, dans la majorité des cas, l'emploi de systèmes actifs qui substituent plus ou moins efficacement de l'énergie de chauffage par de l'électricité. C'est le cas notamment des pompes à chaleur, des systèmes de ventilation à double-flux et même des installations solaires thermiques.

7.4.2 Point de situation et tendance

Le graphique de la Figure 7.9 illustre la situation actuelle, représentée par les réalisations standards, l'objectif de réduction des énergies fossiles à atteindre et les résultats des deux réalisations Minergie mesurées.

La mise en oeuvre des solutions Minergie ne permet pas de tendre directement vers l'objectif. Si la réduction des énergies fossiles est bien réelle, elle est accompagnée d'une augmentation de la consommation électrique. La contribution d'une enveloppe thermique performante permet cependant à ces réalisations d'afficher un coefficient de performance apparent élevé (COP). Chaque unité d'électricité consommée par ZABOU permet d'économiser 48 unités de gaz. Une performance plus que remarquable. Le Pommier possède un COP apparent de 11 qui est imputable, en partie, à l'intégration d'une pompe à chaleur sur l'air vicié.

Quel est l'impact sur la consommation énergétique globale d'un déploiement à large échelle de ces solutions ? L'assainissement énergétique du patrimoine bâti passera, dans la grande majorité des cas, par une intégration de ces systèmes dans les bâtiments existants et non pas par un remplacement de ceux-ci. Les résultats de ce travail ne peuvent donc pas s'appliquer *stricto sensu* à un scénario de rénovation. En revanche, on peut tout à fait les utiliser pour évaluer les enjeux énergétiques, et en particulier celui de l'augmentation de la consommation électrique.

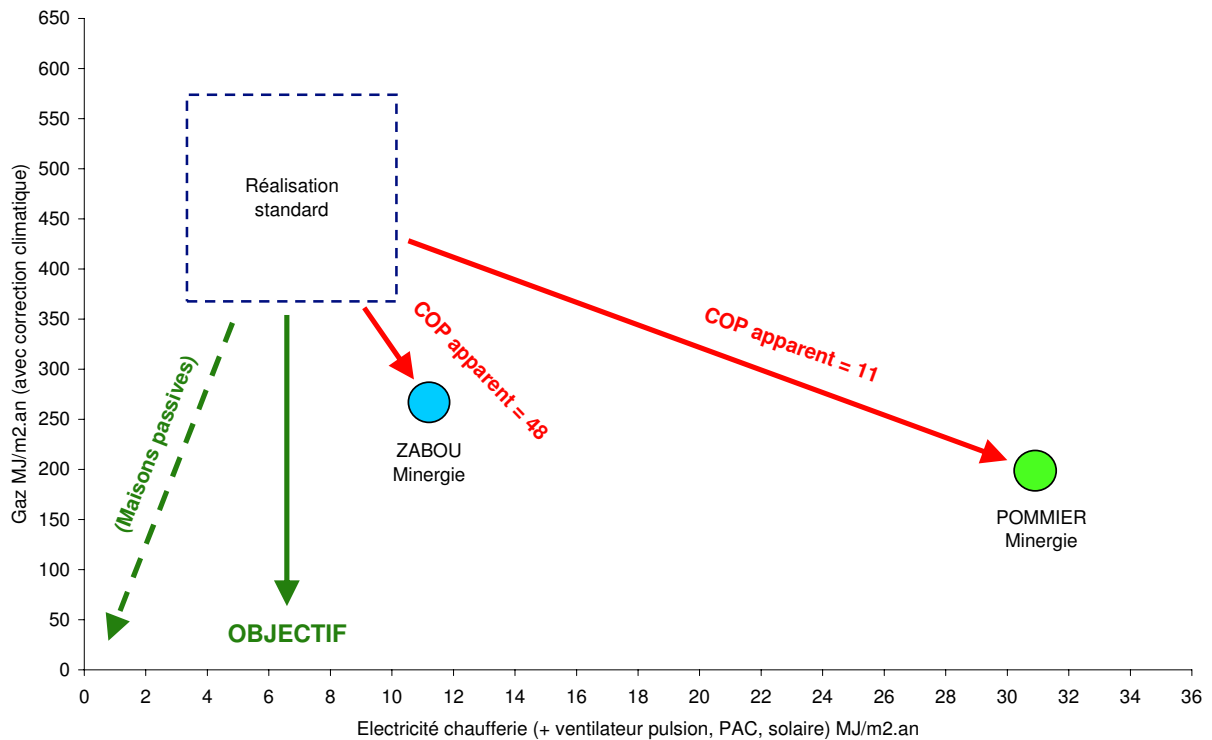


FIG. 7.9 – Diffusion à large échelle des solutions étudiées. Situation actuelle (réalisations standards), objectif de réduction des énergies fossiles et réalité observée.

7.4.3 Évaluation des enjeux énergétiques

Le parc genevois est composé d'environ 40'000 bâtiments, dont 36'000 sont dédiés aux logements. Le Service cantonal de l'énergie (ScanE) possède une liste d'environ 6'000 allées. Nous avons sélectionné dans cette liste les bâtiments dont l'IDC est supérieur à 400 MJ/m².an et dont la SRE est au moins de 1'500 m². La sélection représente un groupe de 2'800 objets, dont la consommation en énergie fossile représente 22% de la consommation cantonale en énergie de chauffage. Nous avons ensuite estimé l'impact sur la consommation d'énergie cantonale d'une diffusion des solutions ZABOU et POMBI sur cet échantillon. Les résultats sont présentés dans le Tableau 7.4.

Consommation canton de Genève	2007	Unité	ZABOU	POMBI
Énergie fossile de chauffage (gaz + mazout)	19'492	TJ	-8.5%	-11.4%
Électricité (sans CERN)	2'876	GWh	+0.3%	+1.9%
Électricité services généraux immeubles	325	GWh	+2.9%	+16.6%

TAB. 7.4 – Diffusion des solutions ZABOU et POMBI sur un échantillon de 2'800 objets à Genève représentant 22% de la consommation d'énergie fossile pour le chauffage. La sélection concerne des bâtiments dont l'IDC est supérieur à 400 MJ/m².an et dont la SRE est au moins de 1'500 m².

Le déploiement sur l'échantillon d'une solution ZABOU diminue la consommation cantonale en énergie de chauffage de 8.5%, mais augmente la consommation électrique cantonale de 0.3% et celle des services généraux de 2.9%. La diffusion d'une solution POMBI diminue le fossile de 11.4%, mais augmente la consommation électrique cantonale de 1.9%, soit l'équivalent de presque

3 barrages du Seujet.

Les résultats de cette estimation montrent que le déploiement de certaines solutions dites à "haute performance énergétique" peut avoir un impact non négligeable sur la consommation électrique globale. Il ressort clairement de cette analyse qu'une stratégie "électro-thermique" cohérente, à l'échelle cantonale ou nationale, est nécessaire si l'on décide d'atteindre l'objectif en diffusant largement des solutions de type POMB1. L'autre solution consisterait à changer les règles du jeu pour réorienter la trajectoire vers l'objectif initial (i.e. modifier le rapport enveloppe/technologie).

7.5 Performance économique

7.5.1 Introduction

Les cinq bâtiments ayant fait l'objet d'une analyse économique approfondie sont listés dans la Table ci-dessous :

Caractéristiques	FINS	POMC12	CARA	POMB2	POMB1
Adjudication travaux	1995	2003	1999	2001	2003
IPC année adjudication	106.1	116.2	100.3	113.2	116.2
Mise en service	1997	2005	2001	2004	2004
SRE [m ²]	2'264	12'658	4'073	3'471	20'915
Label Minergie	-	-	-	-	✓
Solaire thermique	-	-	-	✓	✓
Double-flux	-	-	✓	✓	✓
Distribution de chaleur	Radiateur	Sol	Sol	Sol	Radiateur

TAB. 7.5 – Caractéristiques principales des bâtiments ayant fait l'objet d'une analyse économique. IPC = indice des prix à la construction à Genève (office cantonal de la statistique). Remarque : le double-flux de POMB1 intègre une PAC sur l'air vicié.

Les coûts d'investissement ont été corrigés des fluctuations économiques sur la base de l'indice genevois des prix de la construction de logements [61]. L'année 2003 a été choisie comme référence et les indices de correction des autres ouvrages correspondent à l'année d'adjudication des travaux.

L'amortissement des installations est calculé sur une période de 20 ans avec un taux d'intérêt de 6.5%. Les consommations d'énergie prises en compte correspondent aux valeurs mesurées pendant la période allant du 1er juin 2006 au 31 mai 2007.

Le coût d'investissement du système thermique est, de manière évidente, corrélé avec la qualité thermique de l'enveloppe et avec les caractéristiques du système de ventilation. En effet, le dimensionnement de l'installation de chauffage sera d'autant plus réduit que l'isolation sera performante et que les rejets thermiques seront diminués (e.g. double-flux). Il est important de garder cette considération à l'esprit lors de l'interprétation des résultats.

7.5.2 Coût d'investissement et d'exploitation des systèmes

7.5.2.1 Système thermique : investissement & exploitation

La structure du coût d'investissement est représentée dans le graphique du haut de la Figure 7.10. Le coût d'investissement d'un système thermique traditionnel varie entre 75 et 100 CHF/m² (FINS, POMC12 et CARA). La distribution de la chaleur représente la majeure partie de l'investissement avec environ 60% du coût total.

Les données de POMB1 et POMB2 montrent que le coût TTC de l'installation solaire thermique revient environ à 2'200 CHF par m² de capteur installé. Ce poste représente une augmentation de l'investissement de l'ordre de 21 à 27 CHF/m² SRE.

Le complexe Minergie POMB1 possède un coût d'investissement du système thermique comparable à ceux des bâtiments traditionnels (98 CHF/m²). L'augmentation due à l'intégration du solaire thermique est compensée par un coût plus faible de la distribution de chaleur et d'ECS. Ce dernier effet trouve probablement son origine dans le dimensionnement de l'installation - la puissance thermique installée n'est que de 24 W/m² - mais également dans un effet d'échelle mis en évidence par les résultats de cette étude (graphique de droite de la Figure 7.12).

La structure du coût d'exploitation est représentée dans le graphique du bas de la Figure 7.10. La charge d'exploitation d'un système thermique traditionnel varie entre 22 et 24 CHF/m²an (FINS, POMC12 et CARA). Le bâtiment POMB2 compense en partie le coût élevé de l'investissement par une consommation de gaz plus basse, ce qui lui confère une charge totale de 26 CHF/m²an.

Le bâtiment POMB1 possède une charge d'exploitation de 17 CHF/m²an. Cette bonne performance provient d'une consommation de gaz fortement réduite par rapport aux autres bâtiments. Ce résultat est lié essentiellement à la performance thermique de l'enveloppe et à la prestation thermique délivrée par le double-flux et sa pompe à chaleur intégrée.

L'achat d'énergie représente environ la moitié des charges d'exploitations pour les bâtiments traditionnels (FINS, POMC12 et CARA) et le quart des charges pour le bâtiment Minergie POMB1.

7.5.2.2 Système aéraulique : investissement & exploitation

La structure du coût d'investissement est représentée dans le graphique du haut de la Figure 7.11. Le coût d'une installation d'extraction simple varie entre 20 et 30 CHF/m² et celui d'un système à double-flux entre 55 et 65 CHF/m². L'intégration de la pompe à chaleur sur air vicié dans POMB1 ne représente pas un coût marginal important (environ 2 à 3 CHF/m²).

La structure du coût d'exploitation est représentée dans le graphique du bas de la Figure 7.11. La charge d'exploitation d'une extraction simple se situe aux alentours de 3 à 4 CHF/m²an (FINS, POMC12) et elle passe à 8 CHF/m²an pour un système à double-flux (CARA, POMB2). Le bâtiment Minergie POMB1 possède une charge d'exploitation de 10.4 CHF/m²an. Cette différence provient de la consommation électrique de la pompe à chaleur et d'une plus grande surface locative attribuée aux installations de ventilation (autres frais fixes).

L'achat d'énergie ne représente que 15% des charges pour les installations d'extraction simple et les double-flux sans pompe à chaleur. Cette proportion passe à 20% avec l'intégration de la PAC.

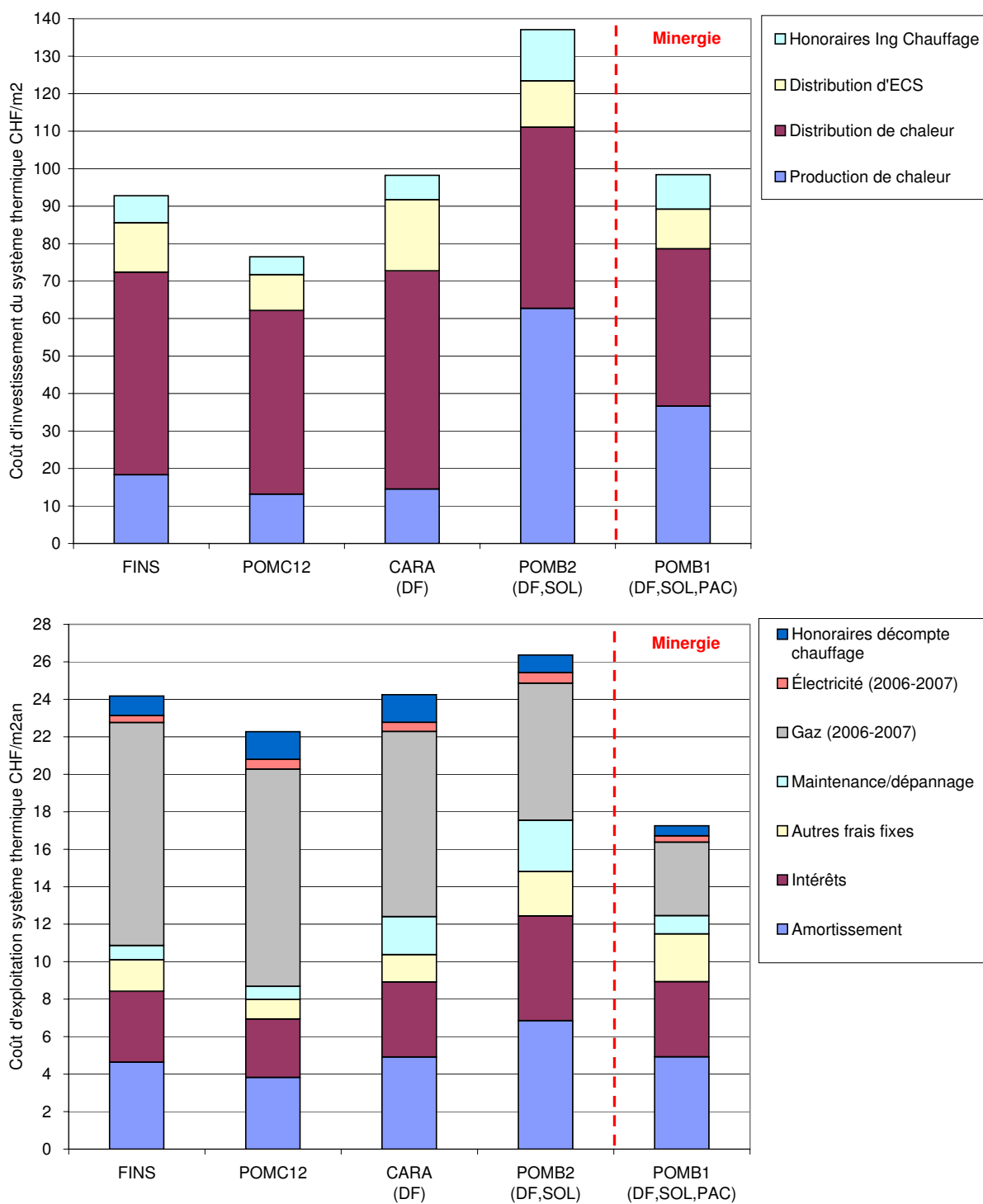


FIG. 7.10 – Coût d'investissement (haut) et d'exploitation (bas) du système thermique exprimé respectivement en CHF/m² et en CHF/m²an. L'amortissement des installations est calculé sur une période de 20 ans avec un taux d'intérêt de 6.5%. Le prix des énergies correspond à 9 ct/kWh pour le gaz et à 22 ct/kWh pour l'électricité. DF = double-flux, SOL = solaire thermique et PAC = pompe à chaleur sur air vicié du DF.

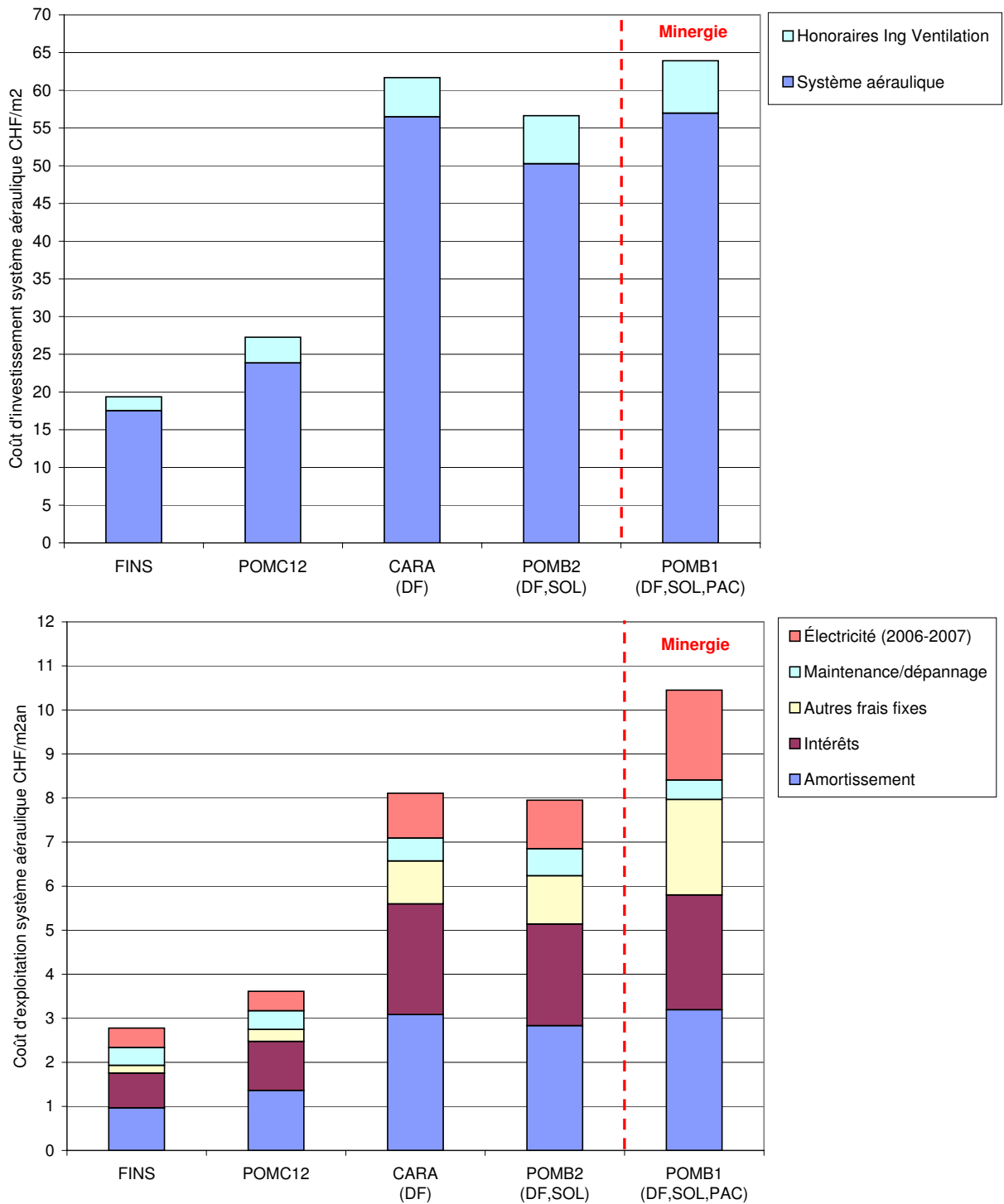


FIG. 7.11 – Coût d’investissement (haut) et d’exploitation (bas) du système aéraulique exprimé respectivement en CHF/m² et en CHF/m².an. L’amortissement des installations est calculé sur une période de 20 ans avec un taux d’intérêt de 6.5%. Le prix de l’électricité est de 22 ct/kWh. DF = double-flux, SOL = solaire thermique et PAC = pompe à chaleur sur air vicié du DF.

7.5.2.3 Indicateurs divers

L'investissement dans le système thermique et aéraulique représente environ 5 à 6% du coût total de l'ouvrage. L'intégration de systèmes actifs représente environ 2% d'investissement supplémentaire (graphique de gauche de la Figure 7.12).

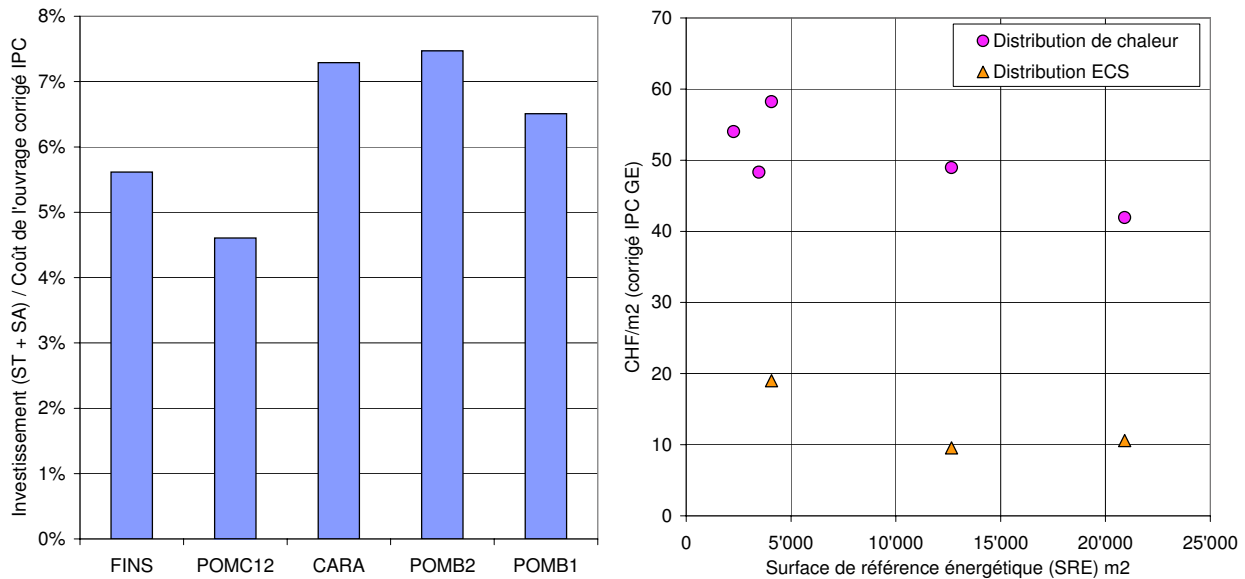


FIG. 7.12 – Gauche : Investissement du système thermique + aéraulique rapporté au prix total de l'ouvrage. Droite : coût spécifique de la distribution de chaleur et d'ECS représenté en fonction de la surface de référence énergétique (SRE). Tous les coûts sont corrigés en fonction de l'indice genevois des prix de la construction de logements (IPC GE) [61].

Le graphique de droite de la Figure 7.12 représente le coût spécifique corrigé de la distribution de chaleur et d'ECS en fonction de la surface de référence énergétique (SRE). Ces mesures mettent bien en évidence un effet d'échelle qui favorise les grandes constructions.

7.5.3 Coût global d'exploitation chauffage-ventilation

7.5.3.1 Coût global d'exploitation

La Figure 7.13 présente la structure du coût global d'exploitation pour le chauffage et la ventilation. Il s'agit des charges d'exploitations cumulées des deux systèmes présentés précédemment.

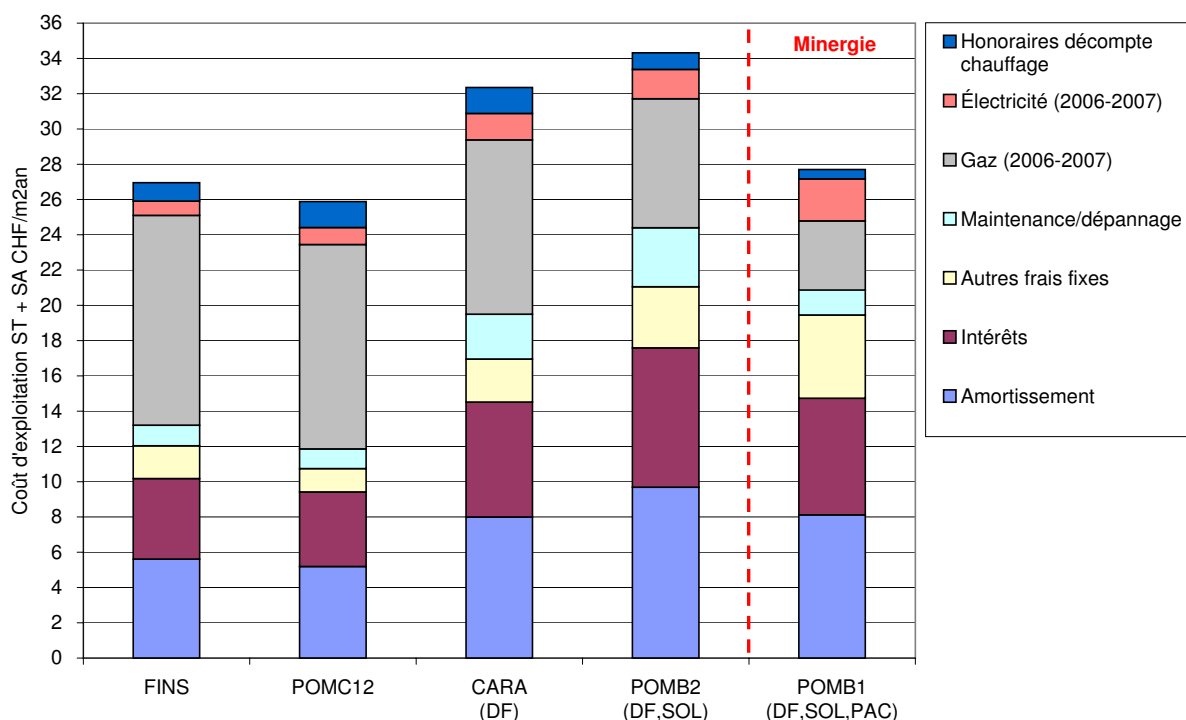


FIG. 7.13 – Coût global d'exploitation pour le chauffage et la ventilation exprimé en CHF/m²an. L'amortissement des installations est calculé sur une période de 20 ans avec un taux d'intérêt de 6.5%. Le prix des énergies correspond à 9 ct/kWh pour le gaz et à 22 ct/kWh pour l'électricité. DF = double-flux, SOL = solaire thermique et PAC = pompe à chaleur sur air vicié du DF.

Le coût global d'exploitation pour chauffer, ventiler et alimenter en ECS un bâtiment standard se situe entre 26 et 28 CHF/m²an. L'intégration d'un système de ventilation à double-flux sans intervention sur l'enveloppe thermique du bâtiment majore le coût d'exploitation de 4 à 8 CHF/m²an.

Le coût d'exploitation du complexe Minergie POMB1 se situe au niveau des bâtiments standards avec 28 CHF/m²an. Par rapport à ces derniers, l'investissement supplémentaire en installations techniques et l'augmentation de la consommation d'électricité sont compensés par une diminution de la consommation de gaz. L'achat d'énergie représente 23% des charges dans le complexe Minergie, alors que ce poste représente environ 48% dans les bâtiments standards.

La très bonne performance de POMB1 est également due aux investissements qui ont été réalisés dans l'enveloppe thermique des bâtiments. Pour être cohérent, il faut donc rajouter ce coût aux charges globales d'exploitation du complexe Minergie. Cet investissement, amorti sur une période de 50 ans à un taux de 6.5%, représente une annuité de 0.7 CHF/m²an. Le coût d'exploitation "équivalent" reste du même ordre de grandeur que celui des bâtiments traditionnels.

7.5.3.2 Sensibilité aux prix des énergies

La Figure 7.14 présente l'évolution du coût global d'exploitation en fonction du prix des énergies. Le graphique de gauche montre l'impact sur les charges de la variation du prix du gaz en considérant un prix fixe de l'électricité de 22 ct/kWh. Celui de droite fixe le prix du gaz à 9 ct/kWh et fait varier le prix de l'électricité. La ligne verte indique la situation actuelle.

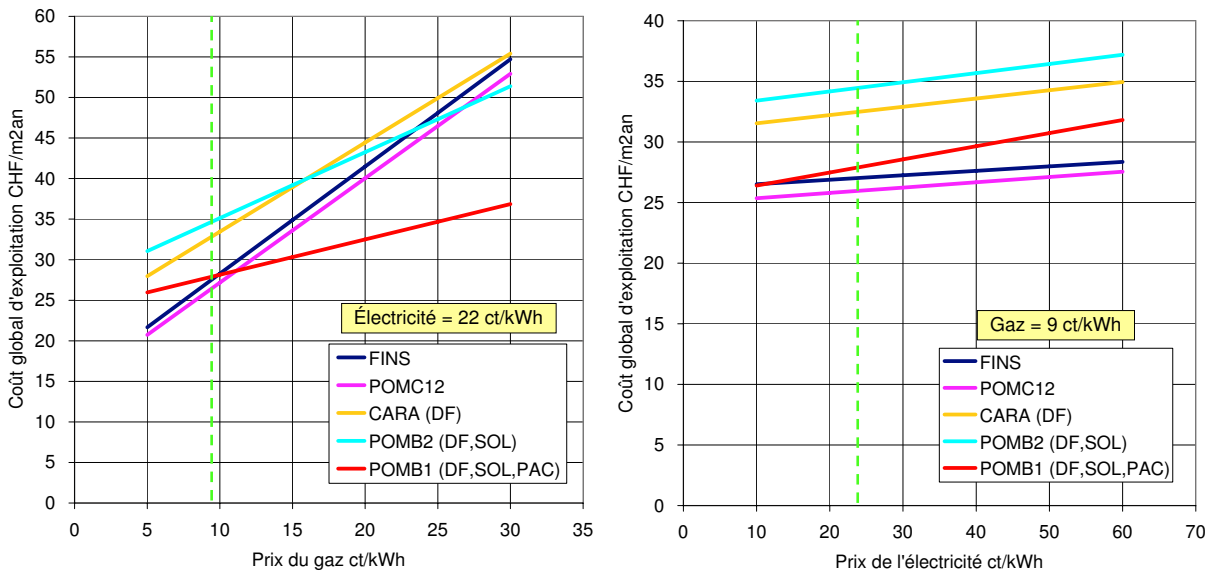


FIG. 7.14 – Évolution du coût global d'exploitation en fonction du prix des énergies. Gauche : variation du prix du gaz avec l'électricité fixée à 22 ct/kWh. Droite : variation du prix de l'électricité avec le gaz fixé à 9 ct/kWh. La ligne verte indique la situation actuelle.

Le complexe Minergie POMB1 possède une plus grande robustesse que les autres réalisations face à une augmentation du prix du gaz. Sa sensibilité au prix de l'électricité, en revanche, est plus élevée que les autres. Le Tableau 7.6 indique la sensibilité respective de chaque bâtiment face aux variations de prix du gaz et de l'électricité (pente des droites).

Sensibilité coût exploitation	FINS	POMC12	CARA	POMB2	POMB1	
Variation prix du gaz	1.32	1.29	1.10	0.81	0.44	$\frac{\text{CHF/m}^2\text{an}}{\text{ct/kWh}}$
Variation prix de l'électricité	0.037	0.044	0.068	0.076	0.108	$\frac{\text{CHF/m}^2\text{an}}{\text{ct/kWh}}$

TAB. 7.6 – Sensibilité du coût global d'exploitation aux prix des énergies.

L'intégration de systèmes actifs tend à diminuer la sensibilité au prix du gaz et à augmenter la sensibilité au prix de l'électricité (de gauche à droite). Le complexe Minergie POMB1 est environ 3 fois moins sensible au prix du gaz que le bâtiment standard FINS, mais environ 3 fois plus sensible au prix de l'électricité.

7.5.3.3 Énergie primaire versus charges d'exploitation

La Figure 7.15 représente la consommation en énergie primaire des bâtiments en fonction des charges d'exploitation. Les facteurs de conversion en énergie primaire retenus pour cette étude sont ceux adoptés par le cahier technique SIA 2031 "Certificat énergétique des bâtiments", soit 1.15 pour le gaz et 2.97 pour l'électricité.

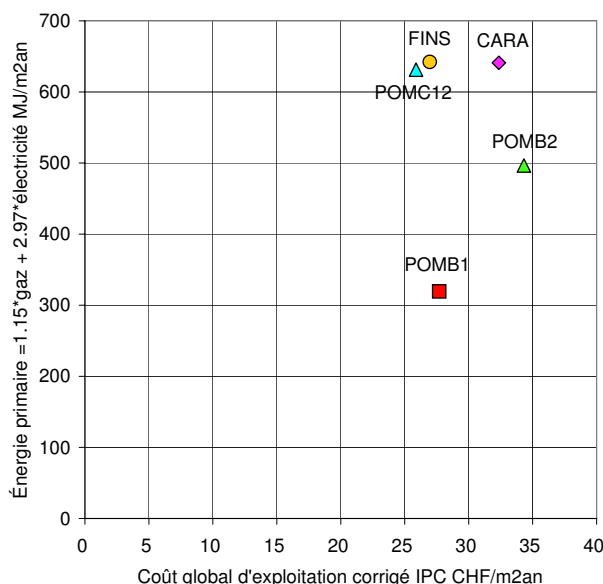


FIG. 7.15 – Énergie primaire moyenne représentée en fonction des charges d'exploitation. Les facteurs retenus pour la conversion en énergie primaire sont ceux adoptés par le cahier technique SIA 2031 : 1.15 pour le gaz et 2.97 pour l'électricité [36]. Prix des énergies : 9 ct/kWh pour le gaz et 22 ct/kWh pour l'électricité.

Ces résultats montrent que l'amélioration de l'enveloppe thermique est une condition nécessaire pour baisser la consommation d'énergie primaire tout en limitant la hausse des coûts d'exploitation.

7.5.4 Charges locataires directes et indirectes

7.5.4.1 Répartition des charges

Les charges globales d'exploitation sont directement ou indirectement payées par les locataires. L'achat d'énergie, les travaux de maintenance et les honoraires du régisseur pour l'établissement du décompte annuel sont inclus dans le compte chauffage imputé directement aux locataires. Ce sont les charges directes (ST). Le reste des charges est payé indirectement par les loyers. Le graphique de gauche de la Figure 7.16 montre ces répartitions pour les cinq bâtiments étudiés.

Le système de ventilation à double-flux représente un particularité dans la mesure où il fournit également une prestation thermique au bâtiment. Il serait alors normal d'inclure dans le compte chauffage l'électricité du ventilateur de pulsion ainsi qu'une partie des frais de maintenance. Ces frais sont également représentés sur le graphique (charges directes SA).

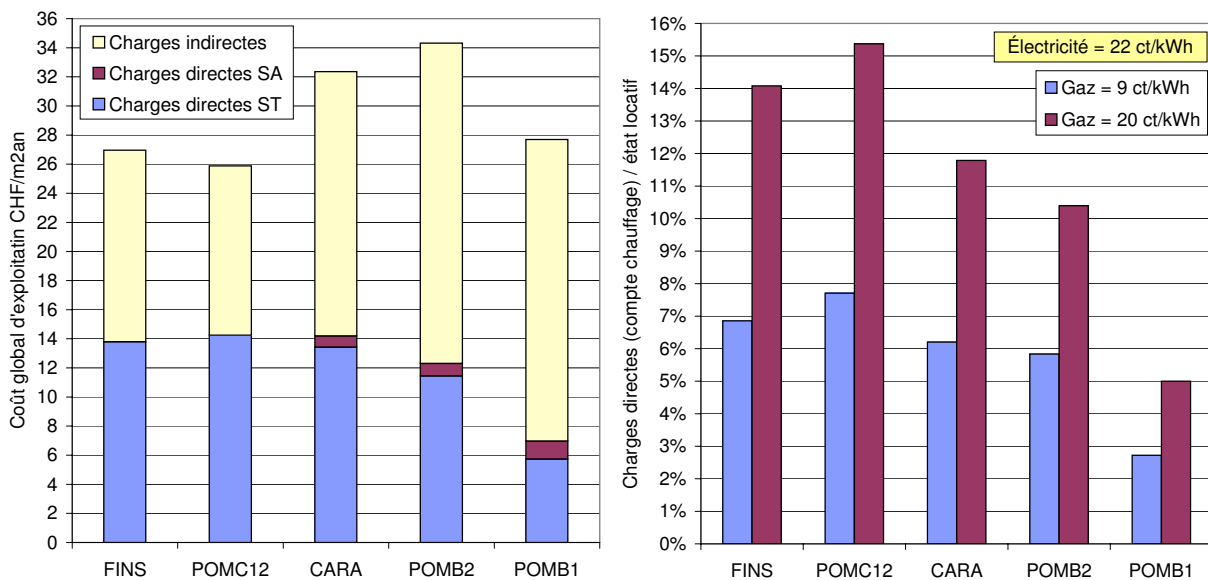


FIG. 7.16 – Gauche : répartition des charges globales d’exploitation. Les locataires paient les charges directes à travers le compte chauffage et le reste indirectement à travers les loyers. ST = système thermique, SA = système aéraulique. Droite : ratio des charges de chauffage sur le loyer annuel (état locatif). Valeurs actuelles et scénario avec un prix du gaz à 20 ct/kWh.

On peut observer que la répartition entre charges directes et indirectes est équilibrée dans les bâtiments traditionnels. Dans le complexe POMB1, la contribution directe des locataires (compte chauffage) ne représente plus que 20% des charges d’exploitation. La charge globale reste équivalente mais la part variable diminue.

7.5.4.2 Loyer et charges de chauffage

Les charges de chauffage (charges directes) évoluent en fonction des saisons et du prix des énergies. Le ratio de ces charges sur le loyer est représenté sur le graphique de droite de la Figure 7.16. Il est de l’ordre de 7% dans les bâtiments traditionnels, 6% lorsque ceux-ci intègrent un double-flux, et seulement 3% dans le bâtiment Minergie. Un scénario où le gaz atteindrait le prix de 20 ct/kWh montre que les charges de chauffage représenteraient environ 15% du loyer dans les bâtiments traditionnels, 11% s’ils sont équipés d’un double-flux et seulement 5% dans le complexe Minergie.

7.6 Conclusions

Le Pommier consomme environ 60% de gaz en moins, mais 4,4 fois plus d’électricité qu’un bâtiment traditionnel similaire. Il présente un coefficient de performance apparent de 11 : chaque unité d’électricité supplémentaire que le Pommier consomme permet d’économiser 11 unités de gaz.

La consommation de gaz d’un bâtiment corrigée du climat n’est pas stable dans le temps. La même observation peut être faite sur l’électricité. Les origines de ces variations sont probablement une correction incomplète des effets climatiques, le comportement des habitants et la performance des systèmes techniques.

Les bâtiments en conditions d'utilisation réelles consomment en moyenne 70% d'énergie en plus que le calcul normalisé. Cet écart n'a rien de surprenant, dans la mesure où la normalisation des mesures corrige les effets liés au climat, mais pas les conditions d'utilisations du bâtiment (habitants) et de ses installations. Ces dépassements ne sont pas inquiétants, car un abaissement des objectifs (normes de construction) permet de diminuer globalement la consommation d'énergie.

Le déploiement de systèmes actifs peut avoir un impact non négligeable sur la consommation électrique globale. L'assainissement énergétique du parc immobilier devrait faire l'objet d'une stratégie globale et cohérente qui inclut également la problématique électrique.

L'exemple du Pommier montre qu'il est possible de construire des bâtiments énergétiquement performants, dont le coût du m² chauffé et alimenté en ECS n'est pas plus élevé que celui d'un bâtiment traditionnel. De plus, ce complexe est environ 3 fois moins sensible au prix du gaz qu'un immeuble standard, mais environ 3 fois plus sensible au prix de l'électricité.

Le poids des charges de chauffage diminue de moitié dans les bâtiments du Pommier.

Chapitre 8

Conclusions générales

En réponse aux questions énoncées dans l'introduction de ce travail, nous pouvons conclure de la manière suivante :

**L'objectif de consommation Minergie est-il atteint dans la réalité ?
Quelle est la performance de ces bâtiments par rapport aux constructions traditionnelles ?**

Sans conteste, la construction du Pommier selon le standard Minergie entraîne une substantielle économie d'énergie. Une forte réduction de la consommation de gaz jointe à une augmentation de la demande électrique se solde par un bilan d'environ 43% d'énergie primaire économisée par rapport à un bâtiment standard comparable.

La demande de chauffage réelle dans les bâtiments du Pommier est 3.5 fois plus élevée que l'objectif calculé. Nous avons montré que, par rapport à la demande de chauffage prévue de 53 MJ/m²an, la performance réelle du bâtiment nécessite un surcroît de 54 MJ/m²an de chaleur et le comportement des habitants entraîne une consommation supplémentaire de 82 MJ/m²an.

La divergence entre l'objectif normé et la réalité n'est cependant pas un phénomène réservé aux constructions Minergie, nous l'avons également constaté sur une dizaine de bâtiments standard avec un dépassement moyen de l'ordre de 70%.

Cet écart n'a rien de surprenant, dans la mesure où la normalisation des mesures corrige les effets liés au climat, mais pas les conditions d'utilisations du bâtiment (habitants et installations techniques). La sous-performance intrinsèque du bâtiment n'est pas non plus prise en compte. Le comportement moyen des habitants déplace le point de fonctionnement normé du bâtiment vers un état où la température intérieure et le taux de renouvellement de l'air sont plus élevés.

Quel est le coût de l'efficacité énergétique ?

L'exemple du Pommier montre qu'il est possible de construire des bâtiments énergétiquement performants, dont le coût du m² chauffé et alimenté en ECS n'est pas plus élevé que celui d'un bâtiment traditionnel. Le coût global d'exploitation de ce complexe est environ 3 fois moins sensible au prix du gaz qu'un immeuble standard, mais environ 3 fois plus sensible au prix de l'électricité.

Au prix du gaz actuel (9 ct/kWh) et sans subventions, investir dans l'enveloppe pour économiser un kWh de gaz coûte environ deux fois moins cher que de brûler ce même kWh. Tous les systèmes actifs ont, en revanche, un coût du kWh économisé supérieur au prix du gaz actuel.

Dans le cas du Pommier, le prix actuel des énergies fossiles ne permet pas encore au maître d'ouvrage de répercuter sur les loyers la totalité de l'investissement brut réalisé dans l'efficacité énergétique sans une augmentation sensible des charges des locataires. Si le prix du gaz passe la barre des 15 ct/kWh, alors l'économie d'énergie réalisée sera plus élevée que l'amortissement de l'investissement brut réalisé qui pourra être intégralement reporté sur les loyers avec en prime un gain net pour les locataires, toutes choses étant égales par ailleurs.

Des leçons à tirer

La qualité de l'enveloppe thermique est la clef de voûte d'un bâtiment énergétiquement performant. Elle nécessite une excellente maîtrise des ponts thermiques et du taux de renouvellement de l'air. Cependant, cette étude montre que la performance de l'enveloppe et des systèmes intégrés est nécessaire, mais ne suffit pas pour atteindre les objectifs de consommation prévus. Un potentiel d'économie important réside dans la sobriété énergétique des habitants.

Cette étude montre également que le déploiement de certaines solutions dites à "haute performance énergétique" peut avoir un impact non négligeable sur la consommation électrique globale. L'assainissement énergétique du parc immobilier devrait faire l'objet d'une stratégie globale et cohérente qui inclut également la problématique électrique.

Une bonne stratégie devrait inclure également un investissement massif dans la matière grise pour favoriser la simplicité des concepts énergétiques et récompenser la passivité des systèmes installés. Cette approche, qui confère un rôle majeur aux architectes, doit également entraîner une réflexion sur le mode de rémunération des ingénieurs, actuellement payés au prorata du matériel installé.

Normes énergétiques du bâtiment : entre objectifs et réalité

Une des nombreuses conséquences des chocs pétroliers de 1973 et 1979 a été l'adoption par les cantons de contraintes législatives destinées à réduire la consommation élevée des bâtiments en hydrocarbures. Ces contraintes s'expriment aujourd'hui par des normes que les nouveaux bâtiments et les rénovations lourdes doivent respecter. Elles concernent principalement l'enveloppe thermique du bâtiment et dans certain cas ses installations techniques (*e.g.* concept énergétique du canton de Genève). Des labels privés plus exigeants que les normes, tel que Minergie par exemple, ont également vu le jour en parallèle et la réflexion suivante s'applique également à ces derniers.

Pour faire appliquer ces normes, l'organe exécutif propose une métrique de calcul commune qui permet de comparer la performance énergétique d'un projet de bâtiment avec une référence étalon (limite légale). Cette métrique considère des conditions standards d'exploitation (climat et habitants) et le résultat du calcul correspond à une consommation théorique normée.

À l'instar des véhicules automobiles, dont les consommations réelles sont souvent différentes des résultats affichés sur le catalogue, la consommation réelle des bâtiments est généralement plus élevée que le résultat du calcul normé. Concernant la voiture, cet écart se justifie immédiatement et presque naturellement par la considération des différents modes d'utilisation possible comme le chemin parcouru ou le style de conduite. Cette réflexion, qui s'applique intégralement aux bâtiments, est malheureusement rarement menée et la consommation mesurée en conditions réelles est souvent comparée au calcul normé, entretenant ainsi et de manière injustifiée une grande confusion entre objectif et réalité.

À Genève, mis à part les grandes réalisations soumises au concept énergétique, il n'y a aujourd'hui pas d'engagement sur la performance réelle du bâtiment mais sur sa consommation théorique normalisée. Cependant, l'évolution de la consommation des bâtiments neufs dans le temps montre qu'il existe une bonne corrélation entre le niveau d'exigence de la norme en vigueur et la consommation réelle du bâtiment : plus celle-ci est contraignante et plus la consommation des bâtiments tend à baisser. La question qui vient naturellement à l'esprit est de savoir jusqu'ou peut-on aller en baissant la valeur limite de la norme ?

Cette étude a montré que la réduction du besoin de chaleur par des systèmes constructifs et techniques se heurte à une limite liée à l'exploitation du bâtiment. Cette limite est symbolisée par le passage entre les sciences techniques et les sciences sociales. **Les ingénieurs et les architectes possèdent le savoir nécessaire pour construire des bâtiments potentiellement performants, mais il est de la responsabilité des habitants d'exploiter pleinement ce potentiel.** Celui-ci réside dans la sobriété énergétique des habitants, que les sciences sociales doivent maintenant exploiter si l'on désire tendre vers des bâtiments encore plus performants.

L'importance des retours d'expérience

Le processus actuel de conception, réalisation et exploitation des bâtiments se compose de différentes phases successives se déroulant les unes après les autres dans le respect des normes SIA. Si l'objectif à atteindre est un assainissement énergétique du patrimoine bâti, il est donc nécessaire d'agir sur ce processus afin d'en modifier la trajectoire. Les moyens d'action sont connus : contraintes législatives ou incitations fiscales par exemple. Mais comment savoir si le nouveau cap résultant de ces perturbations volontaires mène bien à l'objectif visé ?

En fournissant au marché des signaux positifs ou négatifs sur les solutions innovantes mises en oeuvre dans les bâtiments, les retours d'expérience tel que celui du Pommier agissent sur le processus global comme une boucle de rétroaction permettant de diffuser les succès et d'apprendre des échecs. Ces études sont des instruments de navigation des politiques publiques.

Finalement, cette expérience montre que le label Minergie nous entraîne bien dans la bonne direction, mais qu'une correction du cap semble toutefois nécessaire afin de ne pas substituer, à terme, la problématique fossile par une problématique électrique liée à une augmentation de la complication technologique.

Table des figures

1.1	Situation du complexe dans le quartier du Pommier	7
1.2	Vues des façades du bâtiment Giacometti	7
1.3	Vues toiture et façade nord-ouest	8
1.4	Vues intérieures des logements	8
1.5	Répartition et typologie des logements.	9
1.6	Coupe longitudinale des bâtiments et typologie des logements	10
1.7	Structure ponctuelle des bâtiments.	11
1.8	Composition structurelle des éléments de façade préfabriqués	11
1.9	Détail en coupe des façades	13
1.10	Consoles des balcons	13
1.11	Complexe du Pommier et concept énergétique global	15
1.12	Concept énergétique des sous-stations.	15
1.13	Schéma de distribution chauffage-ventilation	16
1.14	Chaudières et distribution de chaleur	16
1.15	Cuves de stockage thermique	17
1.16	Installation solaire thermique	18
1.17	Ventilation à double-flux	18
1.18	Schéma de principe du monitoring	19
1.19	Monitoring sous-station, centrales à gaz et météo	20
1.20	Monitoring du monobloc double-flux	21
1.21	Datalogger	22
1.22	Évolution de l'offset du datalogger	22
1.23	Principe de mesure thermocouples et PT100	23
1.24	Étalonnage et pose des thermocouples	24
1.25	Répétition des impulsions avec isolation galvanique	24
1.26	Monitoring des paramètres météorologiques	25
1.27	Étalonnage des solarimètres	25
1.28	Monitoring de la consommation électrique	26
1.29	Exemple de mesure : ECS	27
2.1	Bilan thermique du bâtiment Giacometti	30
2.2	Répartition des postes de consommation électrique du bâtiment Giacometti	33
2.3	Profil de charge électrique du bâtiment Giacometti	34
2.4	Puissances électriques classées du bâtiment Giacometti	36
2.5	Profil de consommation horaire moyen des logements du bâtiment Giacometti	39
2.6	Structure de la courbe de charge horaire moyenne du bâtiment	40
2.7	Puissances réactives spécifiques du bâtiment Giacometti	41
2.8	Bilan électrique annuel du bâtiment Giacometti	43
2.9	Consommation annuelle d'électricité des logements	44
2.10	Signature énergétique du complexe (gaz)	45

2.11	Signature électrique des sous-systèmes électriques	46
2.12	Puissances et températures du système de chauffage	49
2.13	Puissances et températures du système de production d'ECS	51
2.14	Demande de chaleur horaire classée	53
2.15	Température des logements	54
2.16	Analyse de la qualité de l'air (COV et Formaldéhyde)	56
3.1	Rendement de conversion de l'installation solaire et exemple de stagnation	61
3.2	Productivité solaire et validation du modèle quadratique capacitif	62
3.3	Couverture solaire de l'ECS	67
3.4	Évaluation de l'installation solaire à l'aide de l'outil rapSOL-th	68
3.5	Modèle du système aéraulique	69
3.6	Modélisation de la consommation électrique des ventilateurs	71
3.7	Modélisation de la consommation électrique de la pompe à chaleur	72
3.8	Profil annuel de la consommation électrique du double-flux et de la PAC	73
3.9	Débit d'extraction en fonction de l'utilisation de la PAC	74
3.10	Puissances d'appel classées des ventilateurs et de la pompe à chaleur.	75
3.11	Consommation spécifique des ventilateurs du double-flux	76
3.12	Consommation électrique des ventilateurs du double-flux	77
3.13	Coefficients de performance du double-flux et de la pompe à chaleur	78
3.14	Efficacité de récupération de l'échangeur de chaleur	80
3.15	Bilan énergétique du gaz pour l'ensemble du complexe	81
3.16	Rendement dynamique des chaudières	82
3.17	Rendement quotidien des chaudières	83
3.18	Calcul du coefficient U des éléments de façade bois	84
3.19	Détail des éléments de façade mesurés	85
3.20	Mesure du coefficient U élément de façade nord-est	86
3.21	Mesure du coefficient U du double vitrage nord-est	87
3.22	Thermographie façade nord-est	88
3.23	Thermographie façade sud-ouest et pignon nord-ouest	88
4.1	Consommation énergétique du bâtiment Giacometti calculée et mesurée	92
4.2	Bilan thermique du bâtiment Giacometti calculé et mesuré	93
4.3	Répartition de flux de chaleur	97
5.1	Coût du kWh de gaz économisé (négakWh)	102
5.2	Report de l'investissement sur les loyers	104
5.3	Substitution gaz-électricité des systèmes d'efficacité énergétique	106
5.4	Bilan en énergie primaire	108
5.5	Bilan en énergie primaire avec concept global électro-thermique	109
7.1	Consommation moyenne gaz-électricité des bâtiments	127
7.2	Exemple de signature énergétique	131
7.3	Caractéristiques des signatures versus IDC	132
7.4	Demande thermique en période estivale	133
7.5	Facteur de dimensionnement des chaudières	134
7.6	Consommation d'ECS	135
7.7	Évolution de l'IDC normalisé des bâtiments	136
7.8	IDC calculé versus IDC mesuré normalisé	137
7.9	Diffusion à large échelle des solutions étudiées	139

7.10	Coût d'investissement et d'exploitation du système thermique	142
7.11	Coût d'investissement et d'exploitation du système aéraulique	143
7.12	Indicateurs divers	144
7.13	Coût global d'exploitation pour le chauffage et la ventilation	145
7.14	Évolution du coût global d'exploitation en fonction du prix des énergies	146
7.15	Énergie primaire moyenne versus charges d'exploitation	147
7.16	Répartition des charges d'exploitation	148

Liste des tableaux

1.1	Composition du groupe de suivi	6
1.2	Caractéristiques générales des bâtiments du Pommier	14
2.1	Puissances électriques spécifiques du bâtiment Giacometti	35
2.2	Sensibilité thermique des trois systèmes de chauffage	48
2.3	Appréciation des concentrations en COV total	55
2.4	Appréciation des concentrations en formaldéhyde	57
3.1	Paramètres du modèle de solution aqueuse propylène-glycol	59
3.2	Mesures ponctuelles du taux de mélange du fluide caloporteur solaire	60
3.3	Performances annuelles prévues et mesurées de l'installation solaire thermique.	62
3.4	Pertes thermiques des conduites solaires	65
3.5	Modélisation des capteurs solaires thermiques	65
3.6	Mesures de la production solaire et calcul des surfaces relatives	68
3.7	Modélisation de la consommation électrique des ventilateurs	70
3.8	Efficacité des ventilateurs et pertes de charges	71
4.1	Valeurs prévues et mesurées qui influencent la demande de chauffage	94
4.2	Effets du bâtiment et de son utilisation sur la demande de chaleur	98
5.1	Évaluation économique des solutions d'efficacité énergétique	100
5.2	COP des systèmes actifs	106
7.1	Caractéristiques générales des bâtiments étudiés.	126
7.2	Facteur de substitution global gaz-électricité.	130
7.3	Hypothèses retenues pour l'estimation de l'IDC des bâtiments	137
7.4	Diffusion des solutions Minergie observées sur un échantillon de bâtiments	139
7.5	Bâtiments ayant fait l'objet d'une analyse économique.	140
7.6	Sensibilité du coût d'exploitation aux prix des énergies	146
A.1	Liste des capteurs de la sous-station Giacometti	166
A.2	Liste des capteurs de la sous-station Giacometti	167
A.3	Liste des capteurs du monobloc Menerga	168
B.1	Mesures bâtiment Giacometti 2006/2007	170
C.1	Facteurs de correction climatique	172

Bibliographie

- [1] International Energy Agency (IEA). Energy balances of OECD countries, 2006.
- [2] Office fédéral de la statistique (OFS). Recensement fédéral de la population. Logement et conditions d'habitation, 2000.
- [3] Langdon Davis. World construction 2006-2007.
- [4] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Energy efficiency in buildings ; Business, realities and opportunities., 2008.
- [5] Office fédéral de la statistique (OFS). Statistique de la superficie 1992/97, 2006.
- [6] United Nations Environment Programme. Buildings and climate change. status, challenges and opportunities, 2007.
- [7] R.J. Lawrence. *Le seuil franchi... Logement populaire et vie quotidienne en Suisse romande, 1860-1960.* 1986.
- [8] Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA). Normes pour l'exécution des travaux du bâtiment. Conditions spéciales et mode de métré pour les isolations thermiques et phoniques., 1951.
- [9] Office fédéral de la statistique (OFS). Bâtiments selon le type de bâtiment et l'époque de construction, 2000.
- [10] P. Haefeli, B. Lachal, W. Weber, and M. Garbely. Le programme Minergie (Suisse). Étude du Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (Cuepe), Université de Genève, 2006.
- [11] B. Lachal and W. Weber. Les besoins d'énergie thermique des bâtiments. In *Quels systèmes énergétique pour le XXIème siècle ? Consommation et synthèse*, volume 3 of *Énergie, environnement et société*. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (Cuepe), Université de Genève, 2000.
- [12] J. Khoury. Communication personnelle. Université de Genève, Institut des sciences de l'environnement, Groupe énergie, 2009.
- [13] J. Nässén and J. Holmberg. Energy efficiency - a forgotten goal in the Swedish building sector ? *Energy and Policy*, (33) :1037–1051, 2005.
- [14] Association Minergie (Suisse). www.minergie.ch (accès au 29/06/09).
- [15] Institut Passivhaus (Allemagne). www.passiv.de (accès au 29/06/09).
- [16] U.S. Green Building Council. www.usgbc.org (accès au 29/06/09).

- [17] Association Effnergie (France). www.effnergie.org (accès au 29/06/09).
- [18] Conseil Fédéral (CH). Le Conseil fédéral favorable à un programme national d'assainissement des bâtiments. Communiqué de presse, 25.2.2009.
- [19] Parlement Européen. Objectif zéro énergie pour tous les bâtiments construits à partir de 2019. Communiqué de presse du parlement européen no 20090330IPR52892, 2009.
- [20] L.K. Norford, R.H. Socolow, G.V. Hsieh, and G.V. Spadaro. 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. *Energy and Buildings*, (21) :121–131, 1994.
- [21] K.E. Thomsen, J.M. Schultz, and B. Poel. Measured performance of 12 demonstration projects - IEA Task 13 : advanced solar low energy buildings. *Energy and Buildings*, (37) : 111–119, 2005.
- [22] G. Branco, B. Lachal, P. Gallinelli, and W. Weber. Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in switzerland based on long-term experimental data. *Energy and Building*, 36 :543–555, 2004.
- [23] G. Branco, B. Lachal, P. Gallinelli, D. Gonzalez, and W. Weber. Analyse thermique de la cité solaire à plan-les-ouates (Genève). Rapports de recherche du CUEPE no 1, 2002.
- [24] M. Wall. Energy-efficient terrace houses in Sweden. Simulations and measurements. *Energy and Buildings*, (38) :627–634, 2006.
- [25] H. Tommerup, J. Rose, and S. Svendsen. Energy-efficient houses built according to the energy performance requirements introduced in Danemark in 2006. *Energy and Buildings*, (39) :1123–1130, 2007.
- [26] G.R. Newsham, S. Mancini, and B.J. Birt. Do leed-certified buildings save energy ? Yes, but... *Energy and Buildings*, (41) :897–905, 2009.
- [27] G. Bezençon, L. Keller, and C. Soutter. Évaluation de l'application de la norme sia 380/1-2001. Mandat du Service cantonal de l'énergie du canton de Vaud (SEVEN), 2006.
- [28] F. Dalang. La qualité de l'air intérieur dans les logements du quartier du pommier. Service cantonal de toxicologie industrielle et de protection contre les pollutions intérieures (STIPI), 2007.
- [29] M. Barthassat. Expérience Minergie, immeubles de la caisse de prévoyance CIA. Metron & Collectif d'architectes, 2006.
- [30] Campbell Scientific Inc. Cr7 measurement and control system, instruction manual, 1997. Revision 7/97.
- [31] O. Sidler. Étude expérimentale des appareils électroménagers à haute efficacité énergétique placés en situation réelle (projet ecodrome). Commission des Communautés Européennes et ADEME, 1998.
- [32] O. Sidler, ADEME, CCE, CRES, Odense Elforsyning Net A/S, Polytecnico di Milano, and Servizi Territorio. Maîtrise de la demande d'Électricité, campagne de mesures par usage dans 400 logements de la communauté européenne, évaluation des gisements d'économie d'électricité (projet eureco). Commission des Communautés Européennes, 2002.

- [33] O. Sidler. Maîtrise de la demande d'Électricité, campagne de mesures sur le fonctionnement en veille des appareils domestiques. ADEME, 2000.
- [34] Services Industriels de Genève (SIG). Règlement pour la fourniture de l'énergie électrique, Version du 1.1.2007.
- [35] Services Industriels de Genève (SIG). Tarif Énergie réactive, Version du 1.1.2007.
- [36] Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA). Cahier technique sia 2031 : Certificat énergétique des bâtiments, 2009.
- [37] M. Conde. Thermophysical properties of brines. M. Conde Engineering, Zurich. www.mrc-eng.com (accès au 29/06/09), 2002.
- [38] Institut suisse de météorologie (ISM). Relevés météorologiques de Genève-Cointrin, 2007.
- [39] B. Lachal. Étude sur le subventionnement des capteurs solaires thermiques à Genève. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE), 2002. Rapport final.
- [40] Agena. Caractéristiques de l'installation.
- [41] J. A. Duffie and W. A. Beckman. *Solar engineering of thermal process*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1991.
- [42] Recknagel, Sprenger, and Hönnmann. *Le Recknagel*. PYC édition, 2 edition, 1986.
- [43] Institut für solartechnik (SPF). Solar collector factsheet : Spf-nr.c303. HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Switzerland, 2004. www.solarenergy.ch (accès au 29/06/09).
- [44] rapSOLth. Réglette d'autoévaluation de la production solaire thermique d'eau chaude sanitaire. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE) et Service cantonal de l'énergie du canton de Genève (ScanE), 2005.
- [45] C.-A. Roulet, F.D. Heidt, F. Foradini, and M.-C. Pibiri. Real heat recovery with air handling units. *Energy and buildings*, 33 :495–502, 2001.
- [46] B. Lachal and E. Pampaloni. Mesure de coefficients k d'éléments d'enveloppe de deux bâtiments des anciens services industriels de Genève. CUEPE, 1995. Expertise réalisée pour la direction des bâtiments du département des travaux publics et de l'énergie du canton de Genève.
- [47] C. Willemin. Protocole des relevés thermographiques, immeuble a.-giacometti 8-10. Ecole d'ingénieur de Genève, LEEA, 2008.
- [48] B. Lachal, W. Weber, and O. Guisan. Simplified methods for the thermal analysis of multi-family and administrative buildings. *ASHRAE Transactions : Symposia*, pages 1151–1159, 1992.
- [49] T.D. Pettersen. Variation of energy consumption in dwellings due to climate, building and inhabitants. *Energy and Buildings*, (21) :209–218, 1994.
- [50] M. Jakob. Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments. The case of the Swiss residential sector. *Energy Policy*, (34) :172–187, 2006.

- [51] M. Jakob, A. Baumgartner, E. Jochem, U.-P. Menti, A. Honegger-Ott, and I. Plüss. Coûts marginaux lors de mesures d'efficacité et d'optimisation imposées dans les bâtiments commerciaux (extraits). Office fédéral de l'énergie (OFEN). Programme de recherche : fondements de l'économie énergétique, 2007.
- [52] E. Jochem and M. Jakob. Coûts et bénéfices. Protection thermique des bâtiments. Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2003.
- [53] Conseil d'Etat de la République et Canton de Neuchâtel. Arrêté 740.104 concernant les coûts externes de l'énergie (acee), 2003.
- [54] E. Abel. Low-energy buildings. *Energy and Buildings*, (21) :169–174, 1994.
- [55] M. Ménard, R. Dones, and U. Gantner. Strommix in ökobilanzen, auswirkungen der strommodellwahl für produkt - und betriebs - ökobilanzen. Paul Scherrer Institut (PSI), 1998.
- [56] Société suisse des ingénieurs et architectes (SIA). Norme sia 380/4 : L'énergie électrique dans les bâtiments, 2006.
- [57] Fédération romande immobilière and ASLOCA. Tablette d'amortissement commune aux associations de bailleurs et de locataires, 2007.
- [58] D. Lachat. *Le bail à loyer*. Association suisse des locataires (ASLOCA), 1997.
- [59] W. E. Vesely and al. *Fault Tree Handbook*. U.S. Nuclear regulatory commission, NUREG-0492, 1981.
- [60] J.-M. Zraggen. Évaluer et comparer la performance des systèmes thermique et aéraulique des immeubles locatifs : proposition de quelques indicateurs, méthodologie de calcul et application à un bâtiment. Master of advanced studies in energy, EPFL, 2006.
- [61] Office cantonal de la statistique (OCSTAT). Indices genevois des prix de la construction de logements, depuis avril 1988, 2008.

Annexe A

Liste des capteurs

Ci-après se trouve la liste des capteurs indiqués dans les Figures 1.19 (page 20) et 1.20 (page 21).

No	Bâtiment Giacometti	Unité	Capteur	Précision
Commun				
1	Volume de gaz	0.1m ³ /imp	Schlumberger Delta G100	± 1%
2	Débit chaudière	5 l/imp	Siemens 2WR5	± 2%
3	Temp. Entrée chaudière	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
4	Temp. Sortie chaudière	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
5	Temp. Retour CAD Salève	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
6	Temp. Retour CAD Jura	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
7	Temp. Départ chauff. apres mitigeur	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
Chauffage stock CAD				
8	Débit via stock	1 l/imp	Siemens 2WR5	± 3%
9	Temp. Entrée stock CAD	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
10	Temp. Sortie stock CAD	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
11	Temp. Entrée échangeur CAD	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
12	Temp. Sortie échangeur CAD	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
Capteurs solaires				
13	Débit boucle capteurs	10 l/imp	GWF MTK	± 2%
14	Temp. Sortie capteurs	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
15	Temp. Entrée capteurs	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
16	Débit circulation entre stock et solaire	-	Lecture manuelle !	-
17	Temp. Sortie stock entrée solaire	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
Pompe à chaleur				
18	Débit boucle PAC	1 l/imp	Siemens 2WR5	± 3%
19	Temp. Sortie PAC	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
20	Temp. Entrée PAC	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
Chauffage logements				
21	Débit chauffage	1 l/imp	Siemens 2WR5	± 3%
22	Temp. Entrée chauffage	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
23	Temp. Sortie chauffage	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
Eau chaude sanitaire				
24	Débit eau froide	1 l/imp	GWF MTK	± 2%
25	Temp. ECS froid	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
26	Temp. Entrée depuis stock solaire	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
27	Temp. Sortie stock ECS	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
28	Temp. ECS distribué	°C	Thermocouple	± 0.05 °C
29	Temp. ECS retour circulation	°C	Thermocouple	± 0.05 °C

TAB. A.1 – Liste des capteurs de la sous-station Giacometti

No	Bâtiment Giacometti	Unité	Capteur	Précision
Météo				
30	Temp. Extérieure	°C	PT100-5	± 0.1 °C
31	Ensoleillement horizontal	W/m ²	Solarimètre 10820235	± 0.6%
32	Ensoleillement plan Giacometti	W/m ²	Solarimètre 10820234	± 0.4%
>	<i>Orientation +43° O, inclinaison 35°</i>			
33	Ensoleillement plan Jura/Salève	W/m ²	Solarimètre 11810258	± 0.4%
>	<i>Orientation -47° E, inclinaison 35°</i>			
35	Humidité relative	%	Rotronic 1761800/19	± 2%
Divers				
34	Temp. Boîtier BG1	°C	PT100-1	± 0.1 °C
Ventilation				
36	Temp. Bloc ventil air neuf	°C	PT100-36	± 0.1 °C
37	Temp. Bloc ventil air pulsé	°C	PT100-37	± 0.1 °C
38	Temp. Bloc ventil air repris	°C	PT100-38	± 0.1 °C
39	Temp. Bloc ventil air évacué	°C	PT100-39	± 0.1 °C
Électricité				
40	Puissance active PAC	W	Sineax M560	± 3%
41	Puissance active ventilo air neuf	W	Sineax M560	± 3%
42	Puissance active ventilo air repris	W	Sineax M560	± 3%
43	Puissance active alim. gén. allée 8	W	Sineax M560	± 3%
44	Puissance active double-flux + solaire	W	Sineax M560	± 3%
45	Puissance active service généraux 8	W	Sineax M560	± 3%
46	Puissance active alim. gén. allée 10	W	Sineax M560	± 3%
47	Puissance active parking	W	Sineax M560	± 3%
48	Puissance active chaufferie	W	Sineax M560	± 3%
49	Puissance active service généraux 10	W	Valise de mesure	± 3%
50	Puissance réactive alim. gén. allée 8	VAR	Sineax M560	± 3%
51	Puissance réactive alim. gén. allée 10	VAR	Sineax M560	± 3%

TAB. A.2 – Liste des capteurs de la sous-station Giacometti

No	Bâtiment Giacometti	Unité	Capteur	Précision
Ventilation (capteurs Menerga)				
60	Débit air neuf	m ³ /h	Pressostat	-
61	Débit air évacué	m ³ /h	Pressostat	-
62	Temp. air repris	°C	PT1000	± 0.5 °C
63	Temp. air pulsé	°C	PT1000	± 0.5 °C
64	Temp. air neuf	°C	PT1000	± 0.5 °C
65	Temp. condenseur eau depart monobloc	°C	PT1000	± 0.5 °C
66	Temp. condenseur eau retour monobloc	°C	PT1000	± 0.5 °C
67	Consigne temp cond eau depart monobloc	°C	Consigne	-
68	Consigne temp air pulsé	°C	Consigne	-
69	Consigne corrigée temp air pulsé	°C	Consigne	-
70	Temp. avant condenseur air pulsé	°C	PT1000	± 0.5 °C
71	Temp. après condenseur air pulsé	°C	PT1000	± 0.5 °C
72	Temp. avant évaporateur air évacué	°C	PT1000	± 0.5 °C
73	Temp. après évaporateur air évacué	°C	PT1000	± 0.5 °C
74	Ouverture clapet air neuf	%	Digital	-
75	Ouverture clapet air évacué	%	Digital	-
76	Ouverture clapet bypass air neuf	%	Digital	-
77	Ouverture clapet bypass air évacué	%	Digital	-
78	Perte de charge filtre air neuf	Pa	Pressostat	-
79	Perte de charge filtre air repris	Pa	Pressostat	-
80	Hystérèse encl/déclenchement PAC	°C	Consigne	-
81	Marche ventilateur air neuf	h	Intégrateur	-
82	Marche ventilateur air évacué	h	Intégrateur	-
83	Marche PAC	h	Intégrateur	-
84	En/Hors	I/O	Digital	-
85	Mode service	I/O	Digital	-
86	Débit air	I/O	Digital	-
87	Vent air pulsé	I/O	Digital	-
88	Vent air repris	I/O	Digital	-
89	PAC O/I	I/O	Digital	-
90	Cond eau O/I	I/O	Digital	-
91	Eclairage	I/O	Digital	-
92	Reset	I/O	Digital	-

TAB. A.3 – Liste des capteurs du monobloc Menerga

Annexe B

Mesures bâtiment Giacometti

Cette annexe présente les valeurs mesurées du bâtiment Giacometti. Un pouvoir calorifique supérieur de 37.5 MJ par m³ de gaz a été utilisé pour la conversion. Cette valeur est extraite d'une étude similaire réalisée par le Cuepe sur la cité solaire de Plan-les-Ouates à Genève [23, page 86].

Ci-dessous se trouve la nomenclature des variables présentées dans les Tableaux suivants :

Q Cad	Chaleur fournie par les chaudières à gaz à travers le CAD
G Cap	Ensoleillement reçu par la surface de captage solaire (44 m ²)
E VenAP	Électricité consommée par le ventilateur de pulsion
E PacAir	Électricité consommée par la PAC en mode air-air (post-chauffage air pulsé)
E PacEau	Électricité consommée par la PAC en mode air-eau (appoint ECS)
E Sol	Électricité consommée par les circulateurs de l'installation solaire
Text	Température extérieure
Q Ecs	Chaleur fournie à l'eau chaude sanitaire (ECS)
Q Ch	Chaleur fournie à l'installation de chauffage (radiateurs)
Q VenEch	Chaleur fournie par l'échangeur de chaleur (double-flux)
Q PacAir	Chaleur fournie par la PAC à l'air pulsé
Q PacEau	Chaleur fournie par la PAC à l'ECS et au chauffage
Q Sol	Production solaire thermique (ECS)
Q VenOut	Chaleur évacuée dans le parking par la ventilation

Mois 2006/07	Q Cad MJ	G Cap MJ	E VenAP MJ	E PacAir MJ	E PacEau MJ	E Sol MJ	Text °C
juin	7539	31673	*2249	*290	*2293	*447	20
juillet	2	29902	*2257	*674	*1298	*433	24
août	11388	23971	*2647	*93	*1903	*364	17
septembre	6873	21703	*3163	*88	*3508	*353	18
octobre	33687	15471	*3519	*1404	*1203	*278	14
novembre	86625	10793	*3810	*7903	*71	*184	9
décembre	133979	6691	3942	10169	0	*107	4
janvier	124809	9158	4006	9990	0	*153	5
février	100188	10927	4307	10095	0	*176	6
mars	94459	20067	5266	11517	0	*267	7
avril	25358	28496	4980	4968	1315	*388	15
mai	23858	24950	3880	4623	1485	*409	15
Total MJ/m ²	140.9	50.8	9.6	13.4	2.8	0.8	-

Mois 2006/07	Q Ecs MJ	Q Ch MJ	Q VenEch MJ	Q PacAir MJ	Q PacEau MJ	Q Sol MJ	Q VenOut MJ
juin	25556	3514	6779	558	7462	17684	2847
juillet	16941	0	961	401	4040	16321	4848
août	24301	2223	12416	-601	5927	13079	9207
septembre	27695	744	11958	-370	11798	12803	7354
octobre	29636	11927	23898	408	3860	8454	17322
novembre	30880	56343	39254	15675	346	4862	19831
décembre	34725	98090	53821	37090	3	2489	13908
janvier	35656	89638	49554	34714	4	3777	14345
février	31146	70166	48061	34077	8	5301	13023
mars	34455	65188	54142	36321	61	10237	17604
avril	27011	13169	26466	11427	4223	14639	17421
mai	29645	8450	25548	8291	4937	13164	14673
Total MJ/m ²	75.5	91.1	76.6	38.7	9.3	26.7	33.1

TAB. B.1 – Valeurs mensuelles mesurées du bâtiment Giacometti pour la période allant du 1er juin 2006 au 31 mai 2007. Les valeurs précédées d'un astérisque (*) sont des données manquantes qui ont été reconstituées.

Annexe C

Corrections climatiques

La consommation de combustible destinée au chauffage des bâtiments est influencée par le climat extérieur. Une correction climatique de l'énergie consommée (E_{hww}) est dès lors nécessaire si l'on désire comparer les performances énergétiques d'un bâtiment sur plusieurs années.

La mesure la plus répandue pour caractériser la rigueur d'un hiver est le degré-jour, calculé pour chaque période concernée et comparé à une référence choisie. Pour être cohérent avec le calcul des justificatifs thermiques effectués dans le canton de Genève, nous avons pris comme référence les 3072 DJ_{20/12} utilisés dans ces documents pour déterminer la demande de chauffage.

Le calcul des degrés-jours, pour une température moyenne des logements de 20°C et une température de non-chauffage de 12°C, s'effectue à l'aide de la relation ci-dessous (éq. C.1), où \bar{T}_j représente la température moyenne journalière du jour j :

$$DJ_{20/12} = \sum_{j=1}^{365} (20 - \bar{T}_j) \delta_j \quad \text{avec} \quad \delta_j = \begin{cases} 1 & \text{si } \bar{T}_j \leq 12 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

Nous avons utilisé les mesures de l'Institut suisse de météorologie pour calculer les degrés-jours des périodes allant du 1^{er} juin au 31 mai, depuis 1996 jusqu'à 2008 [38]. Les résultats sont affichés dans le Tableau C.1.

Sont également indiqués dans ce Tableau le nombre de jour de chauffage NJC₁₂ ainsi que la température extérieure moyenne T_{ext} . Les jours considérés comme "jour de chauffage" sont ceux pour lesquels la température moyenne journalière extérieure était inférieure ou égale à 12°C (NJC₁₂ = $\sum \delta_j$).

Seule la quantité d'énergie consommée pour le chauffage des bâtiments (Q_h) doit être corrigée. Si la répartition de chaleur entre chauffage et ECS est connue ($Q_{hww} = Q_h + Q_{ww}$), on peut corriger l'énergie consommée E_{hww} de la manière suivante :

$$E_{hww}^{cc} = E_{hww} \left(\frac{Q_{ww}}{Q_{hww}} + \frac{Q_h}{Q_{hww}} \cdot \frac{3072}{DJ_{20/12}} \right) \quad (\text{C.2})$$

Dans le cas qui nous concerne, cette répartition n'est pas toujours connue. Nous avons donc opté pour la répartition habituellement observée de 30% de chaleur pour l'ECS et de 70% pour le chauffage. On calcule alors un facteur de correction climatique "par défaut" F_{cc} :

$$E_{hww}^{F_{cc}} = E_{hww} \cdot F_{cc} \quad ; \quad F_{cc} \equiv \left(0.3 + 0.7 \frac{3072}{DJ_{20/12}} \right) \quad (C.3)$$

Tous les résultats sont présentés dans le Tableau C.1.

Période	DJ _{20/12}	NJC ₁₂	F _{cc}	T _{ext} °C
1996 / 97	3008	213	1.015	10.4
1997 / 98	2792	190	1.070	11.1
1998 / 99	3027	199	1.010	10.8
1999 / 00	2800	191	1.068	11.4
2000 / 01	2552	188	1.143	11.9
2001 / 02	2815	193	1.064	10.9
2002 / 03	2681	183	1.102	11.4
2003 / 04	2983	199	1.021	11.7
2004 / 05	2895	190	1.043	11.1
2005 / 06	3136	195	0.986	10.4
2006 / 07	2411	174	1.192	12.4
2007 / 08	3021	205	1.012	10.6

TAB. C.1 – Facteurs de correction climatique "par défaut" F_{cc} calculés par rapport à une base de 3072 DJ_{20/12} avec une répartition de 30% de chaleur pour l'ECS et de 70% pour le chauffage. La période prise en compte pour le calcul des degrés-jours (DJ) et des jours de chauffage (NJC) s'étend du 1^{er} juin au 31 mai. La température moyenne extérieure est également indiquée.

Annexe D

Point de vue du maître d'ouvrage et investisseur du Pommier (CIA)

Introduction

La réalisation et le suivi énergétique de l'ensemble d'immeubles Minergie du Pommier, (117 logements et 2500 m² de surfaces d'activités) par le biais du groupe de suivi, ont été très riches en enseignements. Nous appliquons déjà ces nouvelles connaissances dans nos deux projets Minergie actuellement en cours de construction (Pommier dernière étape, 111 logements et 2000 m² de surfaces d'activités) ou en cours d'autorisation (projet Pinchat 16 à Carouge, 106 logements).

Nous tenons à remercier tous les participants aux travaux du groupe de suivi énergétique, et en particulier le ScanE pour le financement des travaux et le CUEPE, (Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie) pour le pilotage des travaux de ce groupe ainsi que pour le soin et la pertinence apportés à l'analyse des résultats. Afin de faciliter la lecture de nos premières conclusions/pistes de réflexions relatives à la réalisation et à l'exploitation d'un bâtiment Minergie, nous avons choisi de présenter ce document sous forme de points liés aux différentes étapes du projet, ainsi qu'en fonction des différents acteurs.

Étape, conception et réalisation

Le problème du financement du surcoût d'un bâtiment Minergie ou à faible consommation énergétique ne doit pas être sous-évalué. L'investisseur le reporte sur les loyers des locataires qui ne bénéficient pas automatiquement d'une baisse des charges de chauffage et eau chaude correspondant. En effet, des installations plus " complexes " nécessitent également un suivi et un entretien supplémentaire par rapport à des installations plus courantes et donc des coûts supplémentaires qui ne sont pas nécessairement entièrement couverts par la baisse de consommation énergétique.

L'investisseur / maître d'ouvrage doit être convaincu de la pertinence de réaliser des bâtiments Minergie, ou à faible consommation énergétique au-delà des questions strictement économiques ou de rentabilité des investissements.

Dès la conception, le maître d'ouvrage va veiller à trouver les solutions techniques les plus simples pour limiter la consommation énergétique, tenant compte également de l'entretien, de la gestion et du remplacement des installations dans le temps. A priori, une amélioration de l'enveloppe thermique et du "facteur forme" (volumétrie compacte, dense et simple, par exemple sans attique ni

décrochements superflus) sont à privilégier par rapport à la sophistication des installations techniques imposant des réglages et des contrôles fréquents, nécessitant une gestion fine dans la durée. Ceci étant, il ne faut pas sacrifier la qualité architecturale et d'habitabilité pour des motifs exclusivement énergétiques.

Le locataire/habitant est un acteur incontournable

Une fois les immeubles en exploitation, les locataires/habitants deviennent des acteurs majeurs par leur comportement. Leur conscience environnementale et leur motivation ne sont pas aussi automatiques ou simples à assurer dans la durée.

Dans le cas du Pommier, nous avons eu la chance de bénéficier et participer à l'élaboration d'une petite plaquette, publiée et financée par le ScanE. Ce document édité en deux langues, (" Bienvenue en Minergie / Welcome to Minergie ") distribué à tous les locataires, a fait l'objet de deux séances d'information aux habitants après quelques mois d'occupation des immeubles. Elle explique les principes de base de la gestion énergétique d'un bâtiment ainsi que des éléments techniques tels que les vannes thermostatiques, la ventilation double-flux etc. Les locataires vont-ils pleinement collaborer à la performance énergétique de leur bâtiment ? Par exemple en ne laissant pas les fenêtres ouvertes inutilement, en réglant les vannes thermostatiques, en acceptant une température intérieure d'environ 20°C (sans appoint électrique pour les bébés et les personnes âgées) etc. ?

Il n'est pas toujours aisé de faire admettre par le locataire qu'il n'est pas possible d'assurer un réglage individualisé dans un bâtiment collectif (voir l'exemple de l'arcade louée à un ostéopathe) et très souvent, par gain de paix on finit par "surchauffer" un bâtiment entier pour éviter des plaintes de la part de la minorité de locataires plus sensibles.

Comment expliquer aux locataires que, malgré une consommation d'énergie réduite de moitié en comparaison avec d'autres bâtiments, les charges de chauffage et d'eau chaude ne diminuent pas dans les mêmes proportions, compte tenu du coût du pilotage et de l'entretien des installations tel que le changement des filtres de la ventilation double-flux, des panneaux solaires, régulation, etc ?

Quelques éléments techniques

Lors de la dernière séance du groupe de suivi qui a eu lieu le 14 décembre 2007, le CUEPE a résumé les conclusions actuelles comme suit (*en italique*) :

"L'approche interdisciplinaire a permis d'intégrer la performance énergétique durant toutes les phases du projet". Il est indispensable pour un maître d'ouvrage d'avoir des mandataires compétents et très motivés pour aboutir à un bon résultat.

"Les bâtiments du Pommier consomment environ 50% d'énergie en moins qu'un immeuble traditionnel". Nous sommes très satisfaits de ce résultat mais n'oublions pas qu'il y a un prix à payer : surcoût à l'investissement, loyer plus cher pour les locataires. Le rôle des différents intervenants ainsi que du groupe de suivi a permis d'arriver à ce résultat mais nous ne pouvons pas assurer ce type de suivi "sophistiqué" et coordonné pour nos 200 autres immeubles !

"La complication des systèmes techniques utilisés au Pommier peut se justifier du point de vue énergétique et économique mais elle nécessite un suivi de qualité (gain dynamique)". Le nombre

d'intervenants, mandataires et entreprises pour le suivi des installations est trop important et la coordination reste difficile (voir le rapport d'exploitation 2007 de l'installation de chauffage-ventilation réalisé par Enerbat). A titre d'illustration nous présentons ci-dessous une liste non exhaustive des intervenants (hors groupe de suivi, du CUEPE, de la régie, du concierge et des nombreux locataires concernés !) :

Ingénieurs de surveillance et de gestion	Enerbat
Entretien chaudière	Ygnis
Contrôle monoblocs	Syneco
Changement filtres ventilation	Omniservices
Entretien monoblocs ventilation	Menerga
Distribution chauffage	Bosson Pillet
Système de régulation	Siemens
Panneaux solaires	Agena

"La contribution de la pompe à chaleur est discutable : bilan en énergie primaire neutre et performance économique fortement dépendante du prix de l'électricité". Privilégier dès la conception la simplicité des installations pour réduire les risques de pannes et les difficultés de coordination et gestion dans la durée.

Conclusions

Malgré les quelques critiques évoquées ci-dessus, nous (CIA) restons convaincus que les efforts doivent être poursuivis afin de réaliser des nouvelles constructions à faible consommation énergétique, sans éluder les questions des coûts et du suivi des installations dans le temps.

John Lateo
Chef de la division immobilière de la CIA
Janvier 2008

Annexe E

Caractéristiques des bâtiments étudiés

Cette annexe contient les fiches des immeubles étudiés. Chaque fiche contient des informations générales sur l'objet en question ainsi que tous les résultats des flux énergétiques ou économiques relevés, mesurés et calculés. Ces fiches sont classées dans l'ordre ci-dessous :

Acronyme	Année	Adresse (Genève)	Quartier
FINS	1997	Chemin des Fins 8-8A	Grand-Saconnex
GIAC	1997	Rue Alberto-Giacometti 13-15	Grand-Saconnex
SOUM	2000	Route de Sous-Moulin 27-29 et 31-33	Chêne-Bourg
TAMB	2001	Chemin de la Tambourine 7-15	Carouge
CARA	2001	Rue Carabot 25-25C et 27-27B	Cressy
MARB	2003	Chemin du Repos 1-3 et 5-7 Avenue du Cimetière 14-20	Petit-lancy Petit-lancy
POMB2	2004	Rue Sonnex 3-5	Grand-Saconnex
POMC12	2005	Rue Gardiol 1-3, 5-7, 9-11 et 13-15	Grand-Saconnex
POMB1	2004	Rue Sonnex 19-23 Rue Gardiol 8-14 Rue Alberto-Giacometti 8-10	Grand-Saconnex Grand-Saconnex Grand-Saconnex
ZABOU	2004	Chemin des Ouches 14-16	Châteleine

FINS



Données générales

Description	Bâtiment de logements locatifs avec jardins privés.
Date de mise en service	1997
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	LGZ
Emplacement	Genève (Grand-Saconnex), Chemin des Fins 8-8A.

Concept énergétique

Production de chaleur	Chaudière à gaz de 108 kW
Distribution de chaleur	Radiateurs
ECS	Production centralisée à proximité de la chaudière
Ventilation	Extraction en toiture

Caractéristiques du bâtiment

Surface de référence énergétique (SRE)	2'264 m ²
Volume chauffé net	5'940 m ³
Surface de l'enveloppe	1'984 m ²
Nombre d'appartements	21 app
Nombre de pièces	99 pièce
Coût total de l'ouvrage	4'521'108 CHF
État locatif (2006)	455'460 CHF/an

Indicateurs généraux

Surface enveloppe / SRE	0.88 m ² /m ²
SRE logements / pièce	23 m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	1997 CHF/m ²
État locatif / SRE	201 CHF/m ² an
Puissance thermique installée (gaz)	48 W/m ²

Estimation de l'IDC

Consommation annuelle de gaz estimée par l'ingénieur sur la base des besoins thermiques selon SIA 384/2, d'un climat standard annuel de 3072 degrés-jour et de 70 habitants consommant en moyenne 50 litres d'ECS par jour.

374 MJ/m²an

Consommation énergétique	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02
Gaz	36'593	38'647	33'871	32'360	32'391 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	606	640	561	536	537 MJ/m2an
IDC corrigé climat	649	647	599	612	571 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	74%	73%	60%	64%	53%
Électricité chaufferie	-	-	-	-	- kWh/an
Électricité chaufferie	-	-	-	-	- MJ/m2an
	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07
Gaz	31'975	31'739	32'304	32'547	28'721 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	530	526	535	539	476 MJ/m2an
IDC corrigé climat	584	537	558	531	567 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	56%	44%	49%	42%	52%
ECS	-	1'025	1'118	1'188	1'096 m3/an
ECS (1)	-	80	87	92	85 MJ/m2an
ECS (1) vs 75 MJ/m2.an	-	6%	16%	23%	14%
ECS (1)	-	1'822	1'988	2'112	1'948 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	-	4'049	4'090	4063	3'812 kWh/an
Électricité chaufferie	-	6.4	6.5	6.5	6.1 MJ/m2an
	2007/08	Moyenne			
Gaz	30'931	32'916 m3/an			
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	512	545 MJ/m2an			
IDC corrigé climat	518	579 MJ/m2an			
IDC corrigé climat vs estimé	39%	55%			
ECS	1'087	1'103 m3/an			
ECS (1)	85	86 MJ/m2an			
ECS (1) vs 75 MJ/m2.an	13%	14%			
ECS (1)	1'932	1'961 MJ/pce.an			
Électricité chaufferie	3'979	3'999 kWh/an			
Électricité chaufferie	6.3	6.4 MJ/m2an			
Électricité ventilateurs extraction (estimation 2 kWh/m2an)		4'528 kWh/an			
Électricité ventilateurs extraction (estimation 2 kWh/m2an)		7.2 MJ/m2an			

(1) Hypothèses : température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C, soit un équivalent énergétique de 176 MJ/m3.

Coût d'investissement du système thermique	CHF TTC	CHF/m2
Production de chaleur	37'724	16.7
Distribution de chaleur	111'073	49.1
Distribution d'ECS (estimation à 12 CHF/m2)	27'168	12.0
Honoraires Ing Chauffage	14'816	6.5
TOTAL	190'781	84.3

Charges d'exploitation du système thermique (2006-2007)		CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système thermique (20 ans @ 6.5%)		17'315	7.6
Autres frais fixes		3'808	1.7
Assurance installation (1% install)		1'908	0.8
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)		1'900	0.8
Maintenance/dépannage (moyenne 2000-2007)		1'724	0.8
Compte d'exploitation		642	0.3
Compte de chauffage		1'082	0.5
Achat d'énergie		27'765	12.3
Gaz (9 ct/kWh)		26'926	11.9
Électricité chaufferie (22 ct/kWh)		839	0.4
Honoraires décompte chauffage		2'378	1.1
TOTAL		52'990	23.4
Charges indirectes (loyers)		21'765	9.6
Charges directes (compte chauffage)		31'225	13.8

Indicateurs système thermique

Coût système thermique / coût de l'ouvrage	4.2%
Charges indirectes / état locatif	4.8%
Charges directes / état locatif	6.9%
Achat d'énergie / charges d'exploitation	52.4%

Coût d'investissement du système aéraulique		CHF TTC	CHF/m2
Locaux sanitaires et cuisines		26'678	11.8
Local containers		2'126	0.9
Abris PC		7'256	3.2
Honoraires Ing Ventilation		3'743	1.7
TOTAL		39'803	17.6

Charges d'exploitation du système aéraulique (2006-2007)		CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système aéraulique (20 ans @ 6.5%)		3612	1.6
Autres frais fixes		398	0.2
Assurance installation (1% install)		398	0.2
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)		0	0.0
Maintenance/dépannage (moyenne 2000-2007)		918	0.4
Compte d'exploitation		918	0.4
Compte de chauffage		0	0.0
Achat d'énergie		996	0.4
Électricité ventilateurs (estimation, 22 ct/kWh)		996	0.4
TOTAL		5'924	2.6
Charges indirectes (loyers)		5'924	2.6
Charges directes (compte chauffage)		0	0.0

Indicateurs système aéraulique

Coût système aéraulique / coût de l'ouvrage

0.9%

Entretien des installations techniques

Chauffage Contrat d'entretien standard
Ventilation Contrat d'entretien standard

Signature énergétique

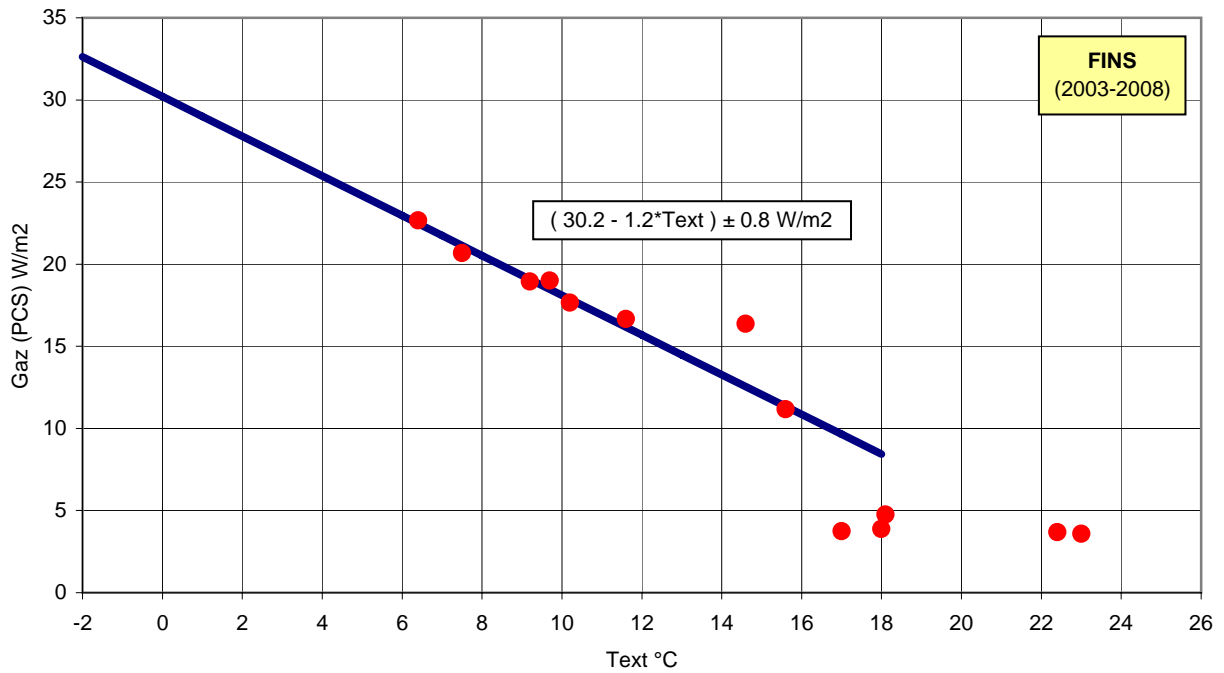
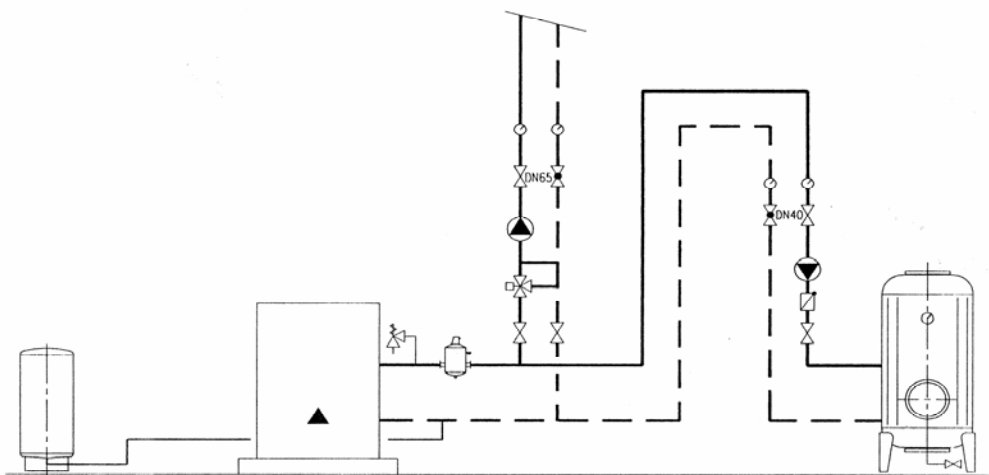


Schéma de principe de l'installation de chauffage



FINS

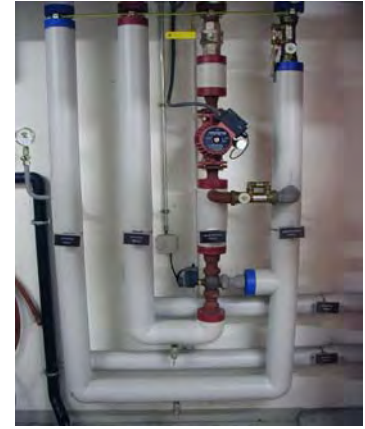
Divers - photos



Chaudière



Bouilleur ECS



Départ secteur chauffage

GIAC



Données générales

Description	Bâtiment de logements locatifs.
Date de mise en service	1997
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	LGZD
Emplacement	Genève (Grand-Saconnex), Rue Alberto-Giacometti 13-15.

Concept énergétique

Production de chaleur	Une chaudière à gaz de 147 kW en toiture.
Distribution de chaleur	Chauffage par les plafonds.
ECS	Production centralisée au sous-sol.
Ventilation	Extraction de l'air vicié en toiture.

Caractéristiques du bâtiment

Surface de référence énergétique (SRE)	3'526 m ²
Volume chauffé net	9'443 m ³
Surface de l'enveloppe	4'028 m ²
Nombre d'appartements	30 app
Nombre de pièces	150 pièce
Coût total de l'ouvrage	7'301'144 CHF
État locatif (2006)	780'000 CHF/an

Indicateurs généraux

Surface enveloppe / SRE	1.14 m ² /m ²
SRE logements / pièce	24 m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	2071 CHF/m ²
État locatif / SRE	221 CHF/m ² an
Puissance thermique installée (gaz)	42 W/m ²

Données du justificatif thermique

Pertes enveloppe (3072 DJ 20/12)	187 MJ/m ² an
Pertes renouvellement d'air (1.6 m ³ /h/m ²)	135 MJ/m ² an
Gains internes et solaires	-89 MJ/m ² an
Demande de chauffage 380/1	233 MJ/m²an

Estimation de l'IDC

Demande ECS (380/1)	75 MJ/m2an
Estimation demande nette de chaleur	308 MJ/m2an
Rendement global	0.8 -
Estimation IDC	385 MJ/m2an

Consommation énergétique	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02
Gaz	59'308	54'329	53'978	48'281	49'286 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	631	578	574	513	524 MJ/m2an
IDC corrigé climat	675	584	613	587	558 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	75%	52%	59%	52%	45%
Électricité chaufferie	-	-	-	-	- kWh/an
Électricité chaufferie	-	-	-	-	- MJ/m2an

	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07
Gaz	44'348	46'101	43'545	45'830	37'311 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	472	490	463	487	397 MJ/m2an
IDC corrigé climat	520	501	483	480	473 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	35%	30%	25%	25%	23%
ECS	-	2'123	1'991	1'961	1'996 m3/an
ECS (1)	-	106	99	98	100 MJ/m2an
ECS (1) vs estimé	-	41%	33%	31%	33%
ECS (1)	-	2'491	2'337	2'301	2'342 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	-	5'323	5'170	5'386	4'670 kWh/an
Électricité chaufferie	-	5.4	5.3	5.5	4.8 MJ/m2an

	2007/08	Moyenne
Gaz	47'027	48'122 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	500	512 MJ/m2an
IDC corrigé climat	506	544 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	31%	41%
ECS	2'319	2'078 m3/an
ECS (1)	116	104 MJ/m2an
ECS (1) vs estimé	54%	38%
ECS (1)	2'721	2'438 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	5'512	5'212 kWh/an
Électricité chaufferie	5.6	5.3 MJ/m2an

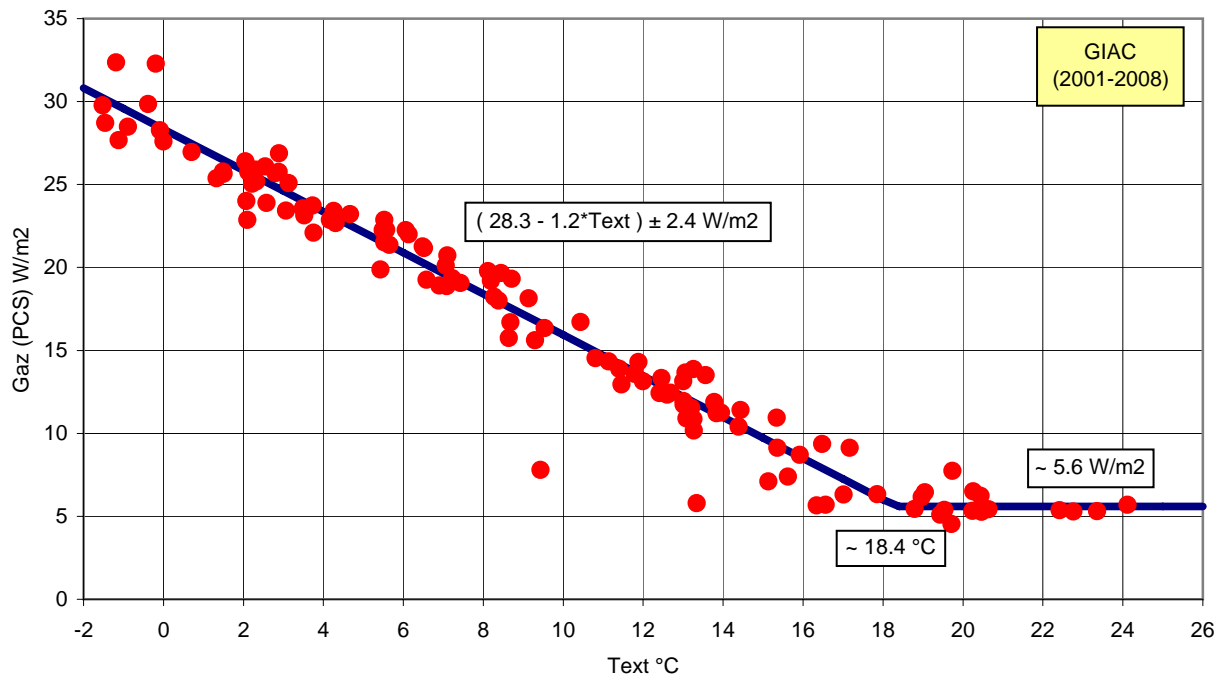
(1) Hypothèses : température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C, soit un équivalent énergétique de 176 MJ/m3.

Entretien des installations techniques

Chauffage Contrat d'entretien standard. Changement entreprise été 2001.

Ventilation ?

Signature énergétique



Divers - photos



Chaudière en toiture



Extraction d'air en toiture



Bouilleurs ECS au sous-sol



Départ chaleur en toiture

GIAC

SOUM



Données générales

Description	Complexe de deux bâtiments de logements locatifs.
Date de mise en service	2000
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	LGZD
Emplacement	Genève (Chêne-Bourg), Rte de Sous-Moulin 27-29 et 31-33.

Concept énergétique

Production de chaleur	Une chaudière à gaz de 170 kW.
Distribution de chaleur	Chauffage au sol.
ECS	Production centralisée dans chaque bâtiment (2).
Ventilation	Double-flux avec échangeur de chaleur à plaques.

Caractéristiques du bâtiment

Surface de référence énergétique (SRE)	4'212 m ²
Volume chauffé net	10'140 m ³
Surface de l'enveloppe	5'450 m ²
Nombre d'appartements	32 app
Nombre de pièces	184 pièce
Coût total de l'ouvrage	9'578'774 CHF
État locatif (2006)	861'000 CHF/an

Indicateurs généraux

Surface enveloppe / SRE	1.29 m ² /m ²
SRE logements / pièce	23 m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	2274 CHF/m ²
État locatif / SRE	204 CHF/m ² an
Puissance thermique installée (gaz)	40 W/m ²

Données du justificatif thermique

Pertes enveloppe (3072 DJ 20/12)	165 MJ/m ² an
Pertes renouvellement d'air (1.4 m ³ /h/m ²)	124 MJ/m ² an
Gains internes et solaires	-104 MJ/m ² an
Demande de chauffage 380/1	185 MJ/m²an

Estimation de l'IDC

Demande ECS (380/1)	75 MJ/m2an
Gain double-flux (45% pertes ventilation)	-56 MJ/m2an
Estimation demande nette de chaleur	204 MJ/m2an
Rendement global	0.8 -
Estimation IDC	255 MJ/m2an

Consommation énergétique	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07
Gaz	64'091	66'469	62'234	63'785	47'089 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	571	592	554	568	419 MJ/m2an
IDC corrigé climat	629	604	578	560	500 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	147%	137%	127%	120%	96%
ECS	-	2'827	2'456	2'584	2'230 m3/an
ECS (1)	-	118	103	108	93 MJ/m2an
ECS (1) vs estimé	-	57%	37%	44%	24%
ECS (1)	-	2'704	2'349	2'472	2'133 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	-	9'448	8'775	9286	8'391 kWh/an
Électricité chaufferie	-	8.1	7.5	7.9	7.2 MJ/m2an

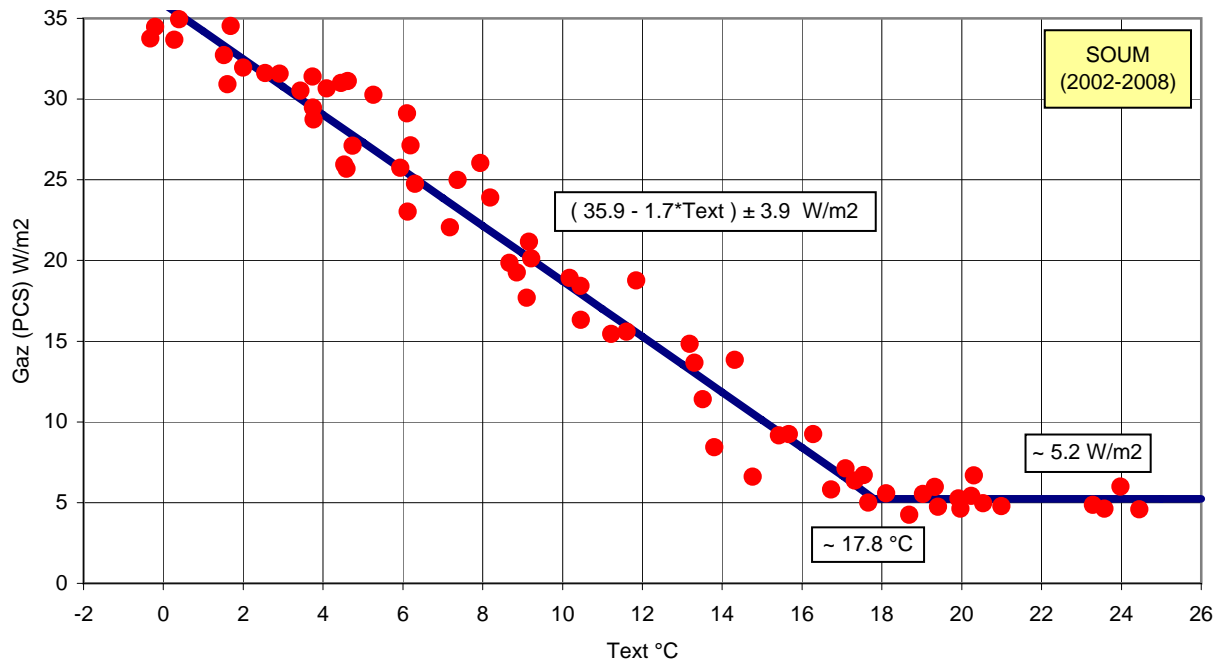
	2007/08	Moyenne
Gaz	64'349	61'336 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	573	546 MJ/m2an
IDC corrigé climat	580	575 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	127%	125%
ECS	2'635	2'546 m3/an
ECS (1)	110	106 MJ/m2an
ECS (1) vs estimé	47%	42%
ECS (1)	2'520	2'436 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	9'754	9'131 kWh/an
Électricité chaufferie	8.3	7.8 MJ/m2an
Électricité ventilateurs double-flux (estimation 5 kWh/m2an)		21'060 kWh/an
Électricité ventilateurs double-flux (estimation 5 kWh/m2an)		18.0 MJ/m2an

(1) Hypothèses : température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C, soit un équivalent énergétique de 176 MJ/m3.

Entretien des installations techniques

Chauffage	Contrat d'entretien standard.
Ventilation	Contrat d'entretien standard.

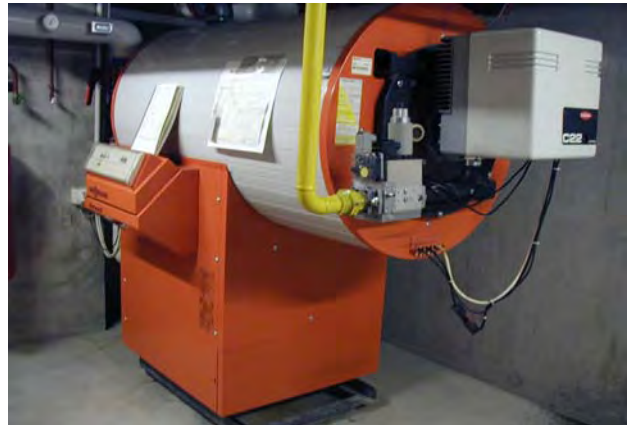
Signature énergétique



Divers - photos



Monobloc de ventilation double-flux.



Chaudière à gaz 170 kW



Départ chauffage



Bouilleur ECS

SOOM

TAMB



Données générales

Description	Bâtiment de logements locatifs.
Date de mise en service	2001
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	LGZD
Emplacement	Genève (Carouge), Chemin de la Tambourine 7-15.

Concept énergétique

Production de chaleur	Deux chaudières à gaz de 250 kW.
Particularité	Production solaire thermique en contracting (136 m ² en toiture). Achat de chaleur solaire à 15.6 ct/kWh indexé annuellement sur l'IPC.
Distribution de chaleur	Radiateurs.
ECS	Production centralisée à proximité des chaudières.
Ventilation	Extraction de l'air vicié en toiture.

Caractéristiques du bâtiment

Surface de référence énergétique (SRE)	10'303 m ²
Volume chauffé net	- m ³
Surface de l'enveloppe	- m ²
Nombre d'appartements	80 app
Nombre de pièces	380 pièce
Coût total de l'ouvrage	21'201'842 CHF
État locatif (2006)	1'946'400 CHF/an

Indicateurs généraux

Surface enveloppe / SRE	- m ² /m ²
SRE logements / pièce	27 m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	2058 CHF/m ²
État locatif / SRE	189 CHF/m ² an
Puissance thermique installée (gaz)	49 W/m ²

Consommation énergétique	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07
Gaz	124'836	139'716	132'587	129'807	91'204 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	454	509	483	472	332 MJ/m2an
IDC corrigé climat	501	519	503	466	396 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	-	-	-	-	-
ECS	-	5'972	6'240	5'871	5'365 m3/an
ECS (1)	-	102	107	100	92 MJ/m2an
ECS (1) vs 75 MJ/m2an	-	36%	42%	34%	22%
ECS (1)	-	2766	2890	2719	2485 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	-	24'425	22'416	22'469	19'961 kWh/an
Électricité chaufferie	-	8.5	7.8	7.9	7.0 MJ/m2an
	2007/08				Moyenne
Gaz	120'249				123'066 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	438				448 MJ/m2an
IDC corrigé climat	443				471 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	-				-
ECS	4'931				5'676 m3/an
ECS (1)	84				97 MJ/m2an
ECS (1) vs 75 MJ/m2an	12%				29%
ECS (1)	2284				2629 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	20'234				21'901 kWh/an
Électricité chaufferie	7.1				7.7 MJ/m2an

(1) Hypothèses : température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C, soit un équivalent énergétique de 176 MJ/m3.

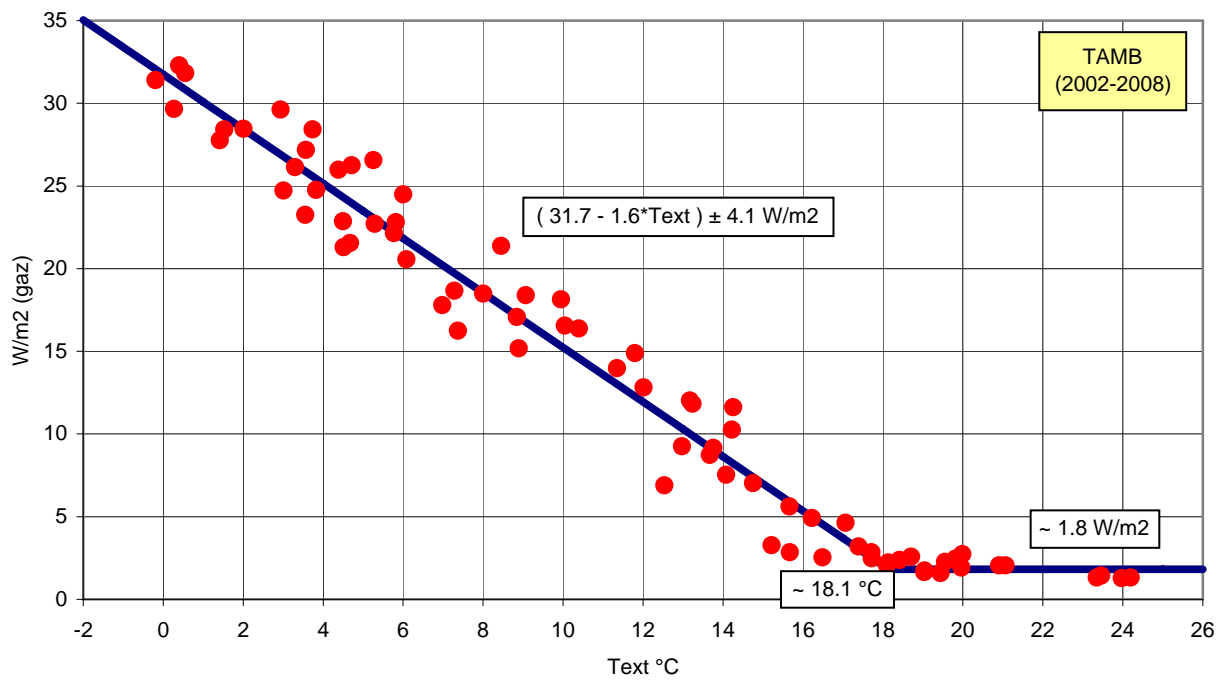
Entretien des installations techniques

Chauffage Contrat d'entretien standard.

Solaire L'entretien de l'installation est assurée par le contracteur.

Ventilation

Signature énergétique



Divers - photos



Chaudières



Bouilleurs ECS

CARA



Données générales

Description	Complexe de deux bâtiments de logements locatifs (pas d'ascenseurs).
Date de mise en service	2001
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	LGZD
Emplacement	Genève (Cressy), Rue Carabot 25-25C et 27-27B.

Concept énergétique

Production de chaleur	Chaudière à gaz de 150kW
Distribution de chaleur	Conduite à distance entre les deux bâtiments. Chauffage au sol.
ECS	Production centralisée à proximité de la chaudière et dans la sous-station.
Ventilation	Double-flux avec échangeur de chaleur à plaques.

Caractéristiques des bâtiments	bât Y	bât Z	Total
Surface de référence énergétique (SRE)	1'961	2'112	4'073 m2
Volume chauffé net	4'233	4'558	8'791 m3
Surface de l'enveloppe	2'367	2'842	5'209 m2
Nombre d'appartements	24	18	42 app
Nombre de pièces	92	98	190 pièce
Coût total de l'ouvrage			8'933'380 CHF
État locatif (2006)			881'124 CHF/an

Indicateurs généraux	bât Y	bât Z	Total
Surface enveloppe / SRE	1.21	1.35	1.28 m2/m2
SRE logements / pièce	21	22	21 m2/pce
Coût de l'ouvrage / SRE	-	-	2193 CHF/m2
État locatif / SRE	-	-	216 CHF/m2an
Puissance thermique installée (gaz)	-	-	37 W/m2

Données du justificatif thermique	bât Y	bât Z	
Pertes enveloppe (3072 DJ 20/12)	205	206	MJ/m2an
Pertes renouvellement d'air (1.4 m3/h/m2)	111	111	MJ/m2an
Gains internes et solaires	-112	-98	MJ/m2an
Demande de chauffage 380/1	204	219	MJ/m2an

Estimation de l'IDC	bât Y	bât Z	Moyenne
Demande ECS (380/1)	75	75	75 MJ/m2an
Gain double-flux (45% pertes ventilation)	-50	-50	-50 MJ/m2an
Estimation demande nette de chaleur	229	244	237 MJ/m2an
Rendement global	0.8	0.8	0.8 -
Estimation IDC	286	305	296 MJ/m2an

Consommation énergétique	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07
Gaz	49'798	57'881	58'334	58'031	42'934 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	458	533	537	534	395 MJ/m2an
IDC corrigé climat	505	544	560	527	471 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	71%	84%	89%	78%	59%
ECS		2'080	2'034	2'125	2'058 m3/an
ECS (3)		90	88	92	89 MJ/m2an
ECS (3) vs estimé		20%	17%	22%	19%
ECS (3)		1'932	1'889	1'974	1'912 MJ/pce.an
Électricité chaufferie (1)	9'159	9'056	4'585	9330	8'969 kWh/an
Électricité chaufferie (1)	8.1	8.0	8.1	8.2	7.9 MJ/m2an

	2007/08	Moyenne
Gaz	52'066	53'174 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	479	490 MJ/m2an
IDC corrigé climat	485	515 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	64%	74%
ECS	2'053	2'070 m3/an
ECS (3)	89	89 MJ/m2an
ECS (3) vs estimé	18%	19%
ECS (3)	1'907	1'923 MJ/pce.an
Électricité chaufferie (1)	9'040	8'356 kWh/an
Électricité chaufferie (1)	8.0	8.1 MJ/m2an
Électricité ventilateurs double-flux (2)		18'800 kWh/an
Électricité ventilateurs double-flux (2)		16.6 MJ/m2an

(1) Le compteur de chauffage n'alimente que la sous-station Y. La sous-station Z est alimentée par les services généraux du Z. La valeur prise en compte est, par estimation, le double de la valeur mesurée par le compteur de chauffage.

(2) Consommation estimée sur la base d'une mesure ponctuelle, du rapport de mise en service et des horaires de fonctionnement.

(3) Hypothèses : température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C, soit un équivalent énergétique de 176 MJ/m3.

Coût d'investissement du système thermique	CHF TTC	CHF/m2
Production de chaleur	50'951	12.5
Distribution de chaleur	204'635	50.2
Distribution d'ECS	66'767	16.4
Honoraires Ing Chauffage	22'863	5.6
TOTAL	345'216	84.8

Charges d'exploitation du système thermique (2006-2007)	CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système thermique (20 ans @ 6.5%)	31'331	7.7
Autres frais fixes	5'952	1.5
Assurance installation (1% install)	3'452	0.8
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)	2'500	0.6
Maintenance/dépannage (moyenne 2002-2008)	8'239	2.0
Compte d'exploitation	1'822	0.4
Compte de chauffage	6'417	1.6
Achat d'énergie	42'224	10.4
Gaz (9 ct/kWh)	40'251	9.9
Électricité chaufferie (22 ct/kWh)	1'973	0.5
Honoraires décompte chauffage	6'025	1.5
TOTAL	93'771	23.0
Charges indirectes (loyers)	39'105	9.6
Charges directes (compte chauffage)	54'666	13.4

Indicateurs système thermique

Coût système thermique / coût de l'ouvrage	3.9%
Charges indirectes / état locatif	4.4%
Charges directes / état locatif	6.2%
Achat d'énergie / charges d'exploitation	45.0%

Coût d'investissement du système aéraulique	CHF TTC	CHF/m2
Installation d'extraction	198'490	48.7
Honoraires Ing Ventilation	18'291	4.5
TOTAL	216'781	53.2

Charges d'exploitation du système aéraulique (2006-2007)	CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système aéraulique (20 ans @ 6.5%)	19674	4.8
Autres frais fixes	3968	1.0
Assurance installation (1% install)	2168	0.5
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)	1800	0.4
Maintenance/dépannage (moyenne 2002-2008)	2'123	0.5
Compte d'exploitation	2'123	0.5
Compte de chauffage	0	0.0

Achat d'énergie	4'136	1.0
Électricité ventilateurs (estimation, 22 ct/kWh)	4'136	1.0
TOTAL	29'901	7.3
Charges indirectes (loyers)	29'901	7.3
Charges directes (compte chauffage)	0	0.0

Indicateurs système aéraulique

Coût système aéraulique / coût de l'ouvrage 2.4%

Entretien des installations techniques

- Chauffage Contrat d'entretien standard jusqu'à mai 2005
 Contrat incluant l'optimisation de l'installation dès mai 2005 (avec signature énergétique)
- Ventilation Contrat d'entretien du monobloc double-flux. Deux passages par an

Signature énergétique

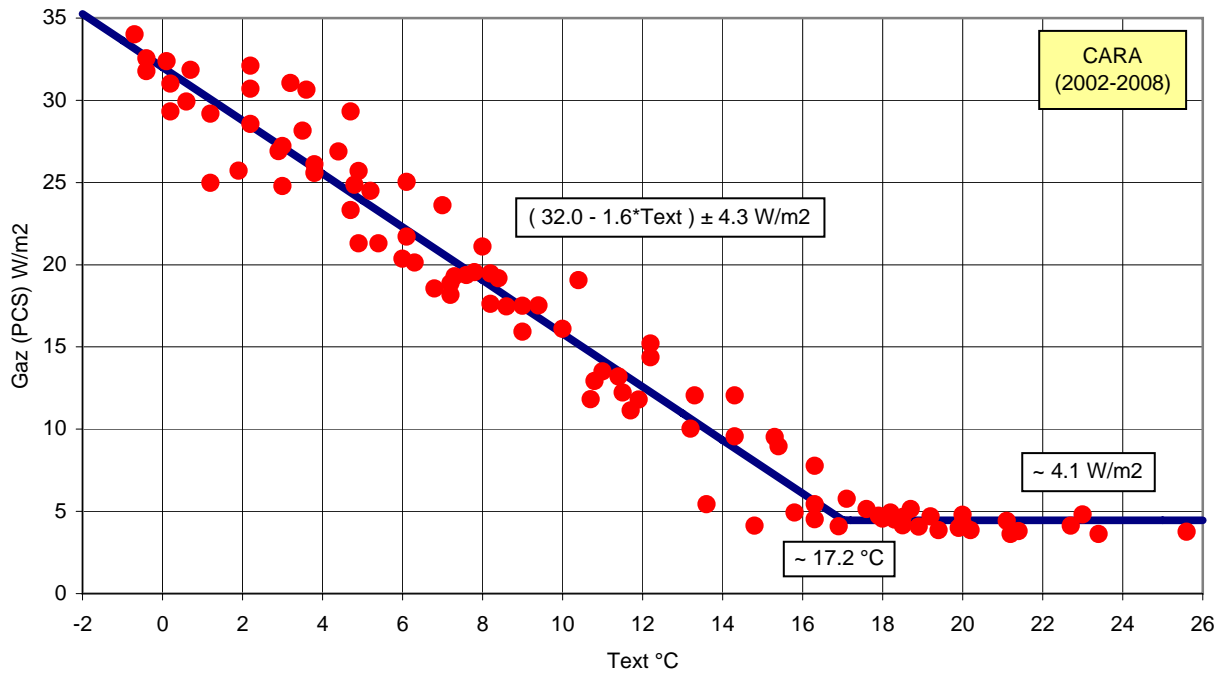
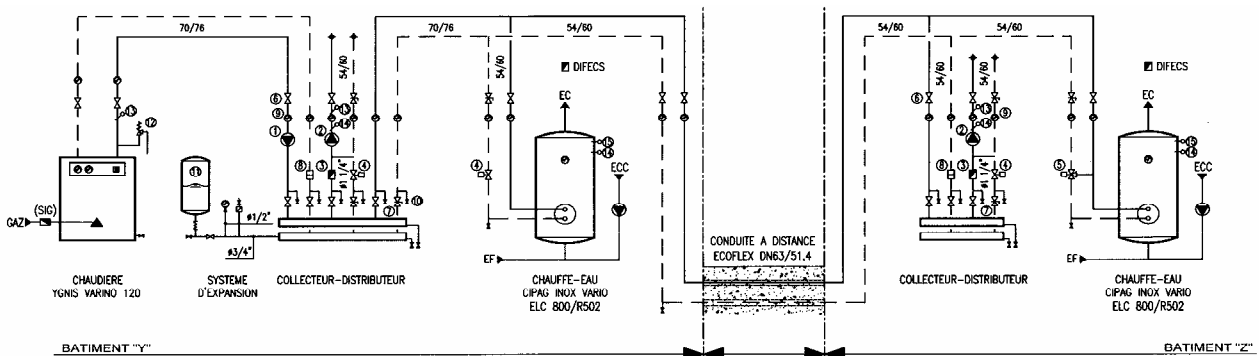


Schéma de principe de l'installation de chauffage



Divers - photos

L'isolation a été réalisée à l'intérieur des bâtiments. Sur mandat de l'ingénieur thermicien, le CUEPE a confirmé la présence de ponts de froids et a estimé à 20 kW la puissance supplémentaire à installer pour compenser ceux-ci. Une chaudière de 150 kW a donc été installée au lieu des 120 kW prévus initialement.



Monobloc double-flux



Prises d'air



Bouilleur ECS



Collecteur-distributeur



Chaudière

MARB



Données générales

Description	Complexe de trois bâtiments de logements locatifs.
Date de mise en service	2003
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	HLM & LGZD (Cimetière 20 et Repos 5-7)
Emplacement	Genève (Petit-Lancy), Ch. Du Repos 1-3 et 5-7, Av. du Cimetière 14-20.

Concept énergétique

Production de chaleur	Chaque bâtiment est indépendant.
> Repos 1-3 (bât F)	Une chaudière à gaz de 150 kW.
> Repos 5-7 (bât E.)	Une chaudière à gaz de 150 kW.
> Cimetière 14-20 (bât AD)	Deux chaudières à gaz de 250 kW et 4 sous-stations.
Distribution de chaleur	Chauffage au sol.
ECS	Production centralisée (local chaudière ou sous-station).
Ventilation	Extraction de l'air vicié en toiture.

Caractéristiques des bâtiments	Repos 1-3	Repos 5-7	Cime 14-20	Total
Surface de référence énergétique (SRE)	2689	2'651	8'784	14'124 m2
Volume chauffé net	6991	6'892	22'837	36'720 m3
Surface de l'enveloppe	2546	2'492	8'517	13'555 m2
Nombre d'appartements	23	23	79	125 app
Nombre de pièces	112	107	366	585 pièce
Coût total de l'ouvrage	-	-	-	36'774'332 CHF
État locatif (2006)	-	-	-	2'806'872 CHF/an

Indicateurs généraux	Repos 1-3	Repos 5-7	Cime 14-20	Total
Surface enveloppe / SRE	0.95	0.94	0.97	0.96 m2/m2
SRE logements / pièce	24	25	24	24 m2/pce
Coût de l'ouvrage / SRE	-	-	-	2604 CHF/m2
État locatif / SRE	-	-	-	199 CHF/m2an
Puissance thermique installée (gaz)	56	57	57	- W/m2

Données du justificatif thermique	Repos 1-3	Repos 5-7	Cime 14-20
Pertes enveloppe (3072 DJ 20/12)	171	170	171 MJ/m2an

Pertes renouvellement d'air (1.6 m3/h/m2)	134	134	134 MJ/m2an
Gains internes et solaires	-118	-116	-126 MJ/m2an
Demande de chauffage 380/1	187	188	179 MJ/m2an

Estimation de l'IDC	Repos 1-3	Repos 5-7	Cime 14-20
Demande ECS (380/1)	75	75	76 MJ/m2an
Estimation demande nette de chaleur	262	263	255 MJ/m2an
Rendement global	0.8	0.8	0.8 -
Estimation IDC	328	329	319 MJ/m2an

Consommation énergétique	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08
---------------------------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Repos 1-3 (bât F)

Gaz	32'421	33'730	33'018	28'774	31'723 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	452	470	460	401	442 MJ/m2an
IDC corrigé climat	462	491	454	478	448 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	41%	50%	39%	46%	37%

Électricité chaufferie	5'004	5'276	5'007	2'678	4'885 kWh/an
Électricité chaufferie	6.8	7.2	6.8	3.6	6.6 MJ/m2an

Repos 5-7 (bât E.)

Gaz	34'401	30'445	26'849	24'315	27'687 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	487	431	380	344	392 MJ/m2an
IDC corrigé climat	497	449	374	410	396 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	51%	37%	14%	25%	21%

Électricité chaufferie	3'951	4'895	3'564	5'969	7'273 kWh/an
Électricité chaufferie	1.6	2.0	1.5	2.4	3.0 MJ/m2an

Cimetière 14-20 (bât AD)

Gaz	120'697	112'746	113'800	104'300	116'768 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	515	481	486	445	498 MJ/m2an
IDC corrigé climat	526	502	479	531	504 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	65%	57%	50%	67%	58%

Électricité chaufferie	9'578	9'714	9'717	9'462	10'265 kWh/an
Électricité chaufferie	2.4	2.5	2.5	2.4	2.6 MJ/m2an

Moyenne 2003-2008

	Repos 1-3	Repos 5-7	Cime 14-20
Gaz	31'933	28'739	113'662 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	445	407	485 MJ/m2an
IDC corrigé climat	466	425	508 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	42%	29%	59%

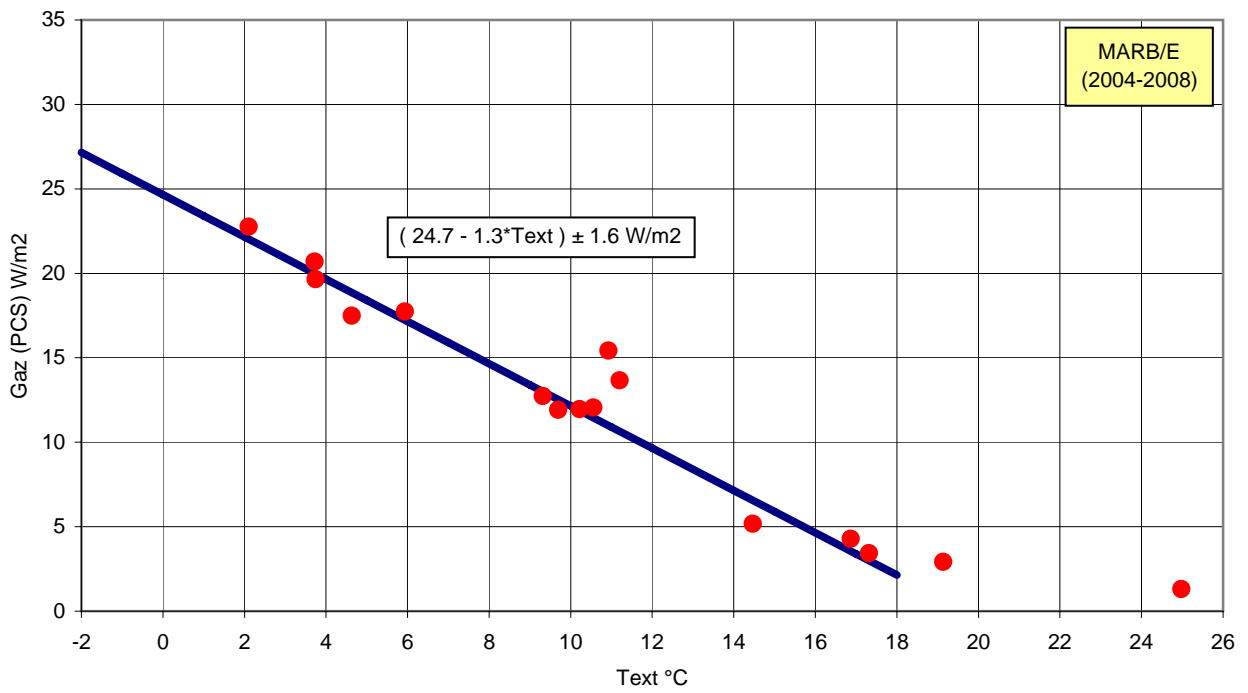
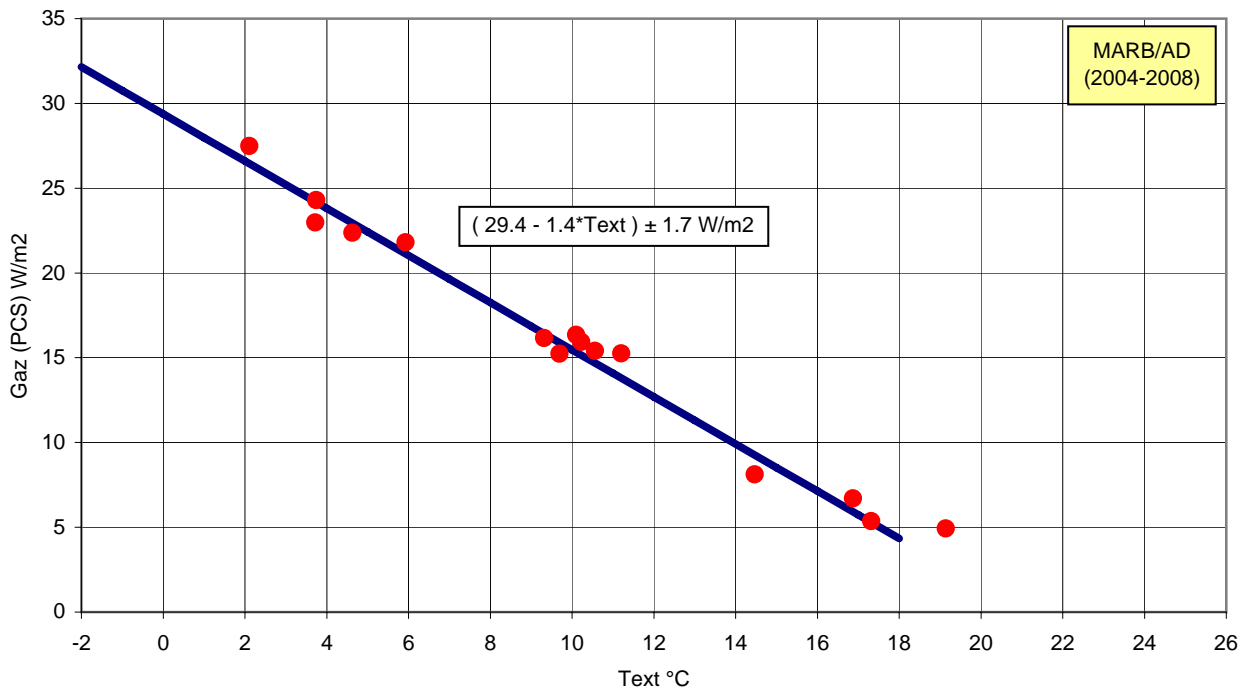
Électricité chaufferie	4'570	5'130	9'747 kWh/an
Électricité chaufferie	6.2	2.1	2.5 MJ/m2an

Entretien des installations techniques

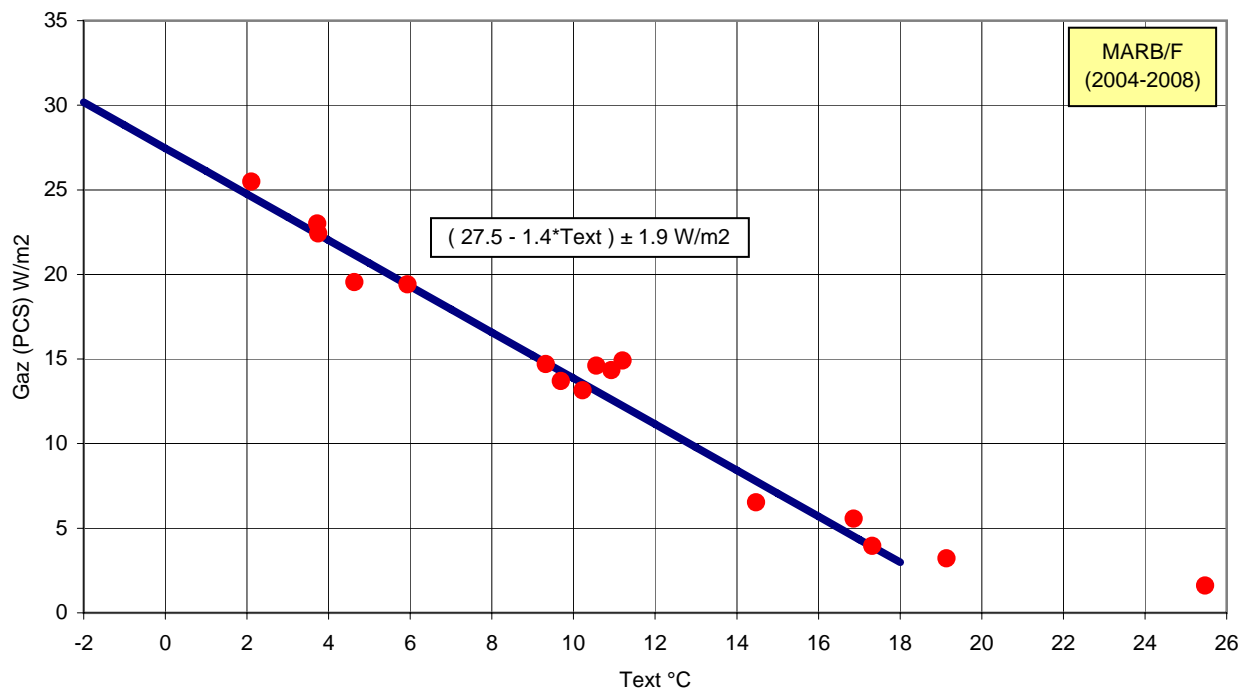
Chauffage Contrat d'entretien standard.

Ventilation ?

Signature énergétique



MARB



Divers - photos



Chaudière



Départ chauffage



Bouilleur ECS

POMB2



Données générales

Description	Bâtiment de logements locatifs avec surface commerciale.
Date de mise en service	2004
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	HLM
Emplacement	Genève (Grand-Saconnex), Rue Sonnex 3-5.

Concept énergétique

Production de chaleur	Une chaudière à gaz de 200 kW + 44m ² de solaire thermique.
Distribution de chaleur	Chauffage au sol (radiateurs pour les arcades).
ECS	Production centralisée à proximité de la chaudière.
Ventilation	Double-flux avec échangeur de chaleur à plaques.

Caractéristiques du bâtiment

Surface de référence énergétique (SRE)	3'471 m ²
> logements	2'887 m ²
> surface commerciale	584 m ²
Volume chauffé net	8'250 m ³
Surface de l'enveloppe	3'471 m ²
Nombre d'appartements	25 app
Nombre de pièces	115 pièce
Coût total de l'ouvrage	9'000'454 CHF
État locatif (2006)	680'628 CHF/an

Indicateurs généraux

Surface enveloppe / SRE	1.00 m ² /m ²
SRE logements / pièce	25 m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	2593 CHF/m ²
État locatif / SRE	196 CHF/m ² an
Puissance thermique installée (gaz)	58 W/m ²

Données du justificatif thermique

Pertes enveloppe (3072 DJ 20/12)	190 MJ/m ² an
Pertes renouvellement d'air (1.4 m ³ /h/m ²)	123 MJ/m ² an

Gains internes et solaires	-113 MJ/m2an
Demande de chauffage 380/1	200 MJ/m2an

Estimation de l'IDC

Demande ECS (380/1)	75 MJ/m2an
Gain double-flux (45% pertes ventilation)	-56 MJ/m2an
Production solaire thermique (600 kWh/m2an)	-28 MJ/m2an
Estimation demande nette de chaleur	191 MJ/m2an
Rendement global	0.8 -
Estimation IDC	239 MJ/m2an

Consommation énergétique	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	Moyenne
Gaz	34'087	44'197	27'084	31'324	34'173 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	368	477	293	338	369 MJ/m2an
IDC corrigé climat	384	471	349	342	386 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	61%	97%	46%	43%	62%
Électricité chaufferie	10'022	9'629	8'902	8771	9'331 kWh/an
Électricité chaufferie	10.4	10.0	9.2	9.1	9.7 MJ/m2an
Électricité ventilateurs double-flux (estimation 5 kWh/m2an)					17'355 kWh/an
Électricité ventilateurs double-flux (estimation 5 kWh/m2an)					18.0 MJ/m2an

Coût d'investissement du système thermique	CHF TTC	CHF/m2
Production de chaleur	211'361	60.9
Distribution de chaleur	162'826	46.9
Distribution d'ECS (estimation à 12 CHF/m2)	41'652	12.0
Honoraires Ing Chauffage	46'100	13.3
TOTAL	461'938	133.1

Charges d'exploitation du système thermique (2006-2007)	CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système thermique (20 ans @ 6.5%)	41'924	12.1
Autres frais fixes	8'219	2.4
Assurance installation (1% install)	4'619	1.3
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)	3'600	1.0
Maintenance/dépannage (moyenne 2005-2008)	9'493	2.7
Compte d'exploitation	399	0.1
Compte de chauffage	9'094	2.6
Achat d'énergie	27'350	7.9
Gaz (9 ct/kWh)	25'392	7.3
Électricité chaufferie (22 ct/kWh)	1'958	0.6
Honoraires décompte chauffage	3'275	0.9
TOTAL	90'261	26.0
Charges indirectes (loyers)	50'542	14.6
Charges directes (compte chauffage)	39'719	11.4

Indicateurs système thermique

Coût système thermique / coût de l'ouvrage	5.1%
Charges indirectes / état locatif	7.4%
Charges directes / état locatif	5.8%
Achat d'énergie / charges d'exploitation	30.3%

Coût d'investissement du système aéraulique

	CHF TTC	CHF/m2
Locaux sanitaires et autres	155'617	44.8
Machineries ascenseurs	4'004	1.2
Abris PC	5'556	1.6
Parking	4'204	1.2
Honoraires Ing Ventilation	21'502	6.2
TOTAL	190'883	55.0

Charges d'exploitation du système aéraulique (2006-2007)

	CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système aéraulique (20 ans @ 6.5%)	17324	5.0
Autres frais fixes	3809	1.1
Assurance installation (1% install)	1909	0.5
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)	1900	0.5
Maintenance/dépannage (moyenne 2005-2008)	2'128	0.6
Compte d'exploitation	2'128	0.6
Compte de chauffage	0	0.0
Achat d'énergie	3'818	1.1
Électricité ventilateurs (estimation, 22 ct/kWh)	3'818	1.1
TOTAL	27'079	7.8
Charges indirectes (loyers)	27'079	7.8
Charges directes (compte chauffage)	0	0.0

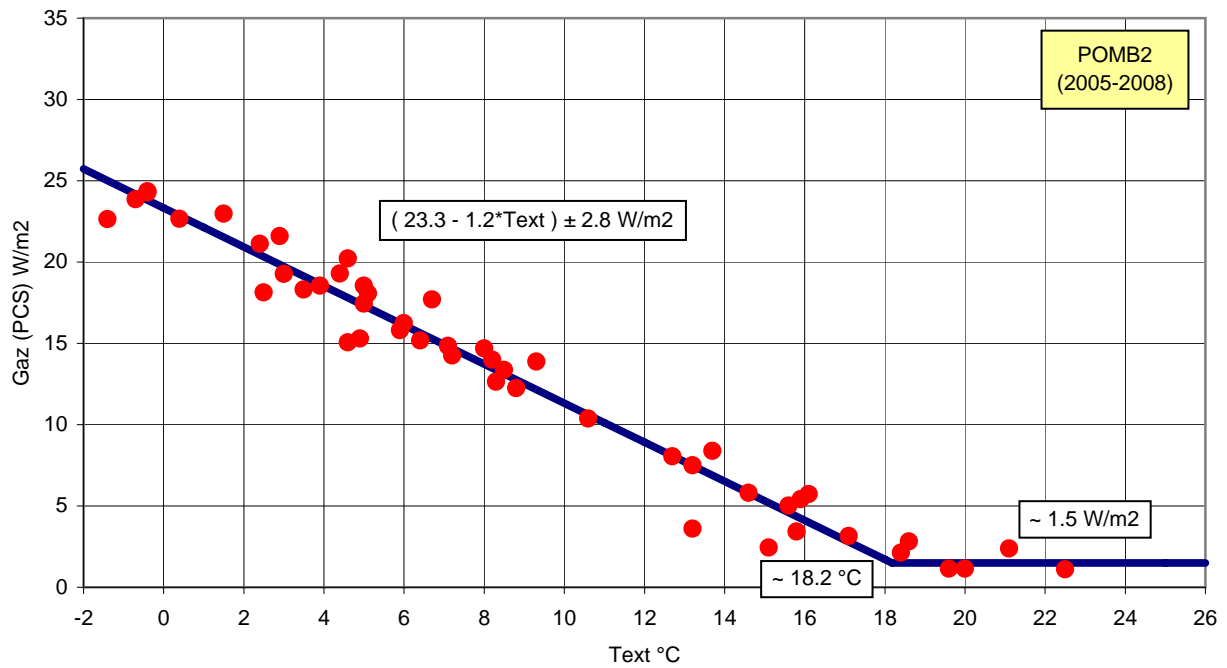
Indicateurs système aéraulique

Coût système aéraulique / coût de l'ouvrage	2.1%
---	------

Entretien des installations techniques

Chauffage	Contrat d'entretien incluant l'installation solaire thermique. Télésurveillance et établissement de la signature énergétique.
Ventilation	Contrat d'entretien du monobloc double-flux. Deux passages par an.

Signature énergétique



Divers - photos



Bouilleurs ECS (gauche) et solaire (droite)



Chaudière à gaz 200 kW



Collecteur-distributeur



Régulateurs

POMC12



Données générales

Description	Complexe de quatre bâtiments de logements locatifs (deux par deux).
Date de mise en service	2005
Standard de construction	SIA 380/1
Type de logement	HLM
Emplacement	Genève (Grand-Saconnex), Rue Gardiol 1-3, 5-7, 9-11 et 13-15.

Concept énergétique

Production de chaleur	Une chaudière à gaz de 220 kW pour deux bâtiments.
Distribution de chaleur	Chauffage au sol.
ECS	Production centralisée à proximité de la chaudière.
Ventilation	Extraction de l'air vicié en toiture.

Caractéristiques des bâtiments	Bât 1-7	Bât 9-15	Total
Surface de référence énergétique (SRE)	6'346	6'312	12'658 m2
Volume chauffé net	14'485	14'405	28'890 m3
Surface de l'enveloppe	5'766	5'811	11'577 m2
Nombre d'appartements	59	59	118 app
Nombre de pièces	251	250	501 pièce
Coût total de l'ouvrage	-	-	28'500'709 CHF
État locatif (2006)	-	-	2'338'584 CHF/an

Indicateurs généraux	Bât 1-7	Bât 9-15	Total
Surface enveloppe / SRE	0.91	0.92	0.91 m2/m2
SRE / pièce	25	25	25 m2/pce
Coût du complexe / SRE	-	-	2252 CHF/m2
État locatif / SRE	-	-	185 CHF/m2an
Puissance thermique installée (gaz)	35	35	35 W/m2

Données du justificatif thermique	Bât 1-7	Bât 9-15	Total
Pertes enveloppe (?? DJ 20/12)	184	185	MJ/m2an
Pertes renouvellement d'air (?? m3/h/m2)	68	68	MJ/m2an
Gains internes et solaires	-138	-138	MJ/m2an
Demande de chauffage 380/1	114	115	MJ/m2an

Estimation de l'IDC	Bât 1-7	Bât 9-15	
Demande ECS (justificatif thermique)	77	77	MJ/m2an
Estimation demande nette de chaleur	191	192	MJ/m2an
Rendement global	0.8	0.8	-
Estimation IDC	239	240	MJ/m2an

Consommation énergétique	2005/06	2006/07	2007/08	Moyenne
--------------------------	---------	---------	---------	---------

Bâtiment 1-7

Gaz	84'489	80'722	89'277	84'829 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	499	477	528	501 MJ/m2an
IDC corrigé climat	492	569	534	531 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	106%	138%	124%	123%
ECS	3'376	4'000	3'918	3'765 m3/an
ECS (1)	94	111	109	104 MJ/m2an
ECS (1) vs estimé	22%	44%	41%	36%
ECS (1)	2'367	2'805	2'747	2'640 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	14'407	15'900	15840	15'382 kWh/an
Électricité chaufferie	8.2	9.0	9.0	8.7 MJ/m2an
Électricité ventilateurs extraction (estimation 2 kWh/m2an)				12'658 kWh/an
Électricité ventilateurs extraction (estimation 2 kWh/m2an)				7.2 MJ/m2an

Bâtiment 9-15

Gaz	-	75'710	84'932	80'321 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	-	450	505	477 MJ/m2an
IDC corrigé climat	-	536	511	523 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	-	123%	113%	118%
ECS	3'988	4'532	4'455	4'325 m3/an
ECS (1)	111	126	124	121 MJ/m2an
ECS (1) vs estimé	44%	64%	61%	57%
ECS (1)	2'808	3'191	3'136	3'045 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	13'198	14'149	14'890	14'079 kWh/an
Électricité chaufferie	7.5	8.1	8.5	8.0 MJ/m2an
Électricité ventilateurs extraction (estimation 2 kWh/m2an)				12'658 kWh/an
Électricité ventilateurs extraction (estimation 2 kWh/m2an)				7.2 MJ/m2an

(1) Hypothèses : température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C, soit un équivalent énergétique de 176 MJ/m3.

Coût d'investissement du système thermique	CHF TTC	CHF/m2
--	---------	--------

Production de chaleur	166'577	13.2
Distribution de chaleur	619'830	49.0
Distribution d'ECS	121'088	9.6
Honoraires Ing Chauffage	60'410	4.8
TOTAL	967'905	76.5

Charges d'exploitation du système thermique (2006-2007)	CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système thermique (20 ans @ 6.5%)	87'844	6.9
Autres frais fixes	13'279	1.0
Assurance installation (1% install)	9'679	0.8
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)	3'600	0.3
Maintenance/dépannage (moyenne 2006-2008)	8'797	0.7
Compte d'exploitation	569	0.0
Compte de chauffage	8'228	0.7
Achat d'énergie	153'266	12.1
Gaz (9 ct/kWh)	146'655	11.6
Électricité chaufferie (22 ct/kWh)	6'611	0.5
Honoraires décompte chauffage	18'741	1.5
TOTAL	281'927	22.3
Charges indirectes (loyers)	101'692	8.0
Charges directes (compte chauffage)	180'235	14.2

Indicateurs système thermique

Coût système thermique / coût de l'ouvrage	3.4%
Charges indirectes / état locatif	4.3%
Charges directes / état locatif	7.7%
Achat d'énergie / charges d'exploitation	54.4%

Coût d'investissement du système aéraulique	CHF TTC	CHF/m2
Extraction locaux sanitaires	176'766	14.0
Extraction locaux poubelles	29'073	2.3
Extraction garages	43'676	3.5
Extraction abris	34'190	2.7
Tableaux électriques	18'295	1.4
Honoraires Ing Ventilation	43'128	3.4
TOTAL	345'128	27.3

Charges d'exploitation du système aéraulique (2006-2007)	CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système aéraulique (20 ans @ 6.5%)	31323	2.5
Autres frais fixes	3451	0.3
Assurance installation (1% install)	3451	0.3
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)	0	0.0
Maintenance/dépannage (moyenne 2006-2008)	5'380	0.4
Compte d'exploitation	5'380	0.4
Compte de chauffage	0	0.0
Achat d'énergie	5'570	0.4
Électricité ventilateurs (estimation, 22 ct/kWh)	5'570	0.4
TOTAL	45'724	3.6
Charges indirectes (loyers)	45'724	3.6

Charges directes (compte chauffage)

0

0.0

Indicateurs système aéraulique

Coût système aéraulique / coût de l'ouvrage

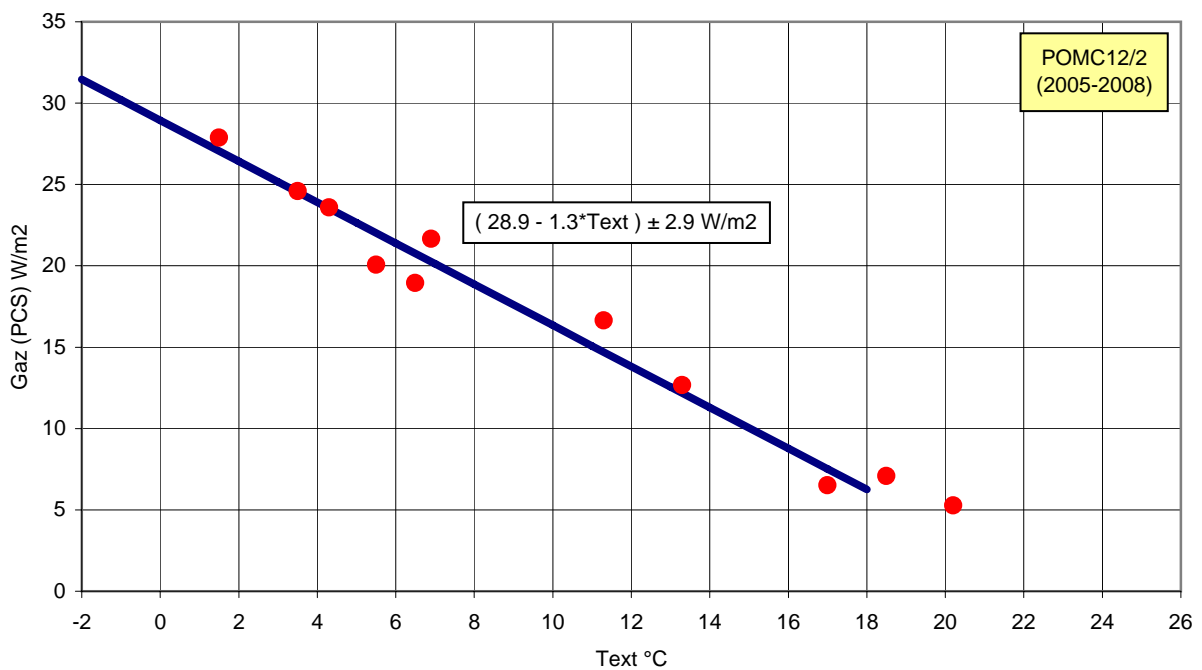
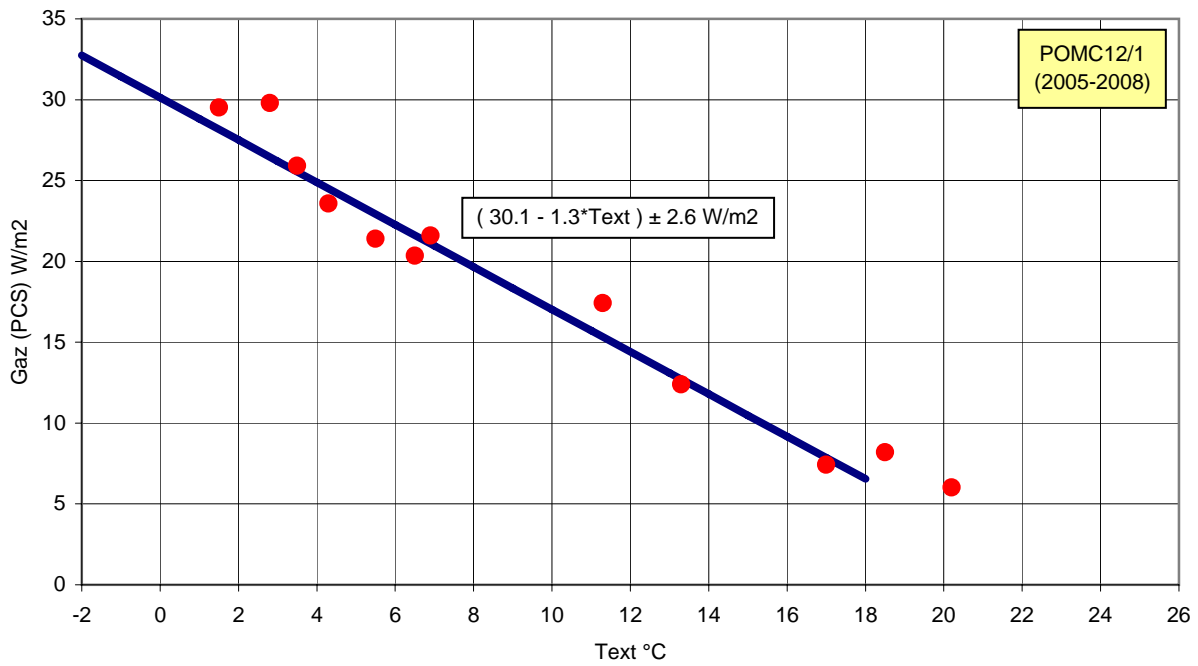
1.2%

Entretien des installations techniques

Chauffage Contrat d'entretien standard.

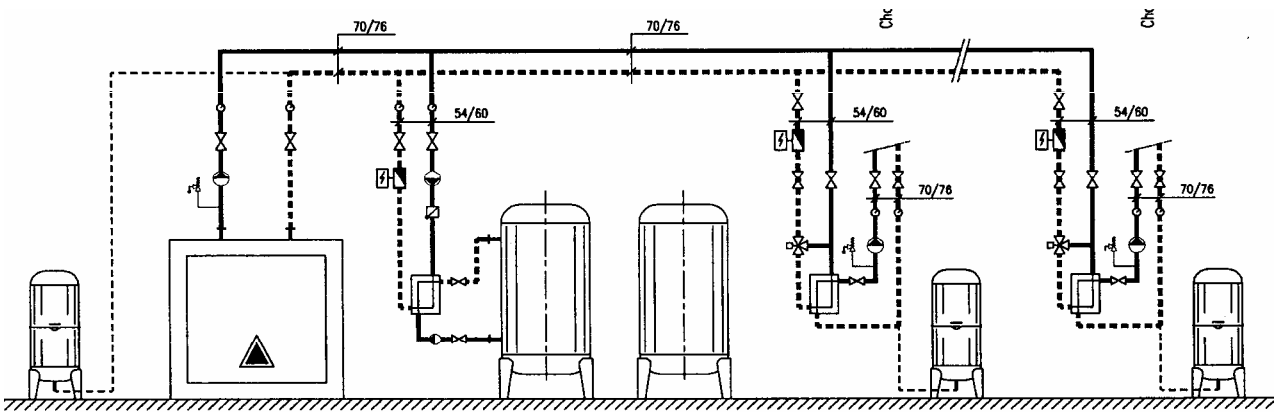
Ventilation Néant

Signature énergétique



POMC12

Schéma de principe de l'installation de chauffage



Divers - photos



Extraction d'air en toiture



Extraction d'air en toiture



Chaudière à gaz 220 kW



Bouilleur ECS



Départ chaleur

POMB1



Données générales

Description	Complexe de trois bâtiments de logements locatifs avec surf. commerciale.
Date de mise en service	2004
Standard de construction	Minergie
Type de logement	LGZD Loyers libres
Emplacement	Genève (Grand-Saconnex), Rue Sonnex 19-23, Rue Gardiol 8-14, Rue Alberto-Giacometti 8-10.

Concept énergétique

Production de chaleur	Deux chaudières à gaz de 250 kW alimentent à travers un réseau de chaleur 5 sous-stations réparties dans les trois bâtiments. Chacune sous-station est équipée d'une installation solaire thermique (194 m ² au total) et est connectée au réseau hydraulique de la pompe à chaleur sur air vicié.
Distribution de chaleur	Radiateurs.
ECS	Production centralisée dans chaque sous-station (5).
Ventilation	Double-flux avec double échangeur de chaleur à plaques et pompe à chaleur sur air vicié.

Caractéristiques du bâtiment	Sonnex	Giacometti	Gardiol	Total
Surface de référence énergétique (SRE)	8'107	4'605	8'203	20'915 m ²
> logements	-	-	-	17'520 m ²
> surface commerciale	-	-	-	3'395 m ²
Volume chauffé net	18'972	10'681	19'026	48'679 m ³
Surface de l'enveloppe	6'467	3'857	6'396	16'720 m ²
Nombre d'appartements	35	24	58	117 app
Nombre de pièces	200	152	263	615 pièce
Coût total de l'ouvrage	-	-	-	52'155'610 CHF
État locatif (2006)	-	-	-	4'401'480 CHF/an

Indicateurs généraux	Sonnex	Giacometti	Gardiol	Total
Surface enveloppe / SRE	0.80	0.84	0.78	0.80 m ² /m ²
SRE logements / pièce	-	-	-	28 m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	-	-	-	2494 CHF/m ²
État locatif / SRE	-	-	-	210 CHF/m ² an

Puissance thermique installée (gaz) - - - 24 W/m2

Données du justificatif thermique	Sonnex	Giacometti	Gardiol	Total
Pertes enveloppe (3072 DJ 20/12)	136	130	135	134 MJ/m2an
Pertes renouvellement d'air (1.2 m3/h/m2)	100	100	100	100 MJ/m2an
Gains internes et solaires	-110	-121	-127	-119 MJ/m2an
Demande de chauffage 380/1	126	109	108	115 MJ/m2an

Calcul IDC selon Justificatif Minergie	Sonnex	Giacometti	Gardiol	Total
Demande ECS	82	87	87	85 MJ/m2an
Gain double-flux	-68	-55	-49	-58 MJ/m2an
Production solaire thermique	-19	-25	-25	-23 MJ/m2an
Production PAC sur air vicié DF	-34	-35	-36	-35
Demande nette de chaleur	86	81	85	84 MJ/m2an
Rendement global	0.85	0.85	0.85	0.85 -
Estimation IDC (gaz)	101	95	100	99 MJ/m2an

Consommation énergétique	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	Moyenne
Gaz	129'720	118'161	87'532	108'395	110'952 m3/an
IDC (PCS=37.5 MJ/m3)	233	212	157	194	199 MJ/m2an
IDC corrigé climat	243	209	187	197	209 MJ/m2an
IDC corrigé climat vs estimé	144%	110%	89%	98%	110%
ECS	-	8'932	9'106	8'941	8'993 m3/an
ECS (1)	-	75	77	75	76 MJ/m2an
ECS (1) vs estimé	-	-12%	-10%	-11%	-11%
ECS (1)	-	2'556	2'606	2'559	2'574 MJ/pce.an
Électricité chaufferie	-	27'843	28'303	28'978	28'374 kWh/an
Électricité chaufferie	-	4.8	4.9	5.0	4.9 MJ/m2an
Électricité DF + PAC + solaire	-	203'488	198'221	226'211	209'307 kWh/an
Électricité DF + PAC + solaire	-	35.0	34.1	38.9	36.0 MJ/m2an

(1) L'équivalent énergétique mesuré pour le bâtiment Giacometti est de 140 MJ/m3. Il est dû à la basse température de distribution de l'ECS, qui est de l'ordre de 43 °C. Cependant, par souci de cohérence et pour faciliter les comparaisons, le calcul a été effectué avec la valeur commune de 176 MJ/m3 utilisée pour tous les autres bâtiments (température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C).

Coût d'investissement du système thermique	CHF TTC	CHF/m2
Production de chaleur	766'633	36.7
Distribution de chaleur	877'291	41.9
Distribution d'ECS	221'354	10.6
Honoraires Ing Chauffage	192'409	9.2
TOTAL	2'057'686	98.4

Charges d'exploitation du système thermique (2006-2007)		CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système thermique (20 ans @ 6.5%)		186'748	8.9
Autres frais fixes		53'377	2.6
Assurance installation (1% install)		20'577	1.0
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)		32'800	1.6
Maintenance/dépannage (moyenne 2005-2008)		20'300	1.0
Compte d'exploitation		797	0.0
Compte de chauffage		19'503	0.9
Achat d'énergie		89'221	4.3
Gaz (9 ct/kWh)		82'061	3.9
Électricité chaufferie (22 ct/kWh)		6'227	0.3
Électricité solaire thermique (22 ct/kWh)		933	0.0
Honoraires décompte chauffage		11'128	0.5
TOTAL		360'774	17.2
Charges indirectes (loyers)		240'922	11.5
Charges directes (compte chauffage)		119'852	5.7

Indicateurs système thermique

Coût système thermique / coût de l'ouvrage	3.9%
Charges indirectes / état locatif	5.5%
Charges directes / état locatif	2.7%
Achat d'énergie / charges d'exploitation	24.7%

Coût d'investissement du système aéraulique	CHF TTC	CHF/m2
Monoblocs double-flux	406'467	19.4
Gaines, montage, etc	784'993	37.5
Honoraires Ing Ventilation	145'150	6.9
TOTAL	1'336'610	63.9

Charges d'exploitation du système aéraulique (2006-2007)		CHF TTC	CHF/m2an
Amortissement système aéraulique (20 ans @ 6.5%)		121306	5.8
Autres frais fixes		45366	2.2
Assurance installation (1% install)		13366	0.6
Valeur locative locaux (100 CHF/m2an)		32000	1.5
Maintenance/dépannage (moyenne 2005-2008)		9'206	0.4
Compte d'exploitation		9'206	0.4
Compte de chauffage		0	0.0
Achat d'énergie		42'676	2.0
Électricité double-flux et pompe à chaleur (22 ct/kWh)		42'676	2.0
TOTAL		218'553	10.4
Charges indirectes (loyers)		218'553	10.4
Charges directes (compte chauffage)		0	0.0

Indicateurs système aéraulique

Coût système aéraulique / coût de l'ouvrage

2.6%

Entretien des installations techniques

Chauffage Contrat de suivi et d'optimisation des installations. Passages hebdomadaires.

Ventilation Contrat de maintenance. Deux passages annuels.

Signature énergétique

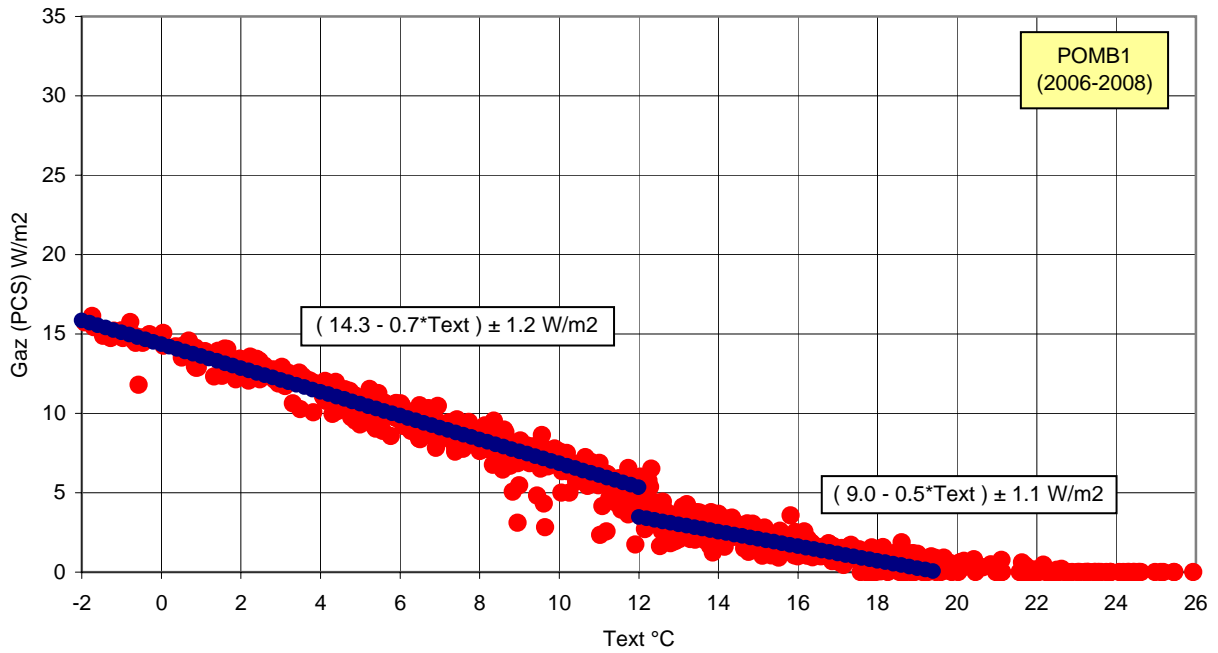
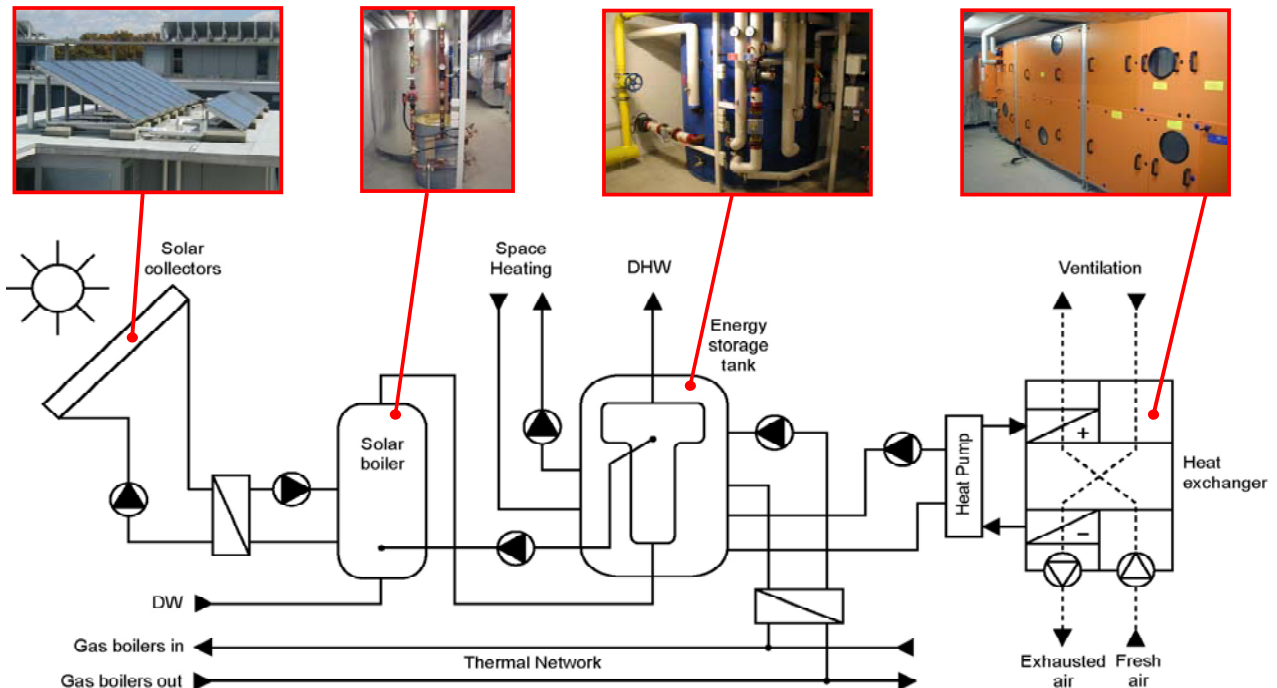


Schéma de principe de l'installation de chauffage



POMB1

Divers - photos



Chaudières 250kW



Mitigeur ECS

ZABOU



Données générales

Description	Complexe de deux bâtiments de logements locatifs "Les Zabouches"
Date de mise en service	2004
Standard de construction	Minergie
Type de logement	Coopérative (CODHA)
Emplacement	Genève (Châtelaine), Chemin des Ouches 14-16.

Concept énergétique

Production de chaleur	Une chaudière à bois (granulés) de 110 kW + 72 m ² de solaire thermique.
Distribution de chaleur	Chauffage au sol.
ECS	Production centralisée dans chaque bâtiment (2).
Ventilation	Double-flux avec échangeur de chaleur à plaques.

Caractéristiques du bâtiment

	Jura	Salève	Total
Surface de référence énergétique (SRE)	2'022	2'022	4'044 m ²
Volume chauffé net			m ³
Surface de l'enveloppe			m ²
Nombre d'appartements	12	15	27 app
Logement communautaire (1)	2	0	2 logcom
Nombre de pièces			pièce
Coût total de l'ouvrage			CHF
État locatif (2006)			CHF/an

(1) Chaque logement communautaire comprend 10 chambres, une cuisine, une salle à manger et un salon.

Indicateurs généraux

	Total
Surface enveloppe / SRE	m ² /m ²
SRE logements / pièce	m ² /pce
Coût de l'ouvrage / SRE	CHF/m ²
État locatif / SRE	CHF/m ² an
Puissance thermique installée (gaz)	27 W/m ²

Données du justificatif thermique	Jura	Salève	Total
Pertes enveloppe (3072 DJ 20/12)			MJ/m2an
Pertes renouvellement d'air (1.4 m3/h/m2)			MJ/m2an
Gains internes et solaires			MJ/m2an
Demande de chauffage 380/1	113	111	112 MJ/m2an

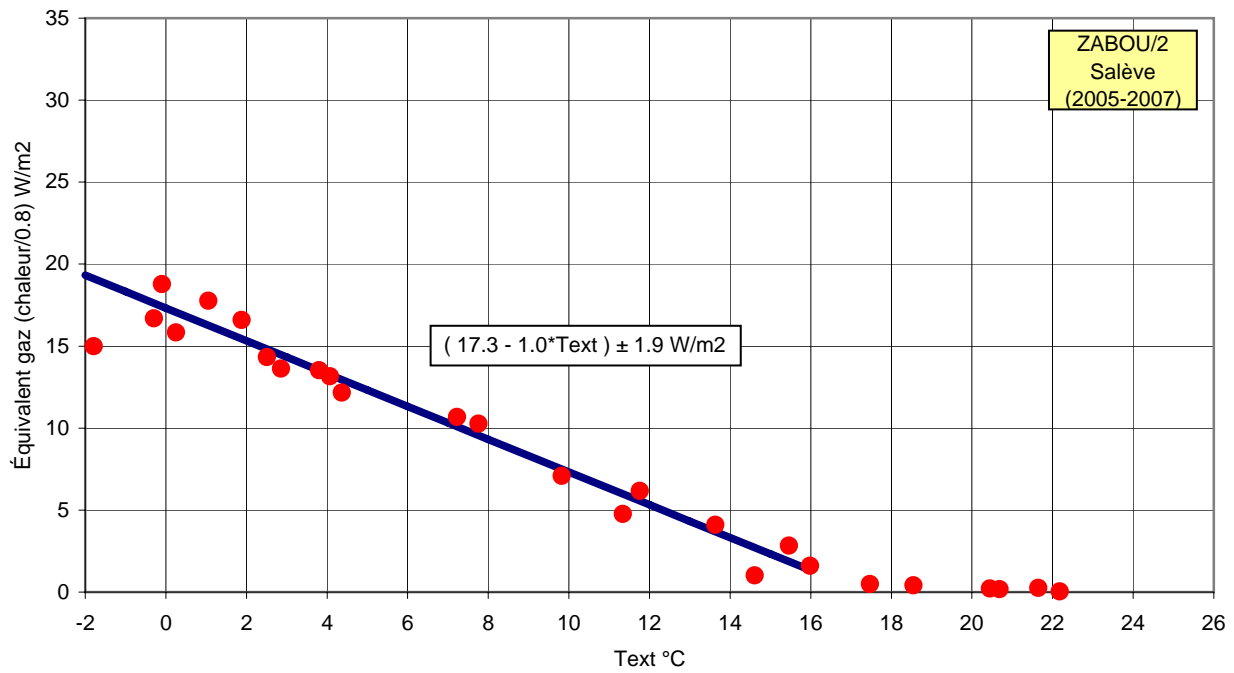
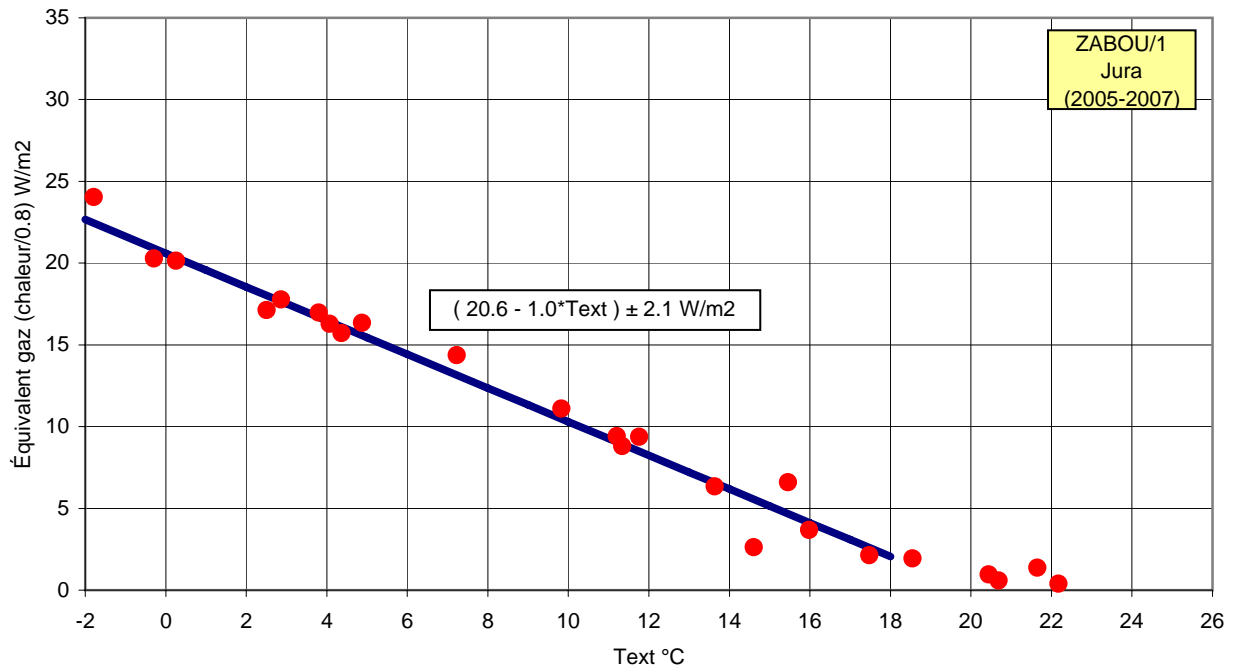
Estimation de l'IDC	Jura	Salève	Total
Demande ECS (380/1)	75	75	75 MJ/m2an
Gain double-flux (45% pertes ventilation)	-44	-42	-43 MJ/m2an
Production solaire thermique (600 kWh/m2an)	-38	-38	-38 MJ/m2an
Estimation demande nette de chaleur	106	106	106 MJ/m2an
Rendement global (équivalent gaz)	0.8	0.8	0.8 -
Estimation IDC	132	132	132 MJ/m2an

Consommation énergétique 2005/06	Jura	Salève	Total
! Deuxième année d'exploitation !			
Chaleur fournie aux logements	159	141	150 MJ/m2an
Production ECS par la centrale à bois	89	45	67 MJ/m2an
Total chaleur	248	185	217 MJ/m2an
IDC équivalent gaz (rendement 80%)	310	232	271 MJ/m2an
IDC équivalent gaz corrigé climat	305	228	267 MJ/m2an
IDC équivalent gaz corrigé climat vs estimé	132%	73%	102%
ECS	1'268	769	2'037 m3/an
ECS (2)	110	67	89 MJ/m2an
ECS (2) vs estimé	47%	-11%	18%
ECS (2)			MJ/pce.an
Électricité chaufferie	-	-	6'237 kWh/an
Électricité chaufferie	-	-	5.6 MJ/m2an
Électricité ventilateurs double-flux (1)	6'373	6'373	12'746 kWh/an
Électricité ventilateurs double-flux (1)	11.3	11.3	11.3 MJ/m2an

(1) Calculé sur la base d'une mesure de consommation et des horaires de fonctionnements.

(2) Hypothèses : température moyenne annuelle de l'eau froide de 13°C et température de distribution moyenne de 55°C, soit un équivalent énergétique de 176 MJ/m3.

Signature énergétique



Divers - photos