

**Rapport final** - Novembre 2011

---

## **Projet Reno-HP**

Installation technique décentralisée pour la rénovation à  
haute performance de bâtiments

---

**Mandant :**

Office fédéral de l'énergie OFEN  
Programme de recherche « Energie dans les bâtiments »  
CH-3003 Berne  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Mandataire :**

Communauté de Recherche HEIG-VD & AIT-CETT  
Route de Cheseaux 1  
CH-1401 Yverdon-les-Bains  
[www.heig-vd.ch](http://www.heig-vd.ch)

**Auteurs :**

Stéphane Citherlet, HEIG-VD, [stephane.citherlet@heig-vd.ch](mailto:stephane.citherlet@heig-vd.ch)  
Jacques Bony, HEIG-VD, [jacques.bony@heig-vd.ch](mailto:jacques.bony@heig-vd.ch)  
Olivier George, HEIG-VD, [olivier.george@heig-vd.ch](mailto:olivier.george@heig-vd.ch)

**Cofinancement :**

SwissRenova A.G., Dorfmatweg 8a, CH-3110 Bern-Münsingen  
Romande Energie S.A., rue de Lausanne 53, CH-1110 Morges  
Siemens Suisse S.A., avenue des Baumettes 5, CH-1020 Renens

**Responsable de domaine de l'OFEN :** M. Andreas Eckmanns, OFEN, CH-3003 Bern

**Chef de programme de l'OFEN :** Dr. Charles Filleux, Basler und Hofmann AG,  
CH-8032 Zürich

**Numéro du contrat et du projet de l'OFEN :** 8100146-02 - SI/500584

Les auteurs de ce rapport portent seuls la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>RÉSUMÉ</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>ABSTRACT</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>BUT DU PROJET</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>DESCRIPTIF DU BÂTIMENT</b>	<b>11</b>
5.2	Présentation de la nouvelle façade du bâtiment	15
5.3	Fenêtres	17
5.4	Toiture	18
5.5	Synthèse des valeurs U	19
5.6	Production, distribution et émission de chaleur	20
5.7	Système Varios (chauffage, ECS et ventilation)	22
5.8	Appartements-témoins	24
<b>6</b>	<b>ACQUISITION DES MESURES</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>MESURES DE LA VALEUR U DES MURS</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>ACOUSTIQUE</b>	<b>31</b>
8.1	Expression du niveau sonore normalisé	31
8.2	Méthodologie de mesures	32
8.3	Mesures du niveau sonore	32
8.4	Mesures du temps de réverbération	32
8.5	Résultats	33
<b>9</b>	<b>CONFORT THERMIQUE DES OCCUPANTS</b>	<b>35</b>
9.1	Méthodologie	35
9.2	Mesures du confort thermique en hiver	37
9.3	Mesures du confort thermique en été	41
9.4	Synthèse du confort thermique	44

<b>10</b>	<b>PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES DU BÂTIMENT</b>	<b>45</b>
10.1	Energie de chauffage des appartements	45
10.2	Energie ECS	49
10.3	Pertes thermiques de l'installation de distribution	51
10.4	Demande globale d'énergie du bâtiment	52
10.5	Comparaison avec la consommation de gaz	55
10.6	Comparaison de la consommation avant et après rénovation	57
<b>11</b>	<b>PERFORMANCES DE LA VENTILATION</b>	<b>59</b>
11.1	Echange de chaleur entre la gaine montante et descendante	59
11.2	Echangeur de chaleur interne au monobloc de ventilation	61
11.3	Qualité de l'air dans les appartements	63
11.4	Consommation électrique des monoblocs de ventilation	67
<b>12</b>	<b>SONDAGE D'OPINIONS</b>	<b>68</b>
12.1	Confort thermique	68
12.2	Confort acoustique	71
12.3	Confort pour l'ECS	72
12.4	Utilisation de la ventilation	73
12.5	Ouverture des fenêtres	74
12.6	Impression générale	75
12.7	Synthèse du sondage d'opinion	76
<b>13</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>77</b>
<b>14</b>	<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>81</b>
<b>15</b>	<b>COLLABORATION NATIONALE</b>	<b>81</b>
<b>16</b>	<b>COLLABORATION INTERNATIONALE</b>	<b>82</b>
<b>17</b>	<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>83</b>
	<b>Annexes</b>	<b>84</b>

# 1 Résumé

Ce projet a pour objectif d'analyser les performances d'un bâtiment d'habitation collectif après sa rénovation afin d'obtenir le label Minergie-P rénovation.

La rénovation de ce bâtiment est basée principalement sur les particularités suivantes :

- La rénovation de l'enveloppe avec la pose d'éléments préfabriqués à très faible valeur  $U$  ( $< 0.1$  [W/m<sup>2</sup>/K]).
- Un circuit unique d'eau chaude sur lequel est piqué chaque appartement pour son chauffage et la production de l'eau chaude sanitaire (ECS) à la volée via un échangeur à plaques.
- Un système compact (Varios) dans chaque appartement, qui intègre une ventilation décentralisée avec récupération de chaleur et un système de distribution de chaleur pour le chauffage ou l'ECS.

Avec un seul circuit pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, il est impossible de mesurer la consommation de chauffage avec un unique compteur de chaleur qui serait installé sur la conduite principale de ce circuit d'eau chaude dans le local technique. Pour distinguer la consommation de chaleur pour le chauffage de celle pour l'ECS, il est nécessaire d'avoir deux compteurs de chaleur par appartements. Pour des raisons de coûts et de temps à disposition, il a été décidé d'installer un second compteur de chaleur sur quatre appartements-témoins. Ces derniers ont également été équipés d'une instrumentation complète afin d'avoir une vision détaillée du confort des occupants.

Durant ce projet, les paramètres suivants ont ainsi été analysés soit en continu soit par des mesures ponctuelles :

- La consommation d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire,
- Le rendement du récupérateur de chaleur dans le système décentralisé de ventilation,
- Le confort thermique durant plusieurs périodes de l'année dans des lieux représentatifs et la conformité des résultats vis-à-vis de la norme SIA 180 (ISO 7730),
- Les niveaux acoustiques générés par la ventilation décentralisée dans toutes les pièces des appartements-témoins et la conformité des résultats à la norme SIA 181,
- La qualité de l'air en mesurant en continu le CO<sub>2</sub>, les COV et l'humidité relative.

En outre, un sondage a été envoyé à tous les occupants, afin de connaître leur opinion sur leur confort et l'usage des appartements.

L'ensemble des résultats mesurés sur ce bâtiment sont considérés comme bons à excellents.

Concernant l'acoustique, le confort thermique et la qualité de l'air, les résultats montrent que les valeurs mesurées sont pratiquement tout le temps en conformité avec les normes SIA en vigueur. Seul le niveau acoustique mesuré dans la salle de bain avec une ventilation à des hautes vitesses dépasse les valeurs requises. Toutefois, le sondage montre que les occupants n'utilisent pratiquement jamais ces vitesses et que malgré tout la qualité de l'air est correcte.

Le retard pris par le chantier à la fin de l'année 2010, a retardé la mise en place du système d'acquisition. Il n'a pas été possible de mesurer la consommation de chaleur durant l'ensemble de la saison de chauffage 2010-2011. Ainsi, certains résultats, ont été extrapolés. Toutefois, la chaîne d'acquisition restera en place pour la saison de chauffage 2011-2012 afin de vérifier si les résultats partiels obtenus durant l'hiver 2010-2011 se confirment.

Sur la base des mesures obtenues et des calculs effectués, nous constatons que la consommation pour l'énergie finale de chauffage est passée de 414 [MJ/m<sup>2</sup>/an] avant rénovation à 53 [MJ/m<sup>2</sup>/an] après rénovation, soit une réduction d'un facteur 8, ce qui est excellent.

Ainsi, les résultats obtenus durant cette campagne de mesures, démontrent que les solutions utilisées pour ce bâtiment permettent d'envisager des rénovations très performantes. Si l'aspect de la façade a été modifié avec l'utilisation des modules GAP-Solutions, ces derniers permettent d'obtenir des façades avec un très haut pouvoir isolant.

Le couplage avec le système compact Varios permet ainsi d'offrir un très fort potentiel d'économie d'énergie de chauffage, tout en offrant une qualité de confort intérieur de qualité.

## 2 Abstract

The main objective of this project is to analyse the performance of a residential multi-family building following a renovation to achieve the Minergie-P standard.

The renovation of the building is mainly based on the following features:

- Renovation of the envelope by installing prefabricated elements of low U value ( $U < 0.1$  [W/m<sup>2</sup>/K]).
- Single hot water circuit from where each apartment will withdraw energy for space heating and domestic hot water (DHW) instantaneously through a plate heat exchanger.
- Each apartment includes a compact system (Varios) integrating a decentralised ventilation with heat recovery and heat distribution system for space heating and DHW.

With a single circuit for space heating and domestic hot water, it becomes impossible to measure the energy consumption with a single energy meter which would be installed on the main line of the hot water circuit in the technical room. In order to distinguish between energy consumption for space heating and for DHW, it is necessary to have two energy meters for each apartment. Due to financial and time availability reasons, it was decided to install the second energy meter in four apartments only. The latter have also been fully equipped to get a detailed view of the comfort of the occupants.

During this project, the following parameters were analysed either continuously or by one-off measures:

- Energy consumption for space heating and domestic hot water,
- The efficiency of the heat recovery of the decentralised ventilation system,
- Thermal comfort during several periods of the year at different locations and compliance of the results with the standard SIA 180 (ISO 7730),
- The sound level in every room generated by the decentralised ventilation for the instrumented apartments and compliance of findings with the standard SIA 181,
- The air quality by continuously measuring the CO<sub>2</sub>, volatile organic compounds (VOC) and relative humidity.

In addition, a survey was carried out amongst the occupants to find out their opinions on the comfort and use of the apartments. The overall measured results on the building are considered to be good to excellent.

For acoustics, thermal comfort and air quality, results have shown that the measured values are nearly all the time in accordance with the relevant SIA standards. Only the sound level measured in the bathroom with the ventilation at high level speeds seems to go beyond the indicated values. However, the survey shows that the occupants very rarely use these levels of speed and still the air quality remains acceptable.

The delay occurred in the construction at the end of 2010, delayed the setup of the acquisition system. As a consequence, it was not possible to measure the energy consumption during the entire heating season of 2010-2011. Thus, some results have been extrapolated. However, the acquisition system will remain in place for the 2011-2012 heating season to determine whether or not the partial results obtained during the winter of 2010-2011 were correct.

Based on the calculations and measured data, it was found that the final energy consumption for heating has decreased from 414 [MJ/m<sup>2</sup>/an] before renovation to 53 [MJ/m<sup>2</sup>/an] after renovation, a reduction by a factor of 8, which is excellent.

Overall, the results obtained during this measurement campaign showed that the solutions used for this building can lead to very efficient renovations. If the appearance of the facade was modified with the use of GAP-Solutions modules, these have contributed to obtaining facades with a high standard of insulation.

Coupling with the Varios compact system enables a very high potential for energy savings for space heating, while providing a good quality indoor comfort.



### 3 Liste des abréviations

$\eta$	Rendement	[-]
$A_E$	Surface de référence énergétique (anciennement SRE)	[m <sup>2</sup> ]
COV	Composés Organiques Volatiles	[ppm]
DH	Degrés-heures	[DH]
E	Energie électrique	[kWh]
ECS	Eau chaude sanitaire	[m <sup>3</sup> ]
$E_{p,h}$	Indice de dépense énergétique du bâtiment pour le chauffage	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$E_{p,ww}$	Indice de dépense énergétique du bâtiment pour l'ECS	[kWh/m <sup>2</sup> ]
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur du gaz	[kWh/Nm <sup>3</sup> ]
PMV	Vote moyen prédictif (Predictive Mean Vote)	[-]
PPD	Pourcentage de personnes insatisfaites	[%]
Q	Energie thermique	[kWh]
T	Température	[°C]
U	Coefficient de pertes thermiques	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée	

## 4 But du projet

Ce projet a pour objectif d'analyser les performances énergétiques d'un bâtiment d'habitation multifamiliale, dont la rénovation vise une réduction de consommation de chauffage d'un facteur d'environ dix.

Ce bâtiment de 59 appartements, datant de la fin des années 60, est situé à Morges. Afin d'analyser les performances de ce bâtiment, le Laboratoire d'Energétique Solaire et de Physique du Bâtiment (LESBAT) de la Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HES-SO Yverdon), a été mandaté par l'OFEN pour installer un système d'acquisition complexe et analyser les résultats.

La rénovation du bâtiment se distingue par deux systèmes innovants mis en œuvre durant la rénovation :

1. Une façade, constituée d'éléments préfabriqués ayant, sur catalogue, une valeur  $U < 0.1 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$
2. Un système compact installé dans la salle de bain et qui centralise pour chaque appartement, entre autres les éléments suivants :
  - Une distribution centralisée de l'eau chaude soit dirigée dans le circuit de chauffage, soit utilisée pour produire l'eau chaude sanitaire (ECS) via un échangeur de chaleur, en fonction de la demande
  - Une ventilation avec un récupérateur de chaleur à plaques

Pour bien comprendre la complexité des analyses effectuées, il faut préciser qu'à l'entrée de chaque appartement il n'y a qu'un aller et un retour pour l'eau chaude utilisée pour la production de chaleur pour le chauffage et pour l'ECS. Cette eau circule prioritairement dans le réseau de distribution de chauffage. Lorsqu'il y a une demande en ECS, une vanne redirige l'eau chaude automatiquement vers un échangeur qui chauffe l'eau froide du réseau.

Ainsi, pour effectuer l'analyse de la consommation d'énergie de chauffage et de la différencier de la consommation de chaleur pour l'ECS, les mesures ont nécessité la pose de deux compteurs de chaleur dans les appartements étudiés.

Afin de pouvoir évaluer les performances des installations analysées et de vérifier l'homogénéité des mesures, quatre appartements type ont été instrumentés. Ceci a permis d'effectuer les analyses suivantes :

- Les niveaux acoustiques dans les différentes pièces lors du fonctionnement de la ventilation à différentes vitesses. Ces analyses ont été effectuées très tôt le matin et sans occupant, afin de ne pas perturber les mesures.
- L'efficacité énergétique du système de récupération de chaleur de la ventilation.
- La qualité de l'air dans les différentes pièces.
- Le confort thermique durant la saison estivale et hivernale.
- La consommation d'énergie durant la saison de chauffage 2010-2011.

Ces mesures ont été effectuées entre novembre 2010 et mai 2011. Initialement, la rénovation aurait dû être terminée avant la période de chauffage 2010-2011. Il aurait été ainsi possible d'analyser la consommation de chauffage de tout le bâtiment. Mais des retards sur le chantier, n'ont pas permis d'effectuer ce travail. Toutefois, l'analyse a pu être effectuée sur les quatre appartements-témoins retenus pour l'analyse détaillée présentée ci-dessus.

## 5 Descriptif du bâtiment

Le bâtiment analysé est une habitation multifamiliale, construit au milieu des années 60, et situé à la rue des Fossés 6 et 8 au centre de la ville de Morges, comme le montre figure 1.



figure 1 Localisation du bâtiment étudié

La Figure 2 montre une vue aérienne du bâtiment analysé.

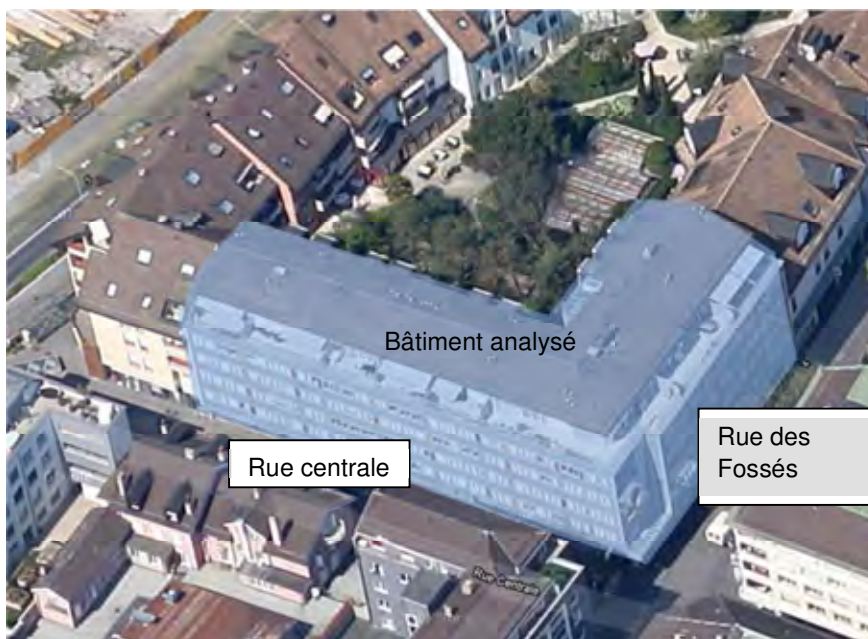


Figure 2 Vue aérienne du bâtiment étudié

Seule la partie habitation de ce bâtiment a été rénovée. Le centre commercial (Les Charpentiers) situé au rez-de-chaussée du bâtiment, n'a pas été touché. Avant la rénovation, le bâtiment comptait 61 appartements et 59 à la fin des travaux.

### 5.1.1 Bâtiment avant rénovation

Dans le bâtiment avant rénovation, la façade des appartements était constituée d'un balcon avec une baie vitrée devant laquelle était installé un radiateur en applique, comme le montre la Figure 3.



Figure 3 : Vue de l'ancienne façade avec balcons (gauche), le balcon et la baie vitrée (droite)

Avant rénovation, le bâtiment possédait 61 appartements sur 5 étages, correspondant à une surface de référence énergétique ( $A_E$ ) de 4'280 m<sup>2</sup>. L'ensemble des appartements est situé au-dessus d'une surface commerciale qui n'a pas subi de rénovation.

La Figure 4 indique la consommation d'énergie pour la production de chaleur pour le chauffage et l'ECS de ce bâtiment avant sa rénovation. Il n'est pas possible de distinguer entre le chauffage et l'ECS car cette énergie était produite par une chaudière à gaz.

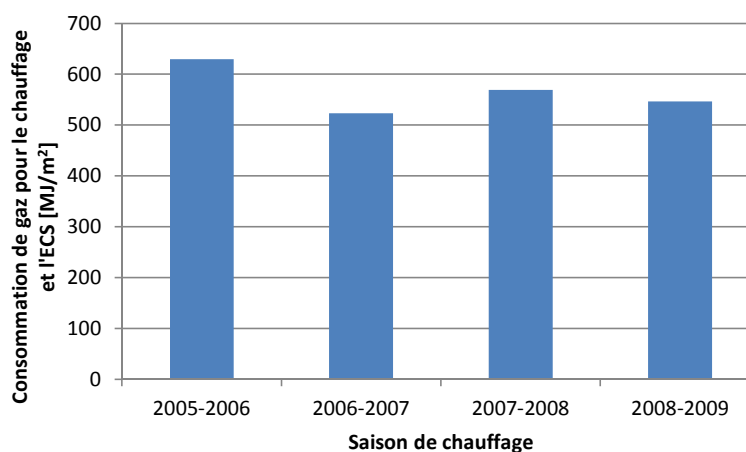


Figure 4 : Consommation d'énergie finale pour le chauffage et l'ECS du bâtiment avant rénovation

La valeur moyenne de cette consommation d'énergie finale est d'environ 550 [MJ/(m<sup>2</sup>·an)]. La norme SIA 380/1 propose comme valeur de consommation d'énergie utile pour l'ECS dans un habitat collectif : 75 [MJ/(m<sup>2</sup>·an)]. En prenant un rendement de chaudière à gaz de 80% (vieille chaudière), nous arrivons à une consommation d'énergie finale pour l'ECS de 94 [MJ/(m<sup>2</sup>·an)]. Ainsi la consommation d'énergie finale pour le chauffage est estimée à 456 [MJ/(m<sup>2</sup>·an)], soit 365 [MJ/(m<sup>2</sup>·an)] en énergie utile.

### 5.1.2 Rénovation de l'enveloppe

La rénovation de l'enveloppe du bâtiment a consisté en la pose d'éléments préfabriqués sur les façades existantes et sur la partie extérieure des balcons comme le montre la Figure 5. Les éléments préfabriqués seront présentés plus en détail dans le chapitre 5.2.



Figure 5 : Eléments préfabriqués mis en applique sur la façade existante

Ces éléments préfabriqués, posés en façade, suppriment les balcons au profit d'une augmentation de la surface chauffée habitable des appartements de 14% en moyenne. Avec ce déplacement vers l'extérieur de l'enveloppe thermique du bâtiment, la surface de référence énergétique ( $A_E$ ) est passée de 4'280 m<sup>2</sup> à 4'836 m<sup>2</sup> une fois le bâtiment rénové. La Figure 6 montre la rénovation de la façade vue de l'intérieur.



Figure 6 : Rénovation de la façade vue de l'intérieur du bâtiment

La photo de gauche de la Figure 6 montre un radiateur qui était situé devant la baie vitrée avant rénovation. Sur la même photo, nous apercevons également le parapet du balcon qui sert de support à l'élément préfabriqué de la nouvelle façade. La photo de droite montre cette même partie lors de la fin de la rénovation de la façade, sur laquelle nous constatons que le radiateur a été supprimé.



L'ancienne façade et la nouvelle façade rénovée sont visibles à la Figure 7.



Figure 7 : Vue de la façade avant et après rénovation

La Figure 8 présente l'intérieur d'un appartement avant et après rénovation. Il est à signaler que la cloison de la cuisine a été supprimée afin d'ouvrir l'espace.



Figure 8 : Vue de la cuisine et de la salle de bain, avant et après rénovation

## 5.2 Présentation de la nouvelle façade du bâtiment

La nouvelle façade est constituée de deux parties distinctes, comme le montre la Figure 9 ci-dessous.

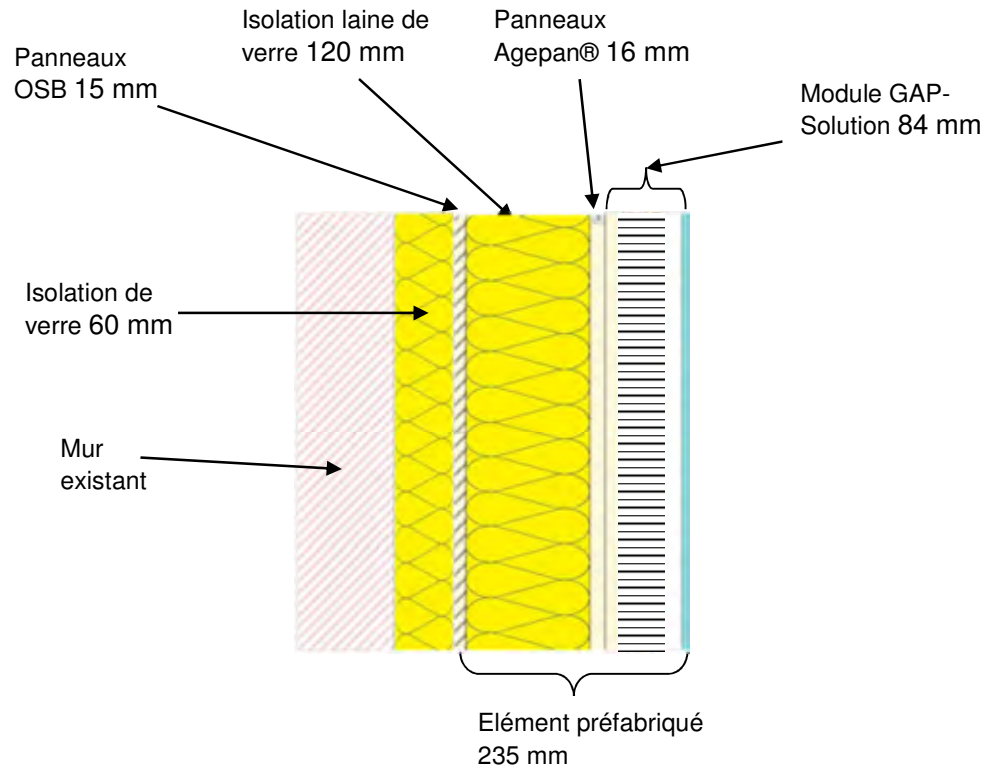


Figure 9 : Coupe de l'élément préfabriqué (à gauche), isolation en nid d'abeille (à droite) [2]

Dans la façade du bâtiment rénové, nous distinguons deux parties :

- La façade existante sur laquelle a été fixée une isolation de 60 mm en laine de verre, ( $\lambda=0,035$  [W/(m K)])
- Un élément préfabriqué qui inclut une isolation en laine minérale ( $\lambda=0,040$  [W/(m K)]) de 12 cm d'épaisseur contre laquelle est ajouté un module développé par la société GAP-Solution [2]. Au total cet élément préfabriqué fait 235 mm d'épaisseur.

La composition de l'ensemble de l'élément préfabriqué est détaillée dans le Tableau 1.

Désignation	Epaisseur [mm]
Module GAP-Solution	84
Panneau Agepan	16
Isolation laine de verre	120
Panneau OSB	15
<b>TOTAL</b>	<b>235</b>

Tableau 1 : Dimensions de l'élément préfabriqué

Le chapitre suivant présente plus en détail le système GAP-Solution.

### 5.2.1 Module GAP-Solution

Le module appliqué en façade est produit par l'entreprise autrichienne GAP-Solution ([www.gap-solution.at](http://www.gap-solution.at) [2]). Cet élément est composé d'une structure en nid d'abeille en carton d'une épaisseur de 30 mm placée entre un vitrage de 6 mm et une isolation comme le montre la Figure 10. La couche en nid d'abeille peut être colorée afin d'offrir différents coloris de la façade.



Figure 10 : Coupe de l'élément préfabriqué (à gauche), isolation en nid d'abeille (à droite) [2]

La composition de cet élément GAP-Solution, d'un poids approximatif de  $35 \text{ kg/m}^2$ , est donnée dans le Tableau 2.

Désignation	Epaisseur [mm]
Verre extérieur trempé	6
Lame d'air	29
Nid d'abeille carton	30
Plateau porteur en fibre de bois MDF	19
<b>TOTAL</b>	<b>84</b>

Tableau 2 : Dimensions du module GAP-Solution

Il y a deux ouvertures, une en bas et une en haut de chaque module (tôle perforée de trous d'un diamètre de 3mm), ce qui permet une faible ventilation de la lame d'air.

Pour cet élément GAP-Solution et sans tenir compte de l'influence du rayonnement solaire, nous obtenons une valeur  $U = 0.74 \text{ [W/(m}^2\text{.K)]}$ . Mais il est important de noter que de par sa conception, la valeur  $U$  de cet élément in situ, sera influencée par le rayonnement solaire incident, donc par son orientation. La dernière valeur  $U$ , ne doit donc pas être utilisée pour effectuer un bilan thermique.



### 5.3 Fenêtres

Les fenêtres des éléments préfabriqués sont constituées d'un triple-vitrage avec store intégré entre le verre extérieur amovible et un double vitrage (Figure 11).



Figure 11 : Fenêtre et store intégré à lamelles

Le Tableau 3 présente les caractéristiques principales du vitrage.

Caractéristique	
Valeur $U_g$ [ $W/m^2/K$ ]	0.70
Valeur $g_{\perp}$ [-]	0.50
Cadre PVC, valeur $U$ [ $W/m^2/K$ ]	0.72

Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques des fenêtres

## 5.4 Toiture

La toiture est composée de deux pans différents comme le montre la Figure 12 avec deux types différents d'isolations.

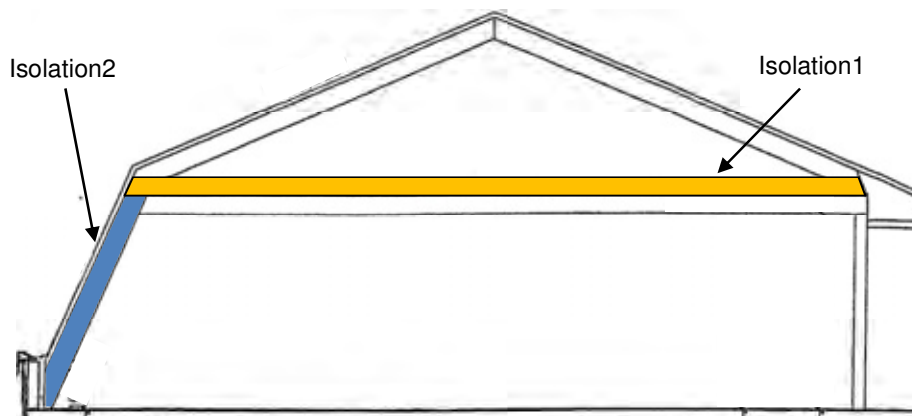


Figure 12 : Dispositions des isolations de la toiture

Les compositions sont présentées aux Tableau 4 et Tableau 5 ci-dessous.

Désignation – Isolation 1	Epaisseur [mm]
Laine de verre - $\lambda=0.035$ [W/m <sup>2</sup> /K]	160
Placoplâtre	13
<b>TOTAL</b>	<b>173</b>

Tableau 4 : Toiture - Composition de l'isolation 1

Désignation – Isolation 2	Epaisseur [mm]
Isofloc - $\lambda=0.04$ [W/m <sup>2</sup> /K]	210
Panneau bois	19
<b>TOTAL</b>	<b>229</b>

Tableau 5 : Toiture - Composition de l'isolation 2

## 5.5 Synthèse des valeurs U

Le Tableau 6 résume les valeurs U des différentes parties de l'enveloppe du bâtiment après rénovation.

Désignation	Composition	Valeur U [W/(m <sup>2</sup> .K)]
Toiture (isolation 1)	Laine de verre 160 mm / Placoplâtre	0.207
Toiture (isolation 2)	Isofloc 210 mm / Panneau bois	0.227
Toiture des appartements-témoins (terrasse du 5 <sup>ème</sup> étage)	Béton armé 200mm / Isolation 300mm / Bitume 5 mm	0.129
Façade extérieure	Béton armé 200mm / Isolation 180 mm / Module GAP-Solution	0.171 (sans tenir compte des gains solaires, cf § 7)
Vitrage	Triple vitrage avec couche IR	0.70
Cadre de fenêtres	PVC 100 mm	0.72
Dalle au-dessus du centre commercial	Plâtre 50mm / Isolation phonique 20mm / Béton armé 200mm	1.11
Dalle contre air extérieur	Plâtre 50mm / Isolation phonique 20mm / Béton armé 200mm / Isolation 200mm	0.150

Tableau 6 : Valeurs U de l'enveloppe du bâtiment

## 5.6 Production, distribution et émission de chaleur

### 5.6.1 La production de chaleur

Avant la rénovation, la production de chaleur était assurée par une chaudière à gaz. La nouvelle installation est constituée des deux systèmes suivants, qui sont illustrés dans la Figure 13 :

- Un couplage chaleur force (CCF) alimenté au gaz d'une puissance de 12 kW thermiques et de 5 kW électriques.
- Une chaudière à condensation d'une puissance de 120 kW s'enclenche si le CCF n'est pas suffisant. Le rendement de cette chaudière est de 98% par rapport au pouvoir calorifique inférieur (Pci), pour les niveaux de température utilisés dans ce bâtiment.



Figure 13 : Chaudière (photo de gauche) et groupe chaleur force (photo de droite)

L'ensemble de l'énergie thermique fournie par ces 2 systèmes est stocké dans une cuve de 2'500 litres. L'énergie électrique du groupe chaleur force est revendue à la Romande Energie.

### 5.6.2 La distribution de chaleur (chauffage et ECS)

La distribution de chaleur dans les appartements se fait au moyen d'une seule conduite aller et une seule conduite retour qui sont connectées pour alimenter chaque appartement, comme le montre la Figure 14.

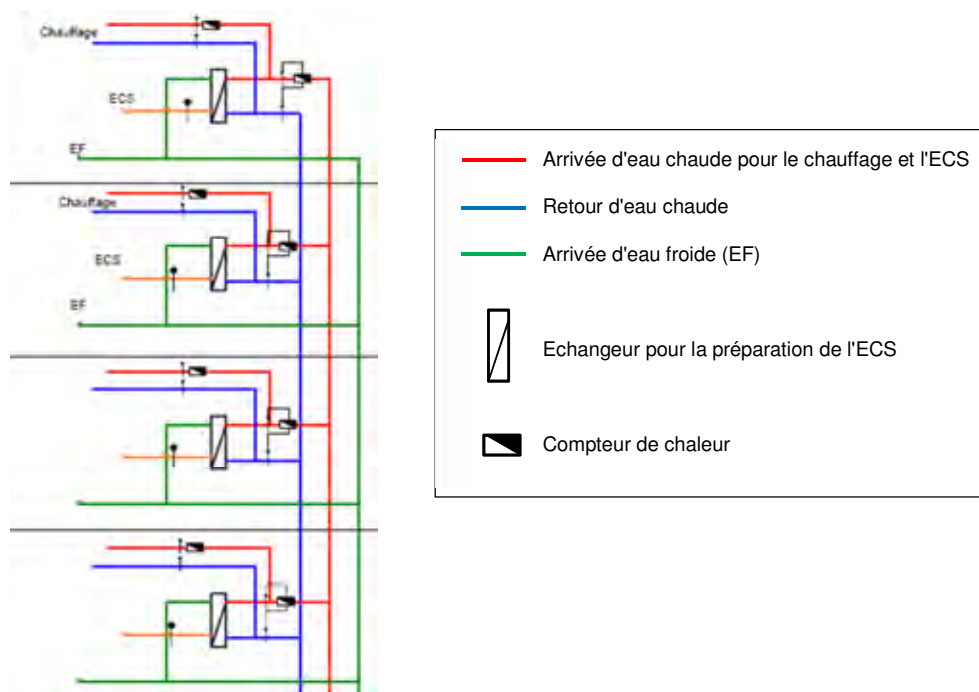


Figure 14 : schéma de la distribution de chaleur dans les appartements

L'unique circuit d'eau chaude arrivant dans chaque appartement est à une température d'environ 70 [°C]. Il sert à la fois au chauffage de l'immeuble et à la production d'ECS. La priorité est donnée au chauffage, mais dès qu'il y a une demande d'ECS, le circuit est dirigé vers un échangeur qui chauffe l'eau froide du réseau. Ce mécanisme est intégré dans le système Varios qui sera présenté plus loin.

Il est donc impossible de mesurer la consommation de chauffage avec un unique compteur de chaleur qui serait installé sur la conduite principale de ce circuit d'eau chaude. Pour distinguer la consommation de chaleur pour le chauffage de celle pour l'ECS, il est nécessaire d'avoir deux compteurs de chaleurs par appartement. Pour des raisons de coûts et de temps à disposition, il a été décidé d'installer un second compteur de chaleur sur quatre appartements-témoins qui sont présentés dans le chapitre 5.8.

### 5.6.3 Emetteur de chaleur

Le haut degré d'isolation de l'enveloppe permet de limiter le nombre d'émetteurs de chaleur dans le bâtiment rénové. Chaque appartement est équipé d'un seul radiateur qui est le porte-serviettes dans la salle de bain, comme le montre la Figure 15.

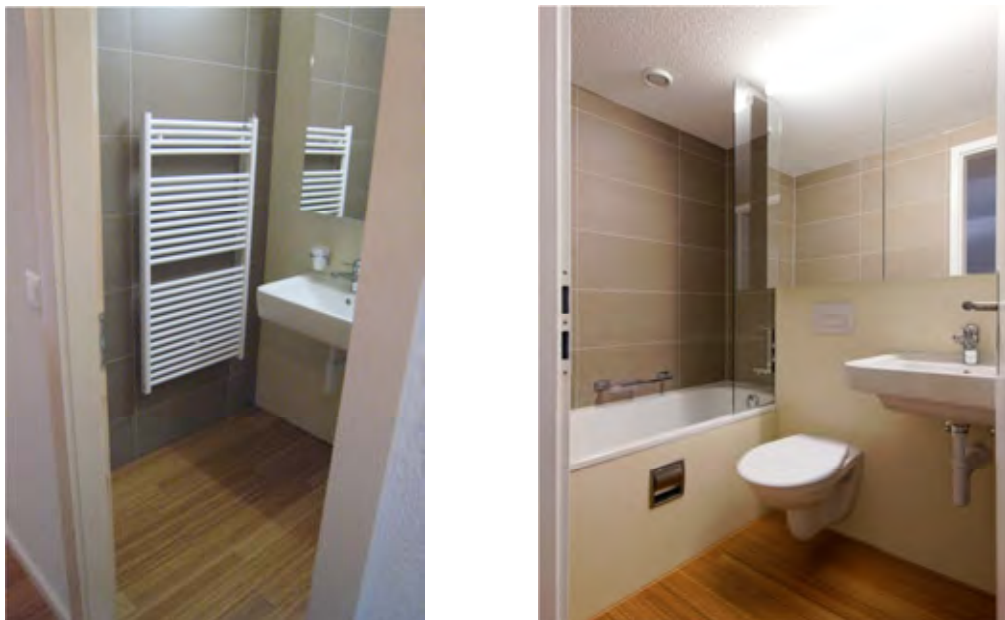


Figure 15 : L'unique radiateur dans les appartements est le porte-serviettes de la salle de bain

Afin de déterminer si cet émetteur de chaleur est suffisant, des mesures du confort thermique ont été effectuées et une enquête de satisfaction des occupants a été menée, dont les résultats sont présentés respectivement au chapitre 9 et au chapitre 12.

## 5.7 Système Varios (chauffage, ECS et ventilation)

Lors de sa rénovation, le bâtiment a été découpé en différentes zones pour partitionner la distribution de la chaleur et de la ventilation. Des colonnes montantes et descendantes ont été installées sur toute la hauteur du bâtiment par série d'appartements superposés. Dans chaque zone, une gaine technique verticale traverse le bâtiment de haut en bas. Celle-ci comprend : l'aller et le retour pour le circuit d'eau chaude, l'amenée et l'évacuation d'air pour la ventilation, et les écoulements d'eau. Ces gaines passent par les salles de bains et sont raccordées à un élément situé derrière le plan comprenant le lavabo et la cuvette des WC. Cette installation innovante, appelée Varios, est fabriquée par la société suisse SwissFrame [4].

Ce système est installé dans chaque appartement lors de la rénovation et il inclut dans un seul élément :

- Un monobloc de ventilation avec un récupérateur de chaleur,
- Un système dynamique permettant la distribution de l'eau chaude arrivant dans chaque appartement, soit vers le circuit de chauffage, soit vers un échangeur de chaleur à plaques permettant de produire de l'eau chaude sanitaire à la volée,
- La distribution et l'évacuation d'eau pour les sanitaires (WC, lavabo et baignoire/douche).

Le système Varios est très compact et s'intègre dans un caisson de 40 cm de profondeur situé derrière le lavabo et les toilettes comme montré dans la Figure 16.



Figure 16 : Système Varios à l'intérieur d'une salle de bains (Photos SwissFrame).

Dans la Figure 16, la photo de gauche montre le système tel qu'il est vu par les occupants et la photo de droite montre le système Varios sans le panneau d'habillage (en rouge sur la photo de gauche). La Figure 17 présente les différentes parties du système Varios.

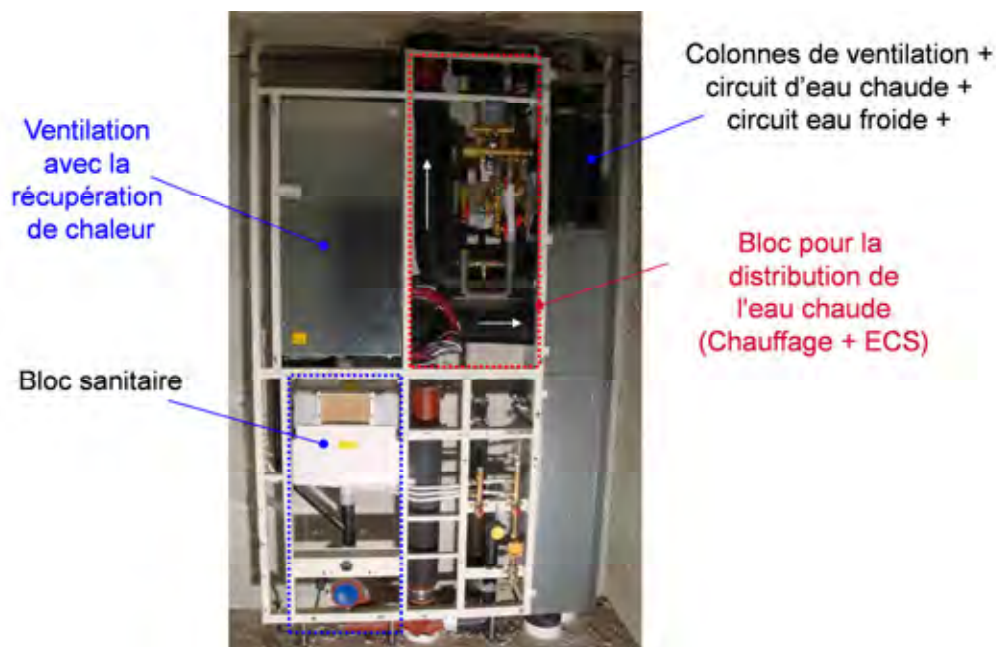


Figure 17 : Système Varios en détail



Un compteur de chaleur mesure l'énergie consommée au niveau de la conduite d'eau chaude qui arrive dans chaque appartement. Il prend donc en compte la consommation de chaleur pour le chauffage et l'ECS sans distinction. Comme présenté à la Figure 18, son écran est situé derrière le miroir de la salle de bain, afin de sensibiliser l'utilisateur à sa propre consommation d'énergie. Pour l'analyse des performances de ce bâtiment, un second compteur de chaleur sera installé dans des appartements-témoins afin de pouvoir distinguer entre la consommation de chaleur du chauffage et de l'ECS.

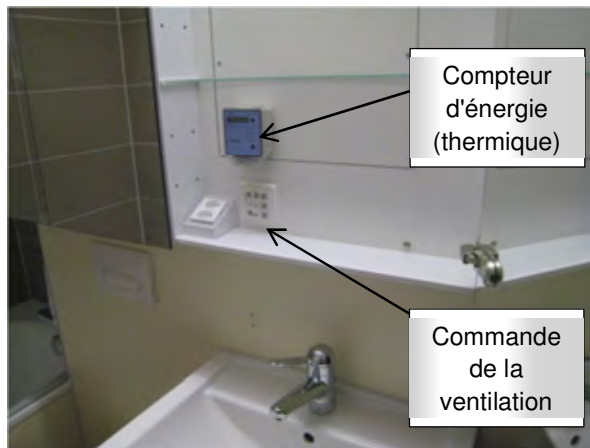


Figure 18 : Intérieur de l'armoire de la salle de bain avec le compteur de chaleur et la commande de la ventilation.

De plus, une commande, également située derrière le miroir de la salle de bain, permet aux occupants de régler la vitesse des ventilateurs.

## 5.8 Appartements-témoins

Dans ce projet, quatre appartements-témoins ont été retenus afin d'analyser les performances du bâtiment et des installations techniques en détail. La Figure 19 montre un de ces appartements après rénovation.



Figure 19 : Un des appartements-témoins

Il a été décidé de prendre quatre appartements pour pouvoir moyenner raisonnablement les résultats. Il aurait été souhaitable de pouvoir équiper plus d'appartements, mais pour des raisons de coûts du système d'acquisitions et de temps à disposition pour instrumenter le bâtiment, cette solution n'a pas été retenue pour ce projet.

Ces appartements-témoins ont été instrumentés et analysés plus en détail que les autres appartements afin de pouvoir mieux connaître les performances et les effets des systèmes installés lors de la rénovation (nouvelle façade et système Varios).



Les résultats obtenus, comme par exemple la consommation du besoin de chaleur (énergie utile pour le chauffage), dont les valeurs sont mesurées en détail pour ces quatre appartements, seront extrapolés à l'ensemble du bâtiment en se basant sur les surfaces de références énergétiques. Les quatre appartements ont chacun une surface de référence énergétique de 100.1 m<sup>2</sup>. Cela prend en compte également au prorata une partie des couloirs, des cages d'escaliers et des ascenseurs.

## 6 Acquisition des mesures

L'acquisition des données concernant les performances du bâtiment a nécessité la mise en œuvre d'un système de mesures complexes. Dans le cadre de ce projet, l'entreprise Siemens a participé à la conception du système d'acquisitions. Cet appareillage a ensuite été testé afin de garantir la conformité des mesures, par exemple pour éviter que l'inversion inopinée de sondes ne perturbe l'analyse des résultats. En outre, les sondes ont été étalonnées soit d'usines pour les produits Siemens, soit au LESBAT pour les mesures ponctuelles comme pour la valeur U des façades.

Les mesures effectuées dans le bâtiment durant le projet sont de plusieurs types :

### A) Pour les quatre appartements-témoins

- a. **Acoustique** : analyse des niveaux acoustiques obtenus dans les différentes pièces, pour différentes vitesses de fonctionnement des ventilateurs du système Varios. Une vérification de la conformité des niveaux acoustiques a été réalisée selon la norme SIA 181. Ces mesures ont été effectuées alors que les appartements n'étaient pas encore occupés et tôt le matin afin que les résultats ne soient pas perturbés par des bruits parasites.
- b. **Confort thermique** : détermination PMV selon la norme ISO 7730 (SIA 180). Ces mesures ont été effectuées sur des périodes de plusieurs jours, durant différentes périodes de l'année. L'objectif de ces mesures est de déterminer par exemple, si l'unique corps de chauffe dans la salle de bain est suffisant ou si la façade n'engendre pas de surchauffe durant la période estivale.
- c. **Rendement de la récupération de chaleur de la ventilation (Varios)** : analyse détaillée des performances énergétiques du système Varios. Pour ce faire, des sondes de température, de débit d'air et de comptage d'électricité ont été installées dans chaque appartement. De plus, une station météorologique permet de corréler ces mesures avec les conditions météorologiques du lieu.
- d. **Qualité de l'air** : analyse de la qualité de l'air dans les différentes pièces des appartements-témoins. Des sondes de qualité d'air (CO<sub>2</sub>, COV), ainsi que d'humidité ont été positionnées dans des lieux représentatifs.
- e. **Consommation de chaleur** : comme expliqué dans le chapitre 5.7, le circuit d'eau chaude arrivant dans chaque appartement sert aussi bien au chauffage qu'à la production d'ECS. Il est donc impossible de mesurer la consommation de chauffage avec un unique compteur de chaleur qui serait installé sur la conduite principale de ce circuit d'eau chaude. Pour distinguer la consommation de chaleur pour le chauffage de celle pour l'ECS, il est nécessaire d'avoir deux compteurs de chaleur. Ainsi, chaque appartement témoin est équipé d'un second compteur de chaleur en plus de celui utilisé pour sensibiliser les occupants.

### B) Pour les 55 autres appartements

- a. **Consommation de chaleur** : dans chacun des 55 autres appartements, les données des compteurs de chaleur sont également enregistrées afin de connaître la consommation d'énergie utile totale (chauffage et l'eau chaude sanitaire) et de pouvoir déterminer par la suite, les pertes de distribution.

### C) Pour le bâtiment

- a. **Valeur U** : la valeur U de la façade a été mesurée pour deux orientations différentes afin d'analyser l'effet du rayonnement solaire sur ces valeurs. Ces mesures ont été réalisées durant l'hiver 2010-2011.
- b. **Energie finale pour la production de chaleur** : analyse de la consommation d'énergie totale (chauffage + ECS) dans le bâtiment rénové grâce à l'enregistrement du compteur d'énergie installé sur la distribution générale. La différence entre la consommation d'énergie obtenue avec ce compteur et la somme des énergies mesurées dans les appartements, donnera les pertes énergétiques par distribution dans le bâtiment.
- c. **Station météo** : a l'extérieur du bâtiment, une sonde météo a été installée pour pouvoir corréler les résultats obtenus avec la météo. Les sondes suivantes ont été installées :
  - Un pyranomètre vertical dans la direction sud-est (27° est) afin de mesurer l'irradiation solaire respectivement dans le plan de la façade des 4 appartements-témoins étudiés .
  - Une sonde de vitesse du vent.
  - Une sonde de température d'air (extérieure).

La Figure 20 indique les sondes installées dans les appartements-témoins.

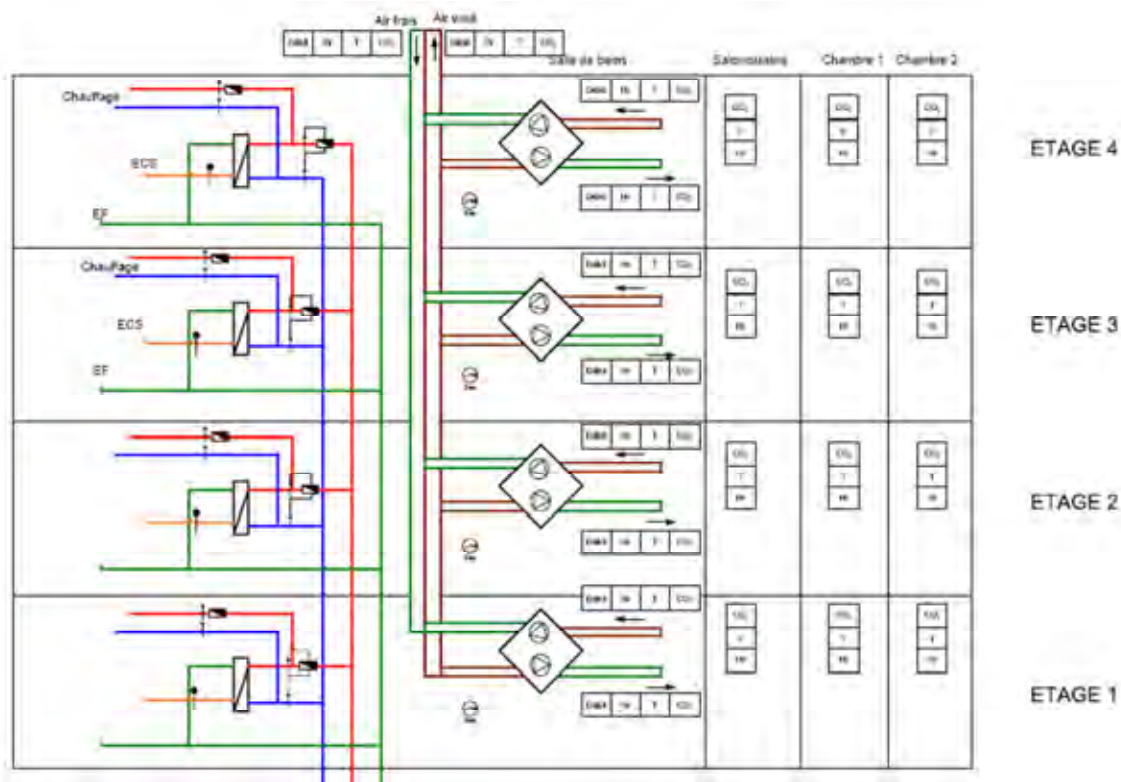


Figure 20 : Schéma de principe des sondes installées dans les appartements-témoins

L'ensemble de toutes les données mesurées sont transmises par internet à un serveur qui récolte, sauvegarde et centralise les informations recueillies.

Pour terminer, un sondage de satisfaction auprès des locataires a été effectué. Ce sondage avait pour objectif d'analyser le niveau de satisfaction des occupants dans le bâtiment rénové.

## 7 Mesures de la valeur U des murs

La valeur U réelle de la façade, qui inclu l'élément GAP-Solution, a été obtenue en mesurant le flux thermique traversant un élément à l'aide d'un fluxmètre en combinaison d'une mesure de température de chaque côté de l'élément dans un environnement stable. Dans la pratique, un environnement stable ne peut être rencontré qu'au sein d'un laboratoire, et n'est jamais effectif sur un site de mesures d'un bâtiment soumis à l'environnement externe. Dès lors, la solution qui s'impose est définie par la norme ISO 9869 :1994 [6].

Cette norme suggère que la moyenne du flux thermique et des températures, sur un laps de temps suffisamment long, permet d'avoir une estimation de la valeur U de l'élément mesuré. Cette méthode est valide si :

- a) les propriétés thermiques des matériaux et le coefficient de transfert thermique sont constants sur toute la gamme des variations de température durant la mesure,
- b) le changement de la quantité de chaleur emmagasinée dans l'élément est négligeable par rapport à la quantité de chaleur passant par l'élément.

La condition (a) est généralement validée. Par contre, pour satisfaire la condition (b), les mesures doivent être effectuées sur plusieurs jours.

Le calcul de la valeur U obtenue expérimentalement consiste à diviser la somme des flux thermiques mesurés par la somme de la différence des températures intérieures et extérieures mesurées, donnée par l'Équation 1 suivante :

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n (q_j)}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad [\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})] \quad \text{Équation 1}$$

avec :

- $q$  : flux thermique par unité de surface  $[\text{W}/\text{m}^2]$
- $T_i$  : température intérieure  $[\text{°C}]$
- $T_e$  : température extérieure  $[\text{°C}]$

Selon la norme ISO 9869 :1994, pour ce type de construction lourde, la durée d'acquisition doit dépasser 7 jours et la valeur U à retenir est obtenue lorsque sa valeur varie de moins de 5% au court du temps. Ainsi, les mesures effectuées ont duré 13 jours consécutifs, du mardi 18 au lundi 31 janvier 2011, dans un appartement comportant à la fois un mur sud et nord (appartement n°221). Cet appartement étant inoccupé, cela a permis d'avoir une meilleure stabilité de la température intérieure. La Figure 21 illustre l'installation des capteurs de mesures sur la paroi sud du bâtiment.

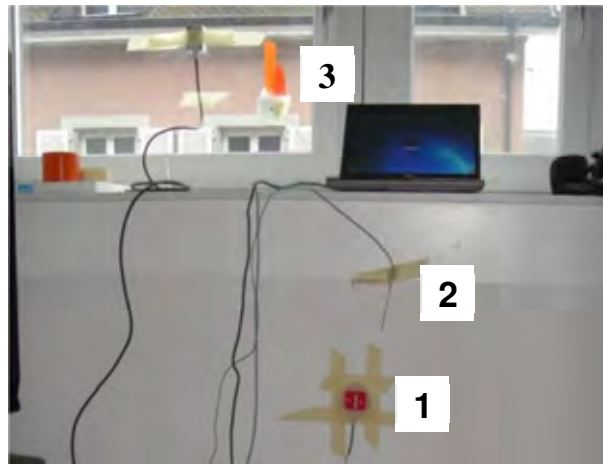


Figure 21 : Capteurs de mesures pour la détermination de la valeur U du mur. 1) fluxmètre, 2) sonde de température intérieure, 3) sonde d'ensoleillement

Une sonde de température extérieure est positionnée sur la paroi et est protégée du rayonnement solaire. Ce même type d'installation est présent simultanément sur le mur nord.

La Figure 22 ci-dessous montre les relevés des températures durant la campagne de mesures. En rouge, celles prises côté sud et en bleu celles prises côté nord.

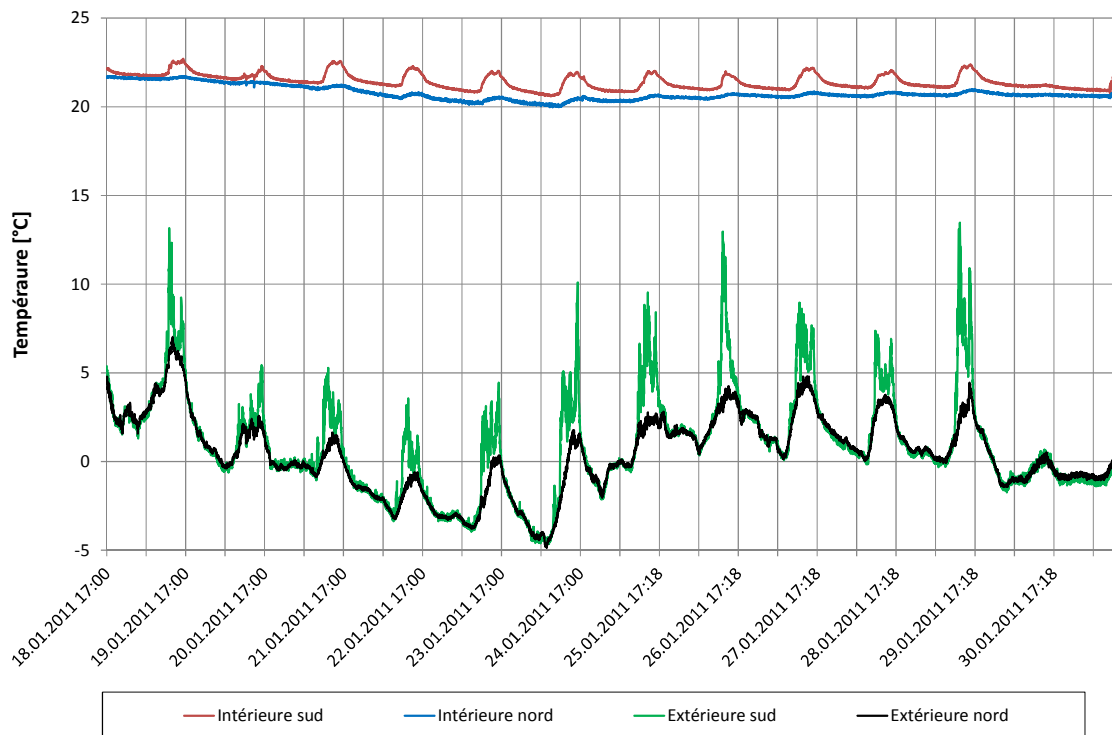


Figure 22 : Températures nord/sud - intérieure/extérieure

Les températures intérieures côté sud subissent de plus grandes variations au cours de la journée. Cette variation est directement liée aux gains solaires passifs qui font monter la température par effet de serre dans la lame d'air entre le verre et le nid d'abeille.

La norme préconise une variation de la température intérieure la plus faible possible. C'est également la raison pour laquelle elle recommande une acquisition sur plus de 7 jours afin d'atténuer l'effet de ces variations. Dans cette étude, l'acquisition a duré 13 jours afin d'avoir

la plus faible influence possible par l'inertie de la paroi. La Figure 23 montre l'influence des légères variations de la température intérieure sur le flux thermique mesuré.

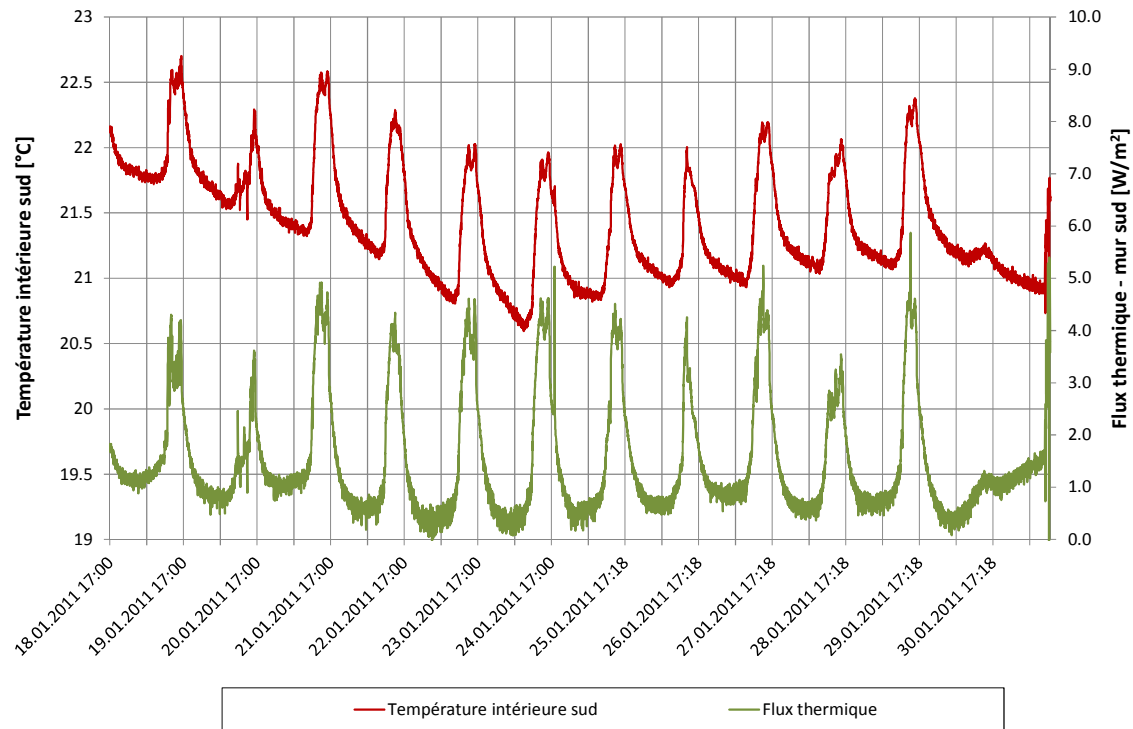


Figure 23 : Flux thermique et température intérieure (sud)

Les mesures sur le mur nord ont montré la même corrélation entre la variation de la température intérieure et le flux thermique même si cette variation est beaucoup plus faible que pour la pièce côté sud, 0.2 [K] au nord contre plus de 1 [K] au sud.

Pour atténuer les variations de la Figure 23, une moyenne glissante des valeurs U des murs sud et nord a été réalisée. La Figure 24 visualise ces moyennes glissantes et permet de voir vers quelles valeurs tendent les coefficients U. Pour chaque orientation nord sud, une droite présente la valeur U finale.

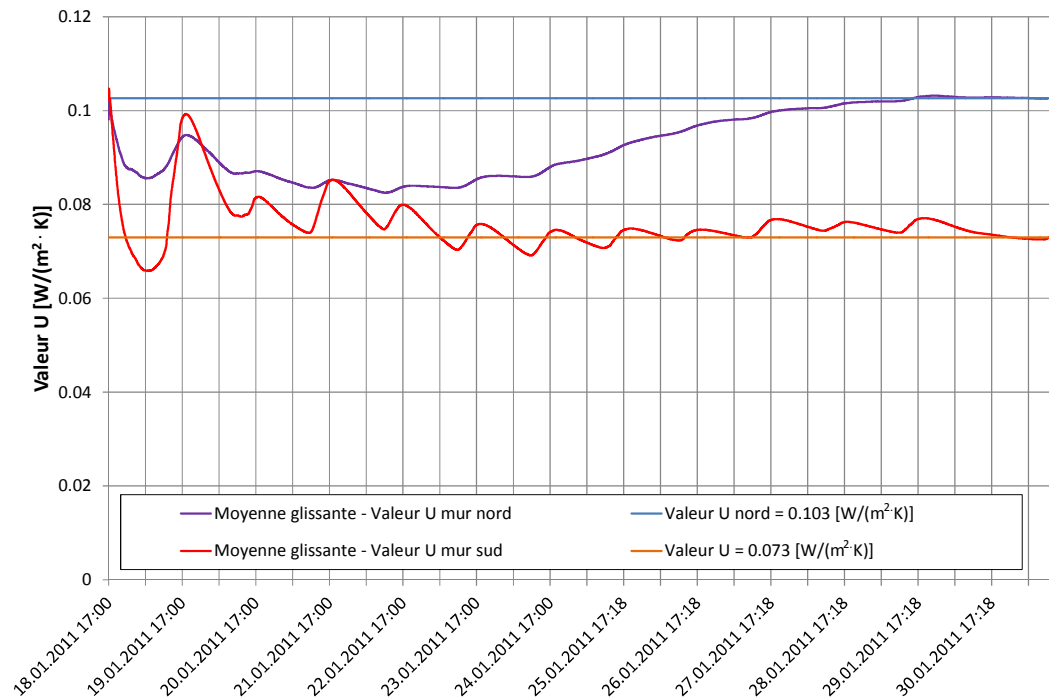


Figure 24 : Moyennes glissantes des valeurs U pour les murs sud et nord

Sur la courbe rouge (mur sud), nous retrouvons les variations qui sont plus importantes que dans le cas du mur nord. 13 jours semblent le minimum pour déterminer expérimentalement la valeur U pour ce type de mur.

Le Tableau 7 résume les différentes valeurs U selon le mode d'obtention et l'orientation nord ou sud.

Mode de calculs	Valeur U [W/(m²·K)]	
	façade nord	façade sud
Théorique (sans rayonnement solaire)	0.171	
Mesurée	0.103 ± 5%	0.073 ± 5%

Tableau 7 : Valeurs U de l'enveloppe du bâtiment déterminées expérimentalement

Ces résultats montrent l'intérêt d'avoir une paroi profitant de l'ensoleillement pour diminuer la valeur U. Cette valeur U varie au cours de l'année suivant l'irradiation solaire et peut être négative en été.

## 8 Acoustique

Les mesures des niveaux de pressions acoustiques ont pour objectif de vérifier que le bruit généré par la ventilation mécanique n'engendrait pas de désagrément. Ce contrôle a été effectué en appliquant la norme SIA 181 (2006) qui limite le niveau de pression acoustique en fonction du type de pièce et du niveau d'exigence.

Dans le cas présent, le bruit produit par le fonctionnement de la ventilation est un bruit continu. Les exigences à respecter sont alors données dans le Tableau 8 qui donne le niveau de pression acoustique limite  $L_{H, tot}$  à ne pas dépasser en fonction de la sensibilité du local et pour les exigences définies pour ce bâtiment.

Sensibilité au bruit de la pièce de réception <sup>a</sup>	Exigence minimale <sup>a</sup>	Exigence accrue <sup>a</sup>
Moyenne (séjour, cuisine ouverte, chambres à coucher) <sup>a</sup>	$L_{H, tot} \leq 28 \text{ dB(A)}$ <sup>a</sup>	$L_{H, tot} \leq 25 \text{ dB(A)}$ <sup>a</sup>
Faible (W.-C., salle de bain) <sup>a</sup>	$L_{H, tot} \leq 33 \text{ dB(A)}$ <sup>a</sup>	$L_{H, tot} \leq 30 \text{ dB(A)}$ <sup>a</sup>

Tableau 8 : Niveau de pression acoustique acceptable selon la SIA 181 (2006)

Pour toute nouvelle construction ou transformation notable du point de vue acoustique autorisée après le 1<sup>er</sup> avril 1987, l'ordonnance fédérale sur la protection contre le bruit (OPB) impose le respect des exigences minimales de la norme SIA 181. Depuis le 1<sup>er</sup> juin 2006, l'édition valable de la norme est la SIA 181 : 2006.

Ce bâtiment visant le label Minergie-P rénovation, l'exigence accrue doit être atteinte. C'est donc cette exigence qui a été retenue pour analyser les résultats. Ainsi les valeurs suivantes doivent être visées pour les pièces existantes dans le bâtiment :

- séjour, cuisine ouverte et chambre (exigence accrue) :  $L_{H, tot} \leq 25 \text{ dB(A)}$
- WC et salle de bains (exigence accrue) :  $L_{H, tot} \leq 30 \text{ dB(A)}$

Ces mesures ont été effectuées par M. Sapin du bureau « Architecture & Acoustique » à Genève qui est spécialisé dans l'acoustique des installations technique et intervenant pour les cours d'acoustique pour Minergie en Suisse Romande.

### 8.1 Expression du niveau sonore normalisé

Pour les bruits continus, la valeur normalisée du niveau sonore est déterminée selon l'expression suivante :

$L_{H, tot} = L_{nT, A} + K_2 + K_3 + C_v$ , avec :

- $L_{nT, A}$  : niveau sonore **moyen** mesuré durant le fonctionnement de l'installation, intégration temporelle sur plusieurs secondes, pondéré selon le filtre A et normalisé pour un temps de réverbération de 0,5 seconde à l'intérieur de la pièce de réception ;
- $K_2$  : terme correctif compris entre 0 et 6, lié au caractère tonal du bruit. Ici,  $K_2 = 0$  ;
- $K_3$  : terme correctif compris entre 0 et 6, lié au caractère impulsionnel du bruit. Ici,  $K_3 = 0$  ;
- $C_v$  : correction liée au volume de la pièce. Pour des pièces ordinaires jusqu'à 200 [m<sup>3</sup>], cette correction est de 0.

## **8.2 Méthodologie de mesures**

Le mesurage du bruit de la ventilation double-flux a été réalisé selon la procédure dite élaborée définie par la norme SIA 181 : 2006. Ces mesures ont été effectuées pour différentes vitesses de fonctionnement de la ventilation du système Varios.

## **8.3 Mesures du niveau sonore**

Le niveau sonore a été relevé par bande de tiers d'octave à l'intérieur de chaque pièce, intégration spatio-temporelle sur 3 x 15 secondes, pour chaque régime de fonctionnement de l'installation. Les mesures ont été effectuées de nuit, entre 4h et 6h, afin d'avoir un bruit de fond le plus bas possible.

## **8.4 Mesures du temps de réverbération**

Le temps de réverbération d'un local correspond à la durée nécessaire à un bruit pour décroître de 60 dB après coupure de la source sonore. Il est mesuré par bande de tiers d'octave dans chaque pièce de réception en trois emplacements. Il est utilisé dans les définitions des indices normalisés pour obtenir des résultats indépendants de la résonance des pièces.



## 8.5 Résultats

Afin de faciliter la lecture des données, les résultats mesurés par tiers d'octaves ( $L_{nT, A}$ ) ne seront pas présentés. Seul le niveau sonore normalisé  $L_{H, tot}$  est présenté, car c'est cette valeur qui doit être inférieure aux exigences indiquées dans le Tableau 8 : (25 dB(A) pour le séjour, les chambres et la cuisine et 30 dB(A) pour la salle de bain-wc).

La Figure 25 et la Figure 26 montrent les mesures obtenues en distinguant les locaux par leur sensibilité au bruit et incluent également la limite de l'exigence accrue à ne pas dépasser. Pour chaque sensibilité, les résultats sont présentés pour les différentes vitesses de ventilation.

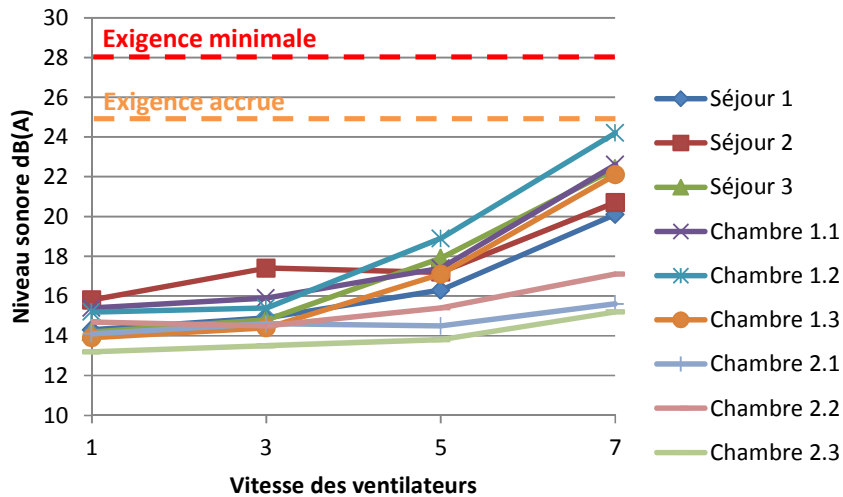


Figure 25 : Niveau de pression acoustique dans les appartements-témoins pour les chambres et le séjour

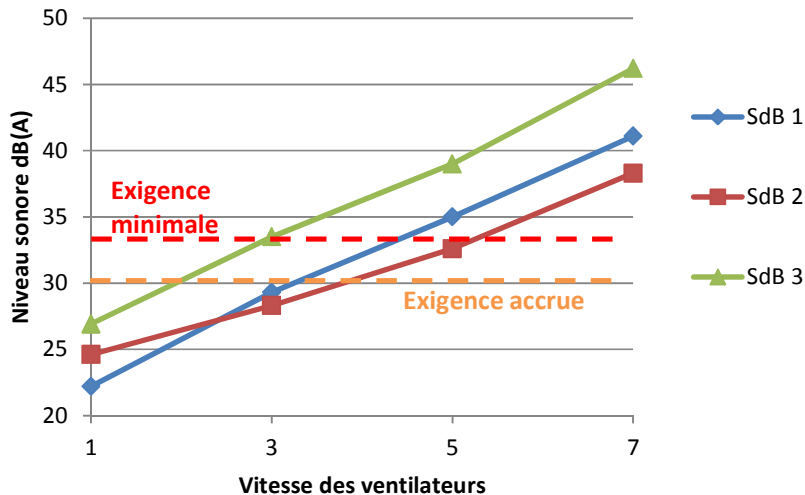


Figure 26 : Niveau de pression acoustique dans les salles de bain (SdB) des appartements-témoins

Sur la base des résultats obtenus (Figure 25 et Figure 26), les constats suivants peuvent être faits :

- **Séjour, chambre et cuisine** : Les exigences accrues de la norme SIA 181 (2006) sont respectées dans toutes ces pièces quel que soit le régime de fonctionnement de la ventilation.
- **Salles de bain** : les exigences accrues de la norme sont dépassées à partir de la vitesse 3 dans un appartement et de la vitesse 5 dans les autres appartements. Comme nous le verrons par la suite, 90% des occupants utilisent la vitesse 3 ou inférieure pour la ventilation. Pour les autres, il faut toutefois rappeler que la durée de présence des occupants dans ces locaux est courte et que la gêne occasionnée pour les hautes vitesses, ne sera que momentanée.

En outre, étant donné la configuration des appartements, avec la salle de bain au centre des appartements, i.e. qui ne partage pas de paroi avec une pièce dont la sensibilité au bruit est moyenne ou haute, cette gêne ne se propage pas dans les autres appartements.

Nous pouvons donc indiquer que du point de vue acoustique, le système Varios ne génère pas de gêne particulière, si ce n'est à des hautes vitesses et uniquement dans la salle de bain. Dans des situations normales d'utilisation et dans les pièces souvent occupées, les niveaux acoustiques mesurés sont inférieurs à la norme SIA pour une exigence accrue, comme requis pour le label Minergie-P.

## 9 Confort thermique des occupants

Ce chapitre présente le résultat du confort thermique obtenu par mesures dans les appartements-témoins.

En plus de ces mesures, le confort thermique a également été abordé dans le sondage transmis aux occupants de l'ensemble des appartements. Les résultats de ce sondage sont présentés dans le chapitre 12.

### 9.1 Méthodologie

Les mesures du confort thermiques ont été effectuées par un confortimètre qui est compatible avec la norme ISO 7730 : 2005 [7]

Selon cette norme, le confort est influencé par les paramètres suivant :

- l'habillement,
- l'activité physique des personnes,
- la température de l'air,
- la température moyenne radiante (le rayonnement des objets voisins),
- la vitesse et l'humidité de l'air.

Les résultats présentés dans ce chapitre utilisent le PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui indique le pourcentage de personnes insatisfaites par le confort thermique (trop chaud ou trop froid) dans une situation donnée. Le Tableau 9 présente les valeurs d'habillement et d'activité utilisées pour cette étude.

Habillement	[clo]	[m <sup>2</sup> .K/W]
Été	0.4	0.062
Hiver avec pull	0.93	0.145
Hiver sans pull	0.64	0.0994
Activité	[met]	[W/ m <sup>2</sup> ]
Sédentaire	1.2	70
Repos, assis	1	58.15

Tableau 9 : Paramètres pour les types d'habillements et les taux d'activités utilisés dans ce rapport pour la détermination du confort thermique

Il faut rappeler que dans n'importe quel environnement, il y a au moins 5% de personnes insatisfaites. Par contre le PPD ne devrait pas dépasser 20% d'insatisfaits, afin de garantir un confort thermique acceptable, pour autant que les journées soit hors périodes de canicule, pendant lesquels la température extérieure dépasse 30 °C.

Les mesures ont été réalisées dans le salon, proche de l'angle entre la fenêtre et le mur ouest à une hauteur de 1 mètre environ, ce qui permet d'avoir un point de mesure plutôt défavorable étant donné la dissymétrie du rayonnement IR des surfaces (Figure 27). Ainsi les résultats obtenus seront plutôt pessimistes.

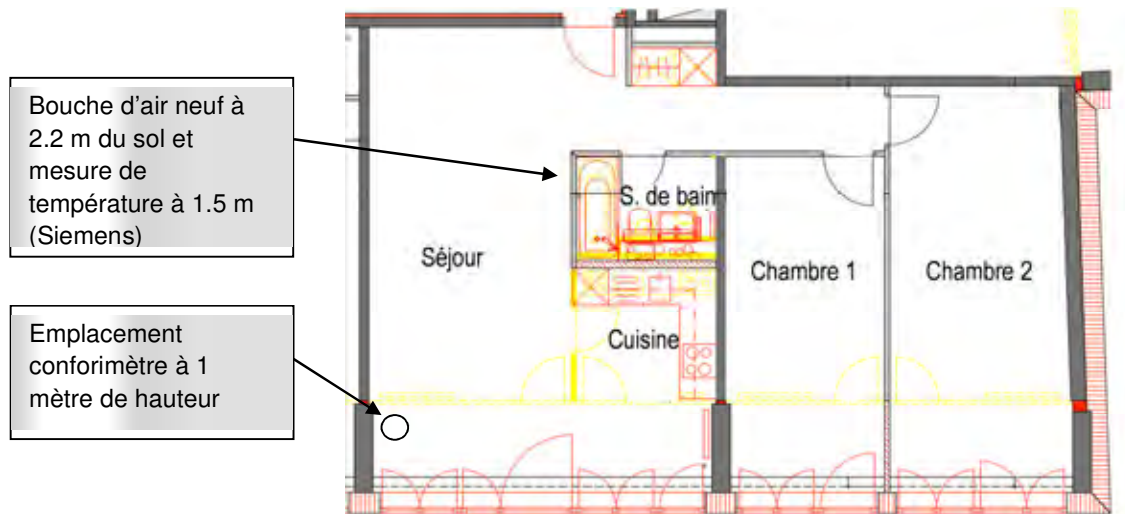


Figure 27 : Plan appartement

Le confort thermique a été évalué entre 6h du matin à 22h période durant laquelle les personnes sont potentiellement actives.

## 9.2 Mesures du confort thermique en hiver

Durant l'hiver, l'habillement des occupants peut varier. Il y a des personnes qui vivent avec un pull et d'autres sans. De même l'activité des occupants peut varier entre repos (lecture) ou sédentaire (déplacement dans l'appartement). Ces différentes possibilités ont été analysées. Ainsi pour cette période, les valeurs suivantes ont été utilisées pour déterminer le confort thermique :

- Habillement :
  - 0.93 [clo] : avec un pull
  - 0.64 [clo] : sans pull
- Activité :
  - 1.2 [met] : sédentaire
  - 1.0 [met] : repos

Les mesures ont été effectuées du 20 au 25 novembre 2010 (période appelée "Hiver"). Durant cette période, la température extérieure a généralement oscillé entre 0 et 5 °C. Une seconde période de mesures était prévue durant l'hiver en espérant des températures plus basses, mais cela n'a pas été possible car l'hiver 2010-2011 était relativement doux. La période de mesures est donc représentative de cet hiver là, mais pas d'un hiver rigoureux.

Afin de pouvoir corrélérer la mesure du confort thermique avec la météo, les données climatiques de la station météo de Marcelin [9] ont été utilisées. Cette station est située à 1300 mètres du bâtiment étudié et à une altitude de 50 mètres plus haut, ce qui permet de considérer ces données météo comme représentatives du climat autour du bâtiment étudié. La Figure 28 montre l'évolution de la température extérieure et de l'irradiation solaire mesurées par cette station durant la période d'analyse du confort thermique.

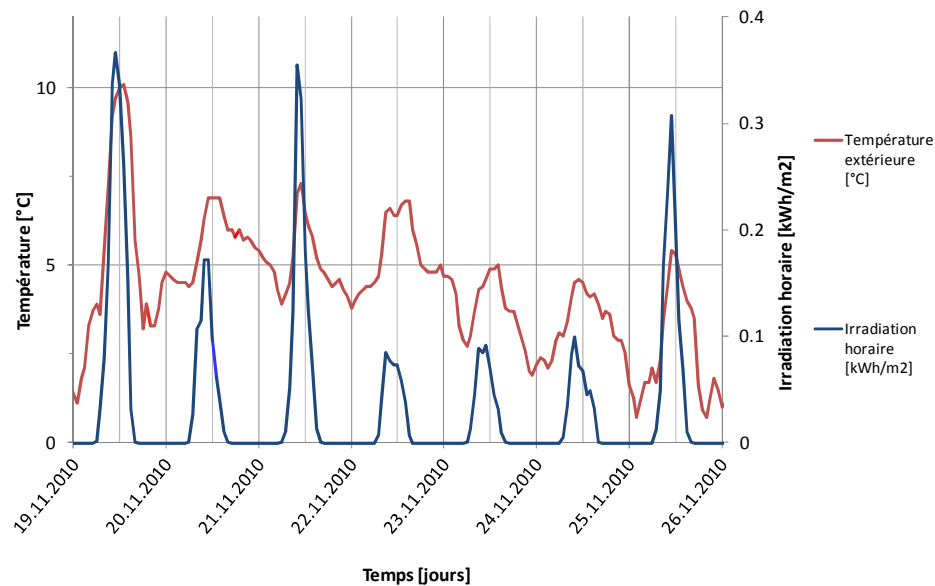


Figure 28 : Température extérieure et irradiation horaire sur le plan horizontal de la station de Marcelin

### 9.2.1 Confort avec pull et activité sédentaire

La Figure 29 présente les résultats du confort durant cette période de mesures avec un pull et une activité sédentaire.

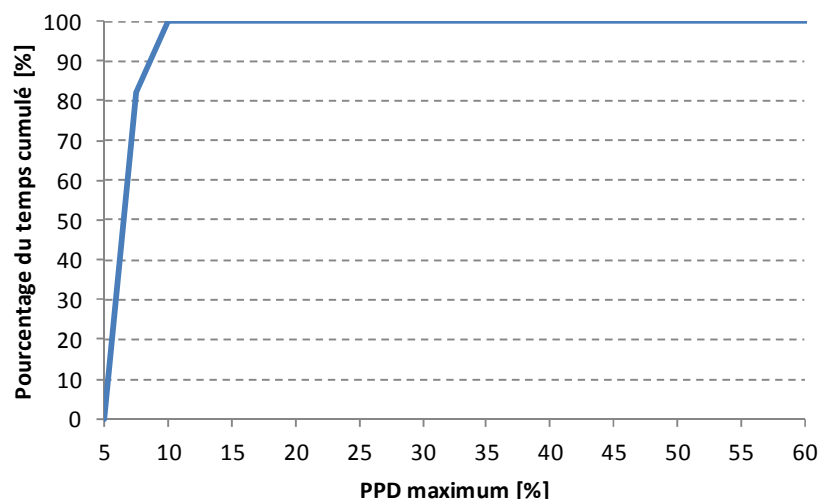


Figure 29 : Pourcentage cumulé du temps durant lequel la valeur du PPD est inférieure à une valeur donnée de 6h à 22h en hiver avec pull et pour une activité sédentaire

Durant 100% du temps la valeur du PPD est inférieure ou égale à 10%. Selon la norme SIA 180, le confort thermique est jugé comme satisfaisant jusqu'à un PPD de 20%. Ainsi, dans ces conditions, le confort est considéré comme bon.

Le Tableau 10 présente les grandeurs moyennes mesurées et le PPD correspondant.

Du 20 au 25.11.10 avec pull, - "Sédentaire"	Valeur moyenne
Temp. du thermomètre globe, $T_g$ [°C]	21.2
Temp. moyenne radiante $T_r$ [°C]	21.0
Temp. de l'air, $T_a$ [°C]	21.7
Temp. opérative, $T_o$ [°C]	21.4
Humidité relative, RH [%]	32.8
Vitesse de l'air [m/s]	0.0
<b>Pourcentage d'insatisfaits PPD</b>	<b>6.7</b>
<b>Sensation thermique</b>	<b>Neutre</b>

Tableau 10 : Paramètres utilisés pour le calcul du confort thermique et résultats du PPD moyen avec pull et pour une activité sédentaire (période hivernale)

### 9.2.2 Confort sans pull et activité sédentaire

La Figure 30 présente les résultats du confort durant cette période de mesures avec une activité sédentaire et sans pull ce qui peut être considéré comme léger pour la saison hivernale.

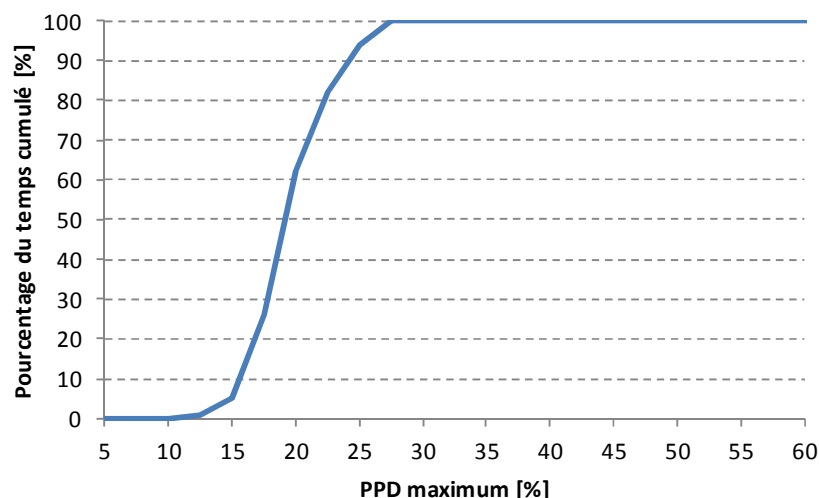


Figure 30 : Pourcentage cumulé du temps durant lequel la valeur du PPD est inférieure à une valeur donnée de 6h à 22h en hiver sans pull et pour une activité sédentaire

Durant 100% du temps la valeur du PPD est inférieure ou égale à 27.5%. Selon la norme SIA 180, le confort thermique est jugé comme satisfaisant jusqu'à un PPD de 20%. Seulement durant 62% du temps cette valeur PPD de 20% n'est pas dépassée.

Le Tableau 11 présente les grandeurs moyennes mesurées et le PPD correspondant.

Du 20 au 25.11.10 sans pull, - "Sédentaire"	Valeur moyenne
Temp. du thermomètre globe, T <sub>g</sub> [°C]	20.9
Temp. moyenne radiante T <sub>r</sub> [°C]	20.7
Temp. de l'air, T <sub>a</sub> [°C]	20.4
Temp. opérative, T <sub>o</sub> [°C]	21.0
Humidité relative, RH [%]	32.4
Vitesse de l'air [m/s]	0.0
<b>Pourcentage d'insatisfaits PPD</b>	<b>19.4</b>
<b>Sensation thermique</b>	<b>Neutre</b>

Tableau 11 : Paramètres utilisés pour le calcul du confort thermique et résultats du PPD moyen sans pull et pour une activité sédentaire (période hivernale)

En moyenne, la valeur du PPD est de 19.4 (sensation thermique neutre) alors qu'au graphique de la Figure 30 la valeur instantanée du PPD atteint au maximum 27.5%.

### 9.2.3 Confort avec pull et activité repos

Pour affiner l'analyse, la mesure du confort thermique est réalisée en considérant une activité réduite en fin de journée en supposant que les occupants restent par exemple assis dans un canapé. La Figure 31 présente les résultats du confort durant cette période de mesures (18h-22h) avec un pull et une activité réduite (repos).

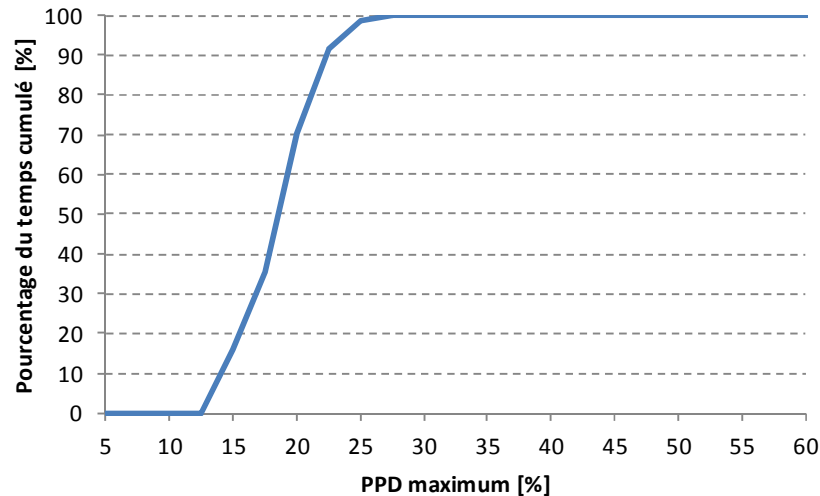


Figure 31 : Pourcentage cumulé du temps durant lequel la valeur du PPD est inférieure à une valeur donnée de 18h à 22h en hiver avec un pull et pour une activité repos

Durant 100% du temps, la valeur du PPD est inférieure ou égale à 25%. Durant 70% du temps cette valeur PPD est inférieure à 20%. La moyenne du PPD est de 18.5% sur toute la période.

Le Tableau 12 résume les résultats pour les différentes conditions d'habillements et d'activités.

Période	Habillement	Activité	PPD moyen [%]	Pourcentage du temps inférieur à un PPD de 20%
20 au 25 novembre 2010 De 6h à 22h	Pull	Sédentaire	6.7	100
20 au 25 novembre 2010 De 6h à 22h	Sans pull	Sédentaire	19.4	62
20 au 25 novembre 2010 De 18h à 22h	Pull	Repos	18.5	70

Tableau 12 : Résumé des résultats pour la période : novembre 2010

Pour une période peu ensoleillée et pour une température extérieure de l'ordre de 3 [°C] le confort thermique est neutre avec un pull et pour une activité "sédentaire".

En diminuant soit l'habillement (→ sans pull), soit l'activité (→ "Repos"), une baisse du confort thermique est visible mais reste en moyenne dans une zone acceptable. Toutefois, le PPD est supérieur à 20% pendant 30 à 40% du temps.



### 9.3 Mesures du confort thermique en été

Comme pour la période hivernale, les activités des occupants peuvent varier entre repos (lecture) ou sédentaire (déplacement dans l'appartement). Les valeurs suivantes ont été utilisées pour déterminer le confort thermique estival :

- Habillement :
  - 0.4 [clo] : habillement estival
- Activité :
  - 1.2 [met] : sédentaire

La Figure 32 représente la variation de l'irradiation sur un plan vertical sud sur le bâtiment étudié (Morges) et la température moyenne journalière horaire (Marcelin).

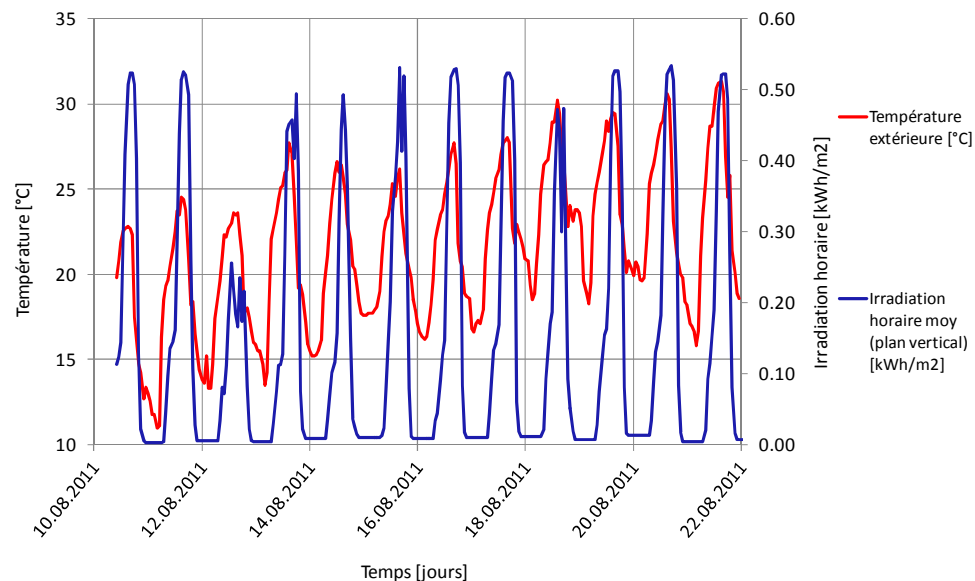


Figure 32 : Irradiation (plan vertical) et température moyenne horaire

A la fin de la période de mesures, certaines journées sont considérées comme caniculaires puisque la température extérieure dépasse les 30 [°C].

Les mesures ont été effectuées du 10 au 21 août 2011 (appelé "été"). A la fin de la période de mesures, les journées dont la température extérieure dépasse les 30 [°C] sont considérées comme caniculaires (SIA 180). Ces journées n'ont pas été prises en compte pour l'analyse du confort thermique.

Afin de contrôler la mesure de la température de l'air intérieur de l'appartement par le système Siemens près de la bouche de pulsion d'air, une comparaison avec celle du conformimètre a été réalisée (Figure 33). Sur ce graphique, la mesure de la vitesse de l'air a été ajoutée afin de déterminer l'effet du vent (fenêtres ouvertes) éventuel sur les différences de température entre les deux mesures.

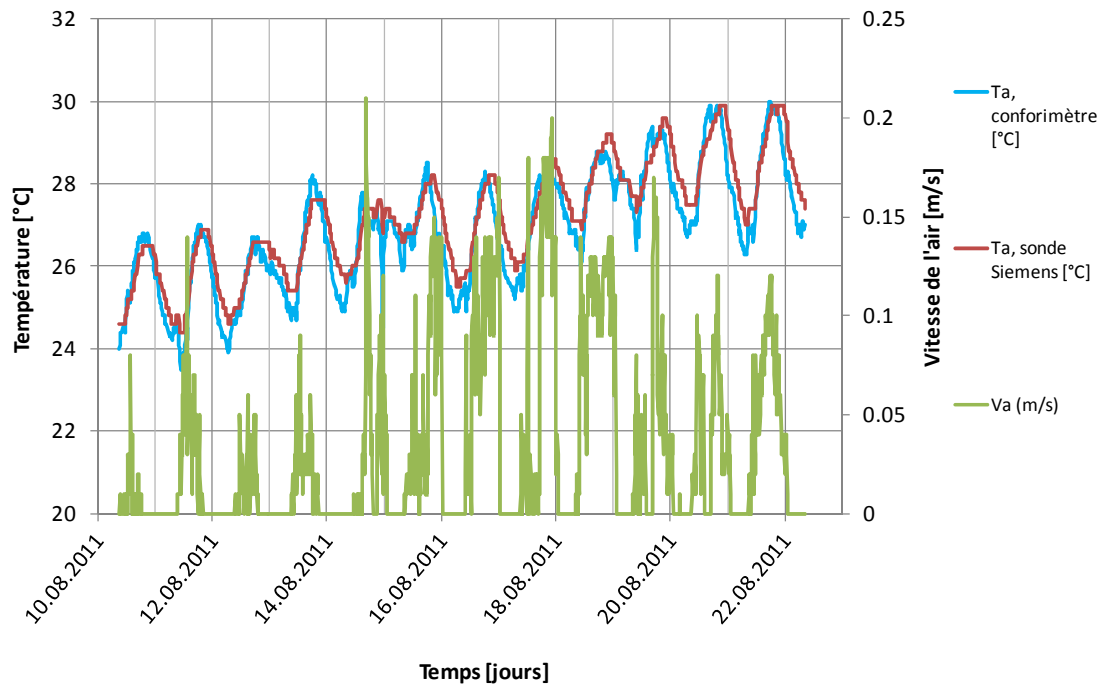


Figure 33 : Vérification de la cohérence des mesures de la température mesurée de l'air intérieur avec la sonde Siemens (Ta, Siemens) et avec la sonde de température du conformimètre (Ta,conformimètre) placé au salon à deux mètres de la fenêtre, et vitesse du déplacement de l'air (Va)

La comparaison des courbes du conformimètre et de la mesure Siemens montre que les courbes se suivent bien. De plus, l'analyseur de confort ne reçoit pas l'ensoleillement direct. Les faibles différences entre ces deux températures proviennent du fait que la mesure ne se fait pas exactement au même endroit.

La courbe de température de l'appareil descend un peu plus bas en deuxième partie de nuit. Ceci est dû au fait que la mesure est effectuée près des fenêtres et que celles-ci sont ouvertes la nuit. Le conformimètre est alors plus fortement influencé par l'air extérieur que la sonde Siemens placée sur le mur. Ceci démontre l'effet de rafraîchissement nocturne.

A quelques exceptions près durant la nuit, il y a peu de déplacement d'air malgré l'ouverture des fenêtres. En revanche le jour, celui-ci est présent, d'une part dû à la présence des locataires et d'autre part dû à un ventilateur qui fonctionnait par grande chaleur. Les derniers jours (caniculaires), les périodes sans déplacement d'air sont plus courtes. Cela montre le besoin de faire baisser la température de l'appartement par les locataires en ouvrant les fenêtres de manière plus importante, ou/et en faisant fonctionner le ventilateur plus longtemps. Aucune corrélation notable n'a pu être trouvée entre le vent extérieur et le déplacement d'air intérieur.

### 9.3.1 Confort pour une activité sédentaire hors période caniculaire

Durant les mesures du confort thermique, certaines journées ont été considérées comme caniculaires. La norme 180 autorise un inconfort dans de telles conditions. Ainsi, une analyse du confort thermique est présentée ci-dessous en ne prenant pas en compte les jours durant lesquels la température extérieure atteint 30°C. Les 18, 20 et 21 août ont été retirés des données. Ainsi, la Figure 34 présente les résultats du confort durant cette période de mesures avec une activité sédentaire et un habillement pour l'été.

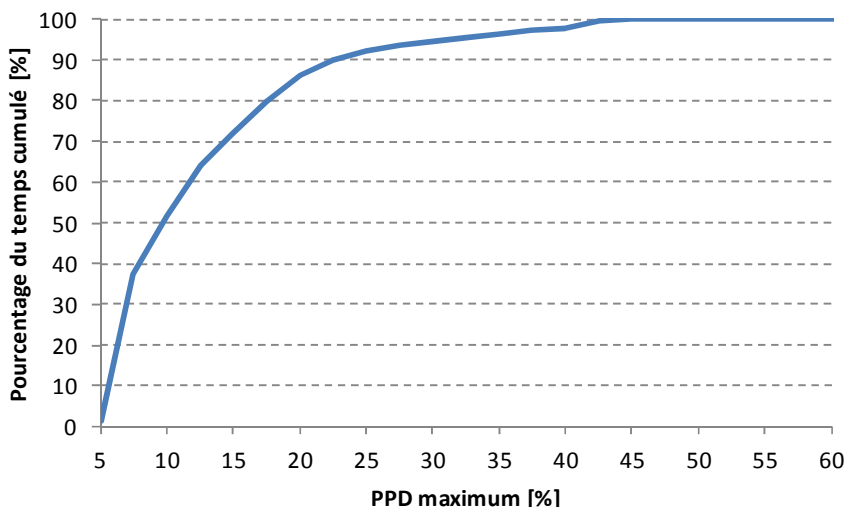


Figure 34 : Pourcentage cumulé du temps durant lequel la valeur du PPD est effective de 6h à 22h en été hors journée caniculaire pour une activité sédentaire

Durant 100% du temps la valeur de PPD est inférieure ou égale à 45%. Selon la norme SIA 180, le confort thermique est jugé comme satisfaisant jusqu'à un PPD de 20%. Ainsi, durant 86.1% du temps cette valeur PPD de 20% n'est pas dépassée. De ce fait, le confort n'est pas garanti pendant seulement 14% du temps. Il faut noter que la moyenne du PPD est de 12.3% durant cette même période, ce qui est une valeur satisfaisante pour garantir le confort thermique.

Le Tableau 13 présente les différentes grandeurs utilisées pour le calcul du confort thermique et le résultat de la valeur moyenne du PPD.

Du 11 au 21.08.11 - "Sédentaire"	Valeur moyenne
Temp. du thermomètre globe, Tg [°C]	26.4
Temp. moyenne radiante Tr [°C]	26.2
Temp. de l'air, Ta [°C]	26.6
Temp. opérative, To [°C]	26.4
Humidité relative, RH [%]	48.9
Vitesse de l'air [m/s]	0.04
<b>Pourcentage prévu d'insatisfaits PPD</b>	<b>12.3</b>
<b>Sensation thermique</b>	<b>Neutre</b>

Tableau 13 : Paramètres utilisés pour le calcul du confort thermique et résultats du PPD moyen avec une activité sédentaire (période estivale sans les journées caniculaires)

## 9.4 Synthèse du confort thermique

Les mesures effectuées en novembre 2010 ont été effectuées dans un appartement inoccupé, avec orientation au sud. Avec un pull, les résultats de confort thermique sont satisfaisants pour une température extérieure de l'ordre de 0 à 5 [°C] et avec un unique radiateur à la salle de bain. Les mesures effectuées près de la fenêtre ne dévoilent pas un inconfort particulier. La simulation avec un habillement et une activité moindre met en évidence l'importance de ces deux paramètres pour la satisfaction de confort thermique.

Les mesures effectuées en août 2011 ont été effectuées dans le même type d'appartement que celui de novembre 2010, mais cette fois avec les occupants. Les conditions de confort changent passablement entre la première partie des mesures et la seconde qui est nettement plus chaude. Selon Météo-Suisse, l'été 2011 est 1 degré plus chaud que la norme 1961-1990, malgré un mois de juillet frais. Cette constatation est principalement liée à la période caniculaire en août durant laquelle les mesures ont été effectuées. Cette situation, liée aux conditions extérieures, ne se rencontre que quelques jours par année. Ainsi, en ne prenant pas en compte les journées caniculaires, 14% du temps cette valeur de PPD dépasse les 20% alors que la valeur moyenne du PPD est de 12.3%, soit un confort thermique satisfaisant.

Le Tableau 14 résume les PMV et PPD obtenus pour les périodes hivernale et estivale. Différents types d'habillement ainsi que deux taux d'activité distincts sont considérés.

Période	Habillement	Activité	PPD moyen [%]	Pourcentage du temps avec un PPD ≤ 20%
20 au 25 novembre 2010 De 6h à 22h	Hiver avec pull	Sédentaire	6.7	100
20 au 25 novembre 2010 De 6h à 22h	Hiver sans pull	Sédentaire	19.4	62
11 au 19 août 2011 De 6h à 22h sans journée caniculaire	Eté	Sédentaire	12.3	86

Tableau 14 : Résumé des résultats du confort thermique

Que cela soit en hiver ou en été, le confort thermique est satisfaisant. En été, le confort thermique est considéré comme chaud, seulement lors de périodes caniculaires, , ce qui est acceptable selon la norme SIA 180.

En discutant avec les locataires, il leur semble que l'ancienne configuration des appartements avec balcon et stores extérieurs (protégeant également la zone balcon) permettait d'avoir une coupure des gains solaires plus efficace que maintenant.

## 10 Performances énergétiques du bâtiment

La mesure des performances énergétiques est réalisée avec les compteurs de chaleur installés dans les 4 appartements-témoins à partir de fin janvier 2011. En effet, les autres compteurs de chaleur ont été mis en service en février 2011, mais beaucoup avaient un défaut de raccordement. L'enregistrement de ces compteurs de chaleurs n'est donc effectif que depuis le 18 avril 2011.

La méthode utilisée pour déterminer le besoin en chaleur durant la période hivernale 2010-2011 a été d'extrapoler une première fois les mesures de la demande énergétique des 4 appartements-témoins sur la période totale de chauffage et ensuite d'extrapoler ces résultats sur l'ensemble du bâtiment en utilisant la SRE comme facteur de pondération.

Etant donné le retard pris par le chantier, les premières mesures d'énergie valides dans les quatre appartements-témoins ne sont exploitables qu'à partir du 26 janvier 2011. Connaissant le nombre de degrés-heures pour Morges avant et après cette date, il a été possible d'en déduire la consommation pour la saison de chauffe. En plus de cette consommation de chauffage, il faudra ajouter la consommation d'ECS ainsi que le rendement global de l'installation de fourniture d'énergie avec les pertes thermiques dans les conduites.

Au vu du retard lié aux problèmes de chantier, le LESBAT effectuera une analyse complémentaire de la consommation d'énergie pour la saison de chauffage 2011-2012. Ce complément sera remis à l'OFEN durant l'été 2012.

### 10.1 Energie de chauffage des appartements

La consommation hebdomadaire d'énergie pour le chauffage des 4 appartements-témoins est présentée à la Figure 35.

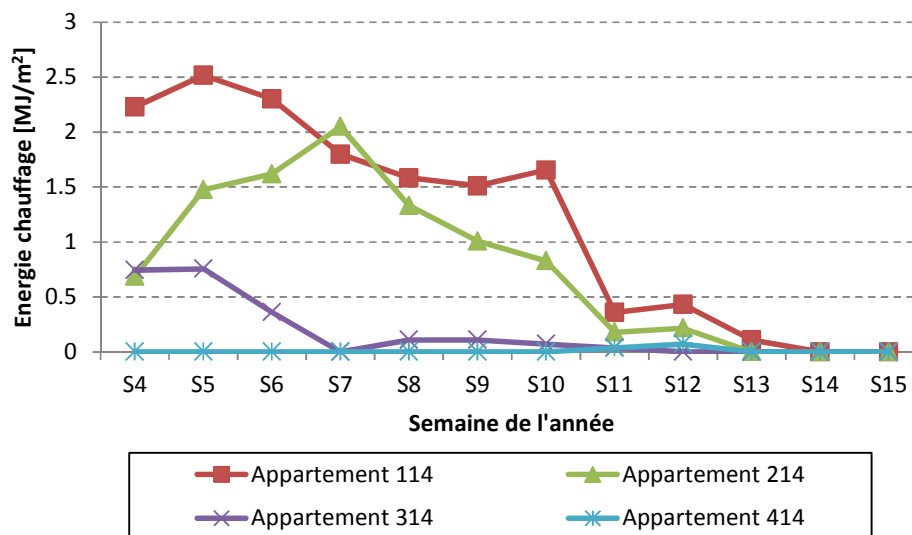


Figure 35 : Consommation hebdomadaire d'énergie de chauffage pour les 4 appartements-témoins

Durant la période de chauffage 2010-2011, le besoin de chaleur pour le chauffage s'est terminé fin mars (semaine 13 incluse).

Afin de connaître la date exacte, le Tableau 15 permet d'avoir une correspondance avec le numéro de la semaine. Pour permettre une meilleure clarté des résultats, certains graphiques sont également présentés avec des valeurs toutes les 4 semaines dans la suite de ce rapport. Le Tableau 16 permet ainsi le même type de correspondance, mais pour une période de 4 semaines consécutives.

Semaines	Dates		Semaines	Dates	
	Début	Fin (minuit)		Début	Fin (minuit)
S1	03.01.2011	09.01.2011	S27	04.07.2011	10.07.2011
S2	10.01.2011	16.01.2011	S28	11.07.2011	17.07.2011
S3	17.01.2011	23.01.2011	S29	18.07.2011	24.07.2011
S4	24.01.2011	30.01.2011	S30	25.07.2011	31.07.2011
S5	31.01.2011	06.02.2011	S31	01.08.2011	07.08.2011
S6	07.02.2011	13.02.2011	S32	08.08.2011	14.08.2011
S7	14.02.2011	20.02.2011	S33	15.08.2011	21.08.2011
S8	21.02.2011	27.02.2011	S34	22.08.2011	28.08.2011
S9	28.02.2011	06.03.2011	S35	29.08.2011	04.09.2011
S10	07.03.2011	13.03.2011	S36	05.09.2011	11.09.2011
S11	14.03.2011	20.03.2011	S37	12.09.2011	18.09.2011
S12	21.03.2011	27.03.2011	S38	19.09.2011	25.09.2011
S13	28.03.2011	03.04.2011	S39	26.09.2011	02.10.2011
S14	04.04.2011	10.04.2011	S40	03.10.2011	09.10.2011
S15	11.04.2011	17.04.2011	S41	10.10.2011	16.10.2011
S16	18.04.2011	24.04.2011	S42	17.10.2011	23.10.2011
S17	25.04.2011	01.05.2011	S43	24.10.2011	30.10.2011
S18	02.05.2011	08.05.2011	S44	31.10.2011	06.11.2011
S19	09.05.2011	15.05.2011	S45	07.11.2011	13.11.2011
S20	16.05.2011	22.05.2011	S46	14.11.2011	20.11.2011
S21	23.05.2011	29.05.2011	S47	21.11.2011	27.11.2011
S22	30.05.2011	05.06.2011	S48	28.11.2011	04.12.2011
S23	06.06.2011	12.06.2011	S49	05.12.2011	11.12.2011
S24	13.06.2011	19.06.2011	S50	12.12.2011	18.12.2011
S25	20.06.2011	26.06.2011	S51	19.12.2011	25.12.2011
S26	27.06.2011	03.07.2011	S52	26.12.2011	01.01.2012

Tableau 15 : Tableaux de correspondance des dates en fonction du numéro de la semaine

Semaines	Dates	
	Début	Fin (minuit)
S4 à 7	24.01.2011	20.02.2011
S8 à 11	21.02.2011	20.03.2011
S12 à 15	21.03.2011	17.04.2011
S16 à 19	18.04.2011	15.05.2011
S20 à 23	16.05.2011	12.06.2011
S24 à 27	13.06.2011	10.07.2011
S28 à 31	11.07.2011	07.08.2011
S32 à 35	08.08.2011	04.09.2011
S36 à 39	05.09.2011	02.10.2011
S40 à 43	03.10.2011	30.10.2011
S44 à 47	31.10.2011	27.11.2011
S48 à 51	28.11.2011	25.12.2011

Tableau 16 : Tableaux de correspondance des dates en fonction des numéros des semaines

Afin de mettre en évidence la tendance, la Figure 36 présente la même consommation de chauffage que la Figure 35 en regroupant les mesures sur 4 semaines.

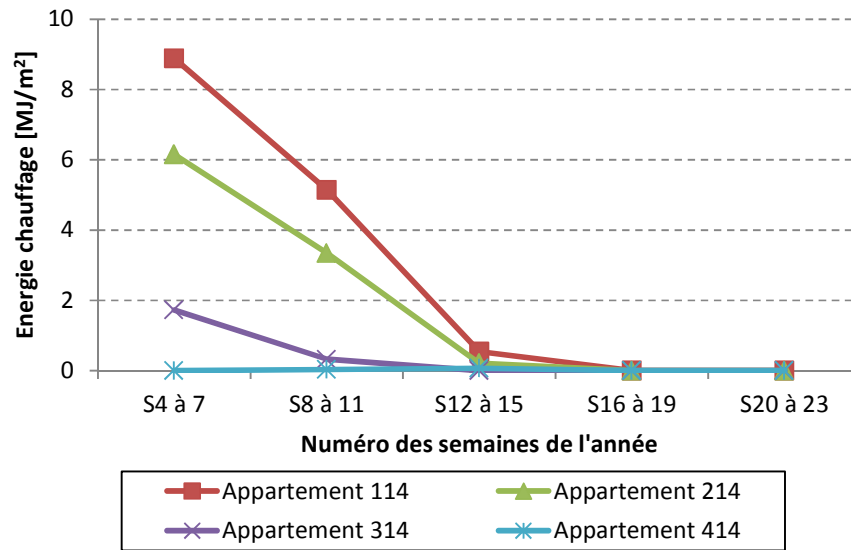


Figure 36 : Consommation pour 4 semaines d'énergie de chauffage pour les 4 appartements-témoins

Il y a une disparité de la consommation qui semble être en fonction des étages. Plus l'appartement est situé en hauteur, moins sa consommation est élevée. L'appartement 114 se trouve au 1<sup>er</sup> étage alors que l'appartement 414 se trouve au 4<sup>ème</sup> étage. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un bâtiment situé au sud génère une ombre portée, qui est d'autant plus importante sur un appartement, que ce dernier se trouve proche du sol, comme le montre la Figure 37.



Figure 37 : Ombre portée des immeubles entourant le bâtiment étudié le 13 avril 2011 à 8h30

Ainsi pour ce type de façade, l'ombre portée (par un autre bâtiment ou par le bâtiment lui-même) a un effet important sur les performances contrairement à une façade "classique" (isolation périphérique, isolation ventilée, etc.). De plus, un bâtiment Minergie-P est plus sensible aux apports d'énergie tels que l'ensoleillement ou les gains internes.

Chaque logement a une surface de référence énergétique corrigée ( $A_E$ ) de  $100.1 \text{ m}^2$ . Cette valeur de surface de référence énergétique prend en compte la surface des couloirs extérieurs aux appartements au prorata de la surface de chacun d'eux. Durant la période de chauffage qu'il a été possible d'étudier (10 semaines : du 24 janvier au 3 avril 2011), les 4 appartements-témoins ont consommé 3308 [MJ]. La valeur du besoin de chaleur (énergie utile) rapportée à cette surface des 4 appartements est de  $8.26 \text{ [MJ/m}^2]$  pour la période de mesures.

Pour extrapoler ce résultat sur l'ensemble de la période de chauffage, une correction en tenant compte du degré-heure a été effectuée.

Pour déterminer la période de chauffage 2010-2011, une analyse du besoin de chaleur en fonction des DH a été réalisée à partir des données récoltées dans les appartements-témoins, dont les résultats sont présentés dans la Figure 38. Les valeurs hebdomadaires en degrés-heures (DH) sont tirées pour Morges sur le site de l'état de Vaud [10] (voir Annexe B). Chaque point sur le graphique représente ainsi une semaine de mesures.

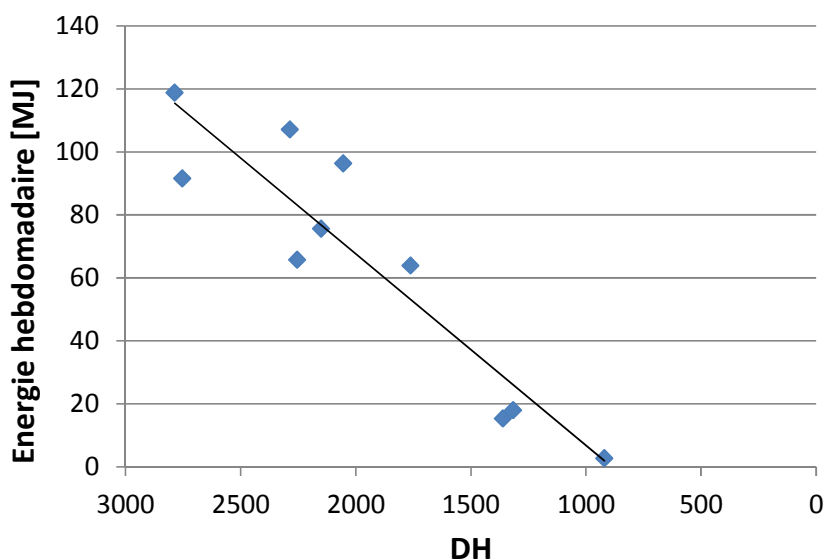


Figure 38 : Moyennes hebdomadaires mesurées pour les appartements-témoins du besoin de chaleur (énergie utile) en fonction des DH

La droite de régression permet d'obtenir la valeur des degrés-heures en-deçà de laquelle il n'y a plus de chauffage dans les appartements. Cette valeur est légèrement inférieure à 900 [DH]. Il est alors possible de déterminer la période de chauffage. Elle s'étale de la semaine 41 (11 octobre 2010) à la semaine 13 (3 avril 2011), soit au total 25 semaines. Sachant que le nombre DH est de 19'642 pour la période de mesures (10 semaines) et que pour la saison de chauffe cette valeur s'élève à 52'433 [DH], le besoin de chaleur du bâtiment ainsi calculé pour l'hiver 2010-2011 est de :

**26 [MJ/m<sup>2</sup>]**

Cette valeur est très faible, surtout qu'il s'agit d'une rénovation. Cela démontre la grande efficacité de l'enveloppe mis en place lors de la rénovation et de l'intérêt du module de GAP-Solution couplé avec le système Varios pour la ventilation avec la récupération de chaleur.



## 10.2 Energie ECS

La Figure 39 montre la consommation hebdomadaire des appartements-témoins durant la période qui va du début de ces mesures (24 janvier 2011) jusqu'à la dernière semaine de mesures prise avant la rédaction du présent rapport (30 octobre 2011).

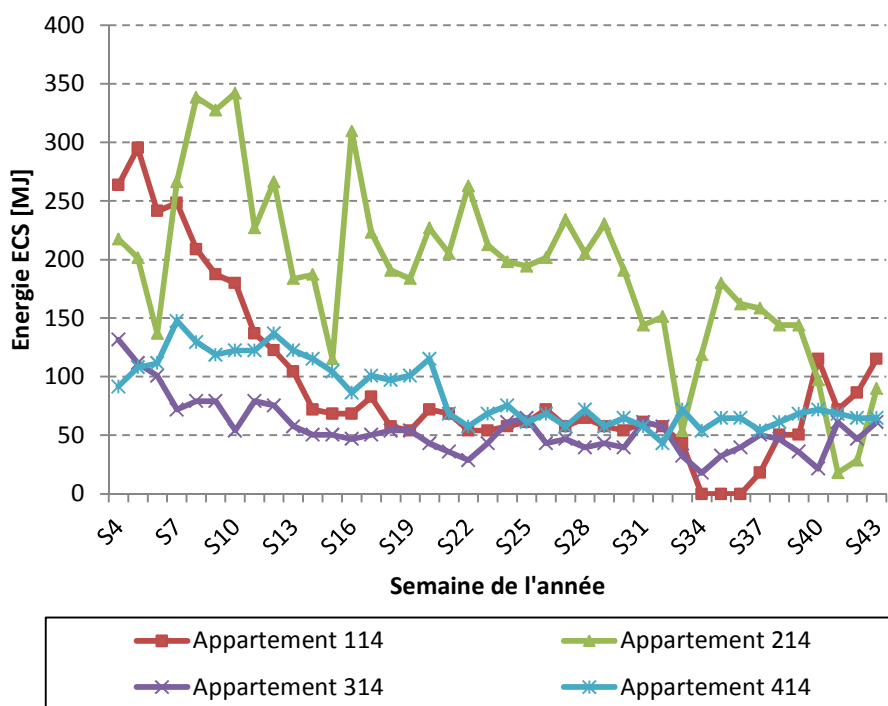


Figure 39 : Evolution de la consommation d'ECS des appartements-témoins

La somme de la consommation d'énergie pour le l'ECS des appartements-témoins durant cette période (40 semaines) est de 15'800 [MJ]. Tous les appartements-témoins étaient alors occupés. En extrapolant ces résultats, cela représente une consommation annuelle de **66.6 [MJ/m²/an]** pour les appartements-témoins. Cette valeur est cohérente avec la norme SIA 380/1 qui donne la valeur de 75 [MJ/m²] pour l'habitat collectif.

Pour connaître la consommation d'ECS de tout le bâtiment, il faut également considérer les autres appartements. Il faut rappeler que ces 55 autres appartements, ne sont équipés que d'un compteur de chaleur. Afin de connaître leurs consommations d'énergie pour l'ECS, les valeurs des compteurs de chaleurs hors période de chauffage (semaines 14 à 40) ont été utilisées pour obtenir une valeur moyenne de consommation durant cette période.

La Figure 40 montre la consommation d'énergie utile mesurée pour l'ECS hors période de chauffage pour les quatre appartements-témoins plus les 55 autres appartements.

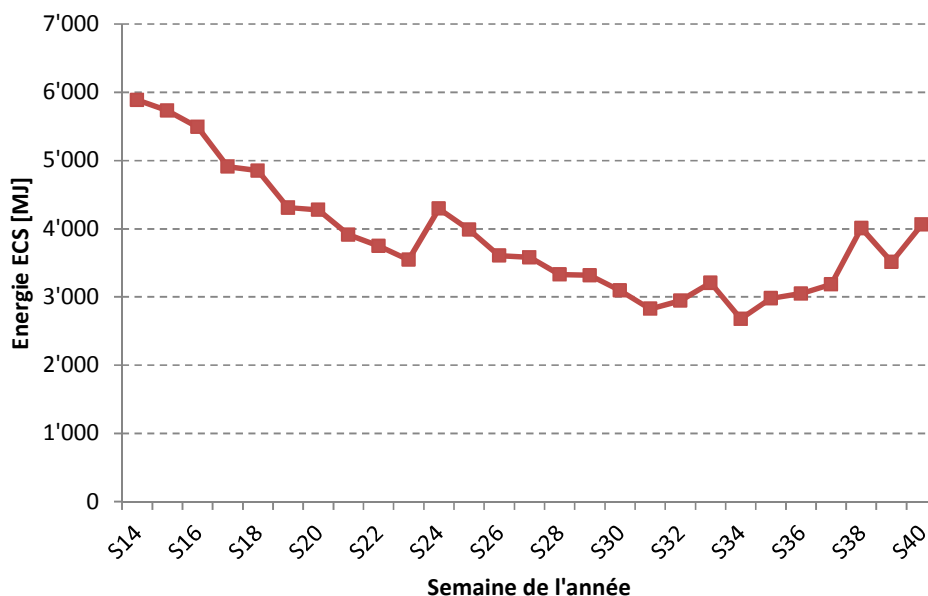


Figure 40 : Energie utile mesurées pour l'ECS dans les 59 appartements durant la période hors chauffage

En prenant les valeurs pour les 59 appartements durant la période du 4 avril au 9 octobre 2011 (de la semaine 14 à la semaine 40), nous avons la consommation uniquement d'ECS. Durant ces 27 semaines hors période de chauffage, la consommation d'ECS est de 104'300 [MJ], soit en extrapolant ces résultats mesurés sur toute une année, la consommation totale d'ECS serait de 201'000 [MJ/an].

Ainsi, la dépense en ECS rapportée à la surface de référence énergétique de l'ensemble des 59 appartements est de **41.5 [MJ/m<sup>2</sup>/an]**.

Cette valeur est inférieure au 75 [MJ/m<sup>2</sup>/an] indiqué dans la norme SIA 380/1. Cela peut s'expliquer par le fait que :

- tous les appartements n'étaient pas occupés durant la campagne de mesures
- il y a au moins un appartement qui est utilisé comme cabinet médical et ainsi consomme peu d'ECS
- le compteur de chaleur par appartement peut influencer le comportement des occupants, en le sensibilisant aux économies d'énergies

Cette valeur de 41.5 [MJ/m<sup>2</sup>/an] est nettement inférieure aux 66.6 [MJ/m<sup>2</sup>/an] pour les 4 appartements-témoins. Ceci met en évidence qu'avec un faible échantillonnage, la consommation d'ECS peut varier fortement comme le montre la Figure 39.

Il est à noter que la consommation d'eau chaude sanitaire varie au cours de l'année, comme le montre la Figure 40. Il y a une baisse de la consommation depuis la fin de la période hivernale jusqu'au début de la remontée en fin de période estivale. En été, la température d'eau froide plus élevée qu'en hiver et les vacances engendrent une diminution de cette consommation d'énergie pour l'ECS.

Ainsi, la consommation annuelle moyenne d'ECS est probablement légèrement plus élevée.

### 10.3 Pertes thermiques de l'installation de distribution

Durant la campagne de mesures, un contrôle des compteurs de chaleur des appartements a été effectué. La somme de ces énergies représente la consommation totale d'énergie utile pour le chauffage et l'ECS. Un compteur de chaleur est également installé sur la conduite générale de chaleur. Ainsi la différence entre ces deux valeurs correspondra aux pertes thermiques dans la distribution de chaleur, comme illustré à la Figure 41.

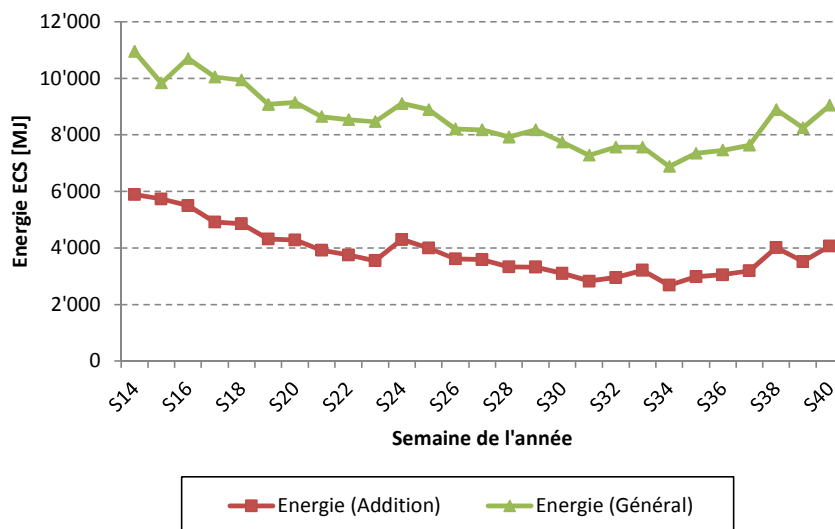


Figure 41 : Energie utile totale pour le chauffage et l'ECS des 59 appartements ("Addition") et le compteur de chaleur général ("Général") avant séparation dans les différentes colonnes de distribution

En comparant les deux courbes de la Figure 41, une différence moyenne de 4'750 [MJ] par semaine apparaît. Cette différence correspond aux pertes thermiques dans le réseau de distribution.

Un calcul théorique de pertes thermiques a été effectué afin de vérifier la cohérence des 4'750 [MJ]. Ce calcul ne tient pas compte des ponts thermiques qui sont liés aux différents organes fixés sur les conduites. Le Tableau 17 présente les hypothèses ainsi que les résultats de ces calculs théoriques afin de contrôler l'ordre de grandeur de ces pertes.

	Colonnes de distribution	Distribution générale
Longueur des conduites estimées à partir des plans	2x 12x15 = 360 [m] Avec : 12 = nbr. de colonnes 15 = hauteur de la colonne	2x 60 = 120 [m]
Diamètre des conduites	35 [mm]	45 [mm]
Epaisseur d'isolation	35 [mm]	38 [mm]
$\lambda_{\text{isolation}}$	0.04 [W/(m·K)]	0.032 [W/(m·K)]
Température moyenne de l'eau	65 [°C]	
Energie pour une semaine	2'100 [MJ]	600 [MJ]
	2'700 [MJ]	

Tableau 17 : Hypothèses et résultats des calculs théoriques pour les pertes thermiques de la distribution de chaleur dans l'immeuble

Cette valeur de 2'700 [MJ] inclut uniquement les pertes thermiques linéiques le long des conduites du bâtiment. Ces calculs ne prennent pas en compte les ponts thermiques liés aux fixations des conduites ou aux différents éléments constituant la distribution comme les vannes d'isolement qui ne sont pas isolées.

Selon l'expérience sur les installations du LESBAT, les pertes thermiques liées aux fixations peuvent représenter une part non négligeable du total des pertes, voire même être du même ordre de grandeur que les pertes thermiques théoriques pour une conduite isolée. Ainsi, les 4'750 [MJ] obtenus à partir des mesures semblent cohérents.

Annuellement, ces pertes totales mesurées représentent 247'000 [MJ]. En considérant la durée de la période de chauffage de 25 semaines en 2010-2011, la part des pertes y participant est de 119'000 [MJ]. Ce qui représente 112 % de la consommation d'énergie utile du bâtiment pour le chauffage. Cette valeur semble importante, mais il faut relativiser, car la consommation de chauffage est très faible dans cet immeuble.

## 10.4 Demande globale d'énergie du bâtiment

L'énergie utile totale pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est égale à la somme des énergies :

- Chauffage des appartements (besoin de chaleur)
- Production d'ECS
- Pertes thermiques de l'installation de distribution

Le Figure 17 présente les valeurs de ces différentes grandeurs.

	Energie annuelle [kWh]	Energie annuelle [MJ/m <sup>2</sup> ]	Fraction [%]
Chauffage de tous les appartements	29'600	22	19.2
Consommation d'ECS pour tous les appartements	55'800	41.5	36.2
Pertes de la distribution imputables au chauffage	33'000	24.6	21.4
Pertes de la distribution imputable pour la consommation d'ECS	35'800	26.7	23.2
<b>Total</b>	<b>154'200</b>	<b>114.8</b>	<b>100</b>

Tableau 18 : Récapitulatif des énergies mises en œuvre

Il est à noter que les pertes thermiques des installations sont proportionnellement plus importantes lorsque le bâtiment consomme peu d'énergie comme c'est le cas ici. Ces pertes (en % du total) resteraient faibles si le bâtiment n'avait pas été rénové.

Selon les valeurs du tableau ci-dessus, la consommation de chauffage des appartements est plus faible que la consommation d'ECS. Toutefois, les pertes thermiques de la distribution participe en hivers au chauffage du bâtiment dans son ensemble et donc indirectement au chauffage des appartements.

Avec une surface de référence énergétique de 4'836 m<sup>2</sup>, l'énergie participant au chauffage qui est la somme de l'énergie utile sortant des radiateurs (besoin de chaleur) plus les déperditions de distribution (qui participent également au chauffage du bâtiment) est donnée par :

$$\frac{\overbrace{29'600}^{\text{Besoin de chaleur}} + \overbrace{33'000}^{\text{Pertes distribution}}}{4'836} = 12.9 \text{ [kWh/m}^2\text{]} = 46.6 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$$

Cette valeur correspond à l'énergie utile nécessaire pour maintenir en température le bâtiment, en tenant compte de la récupération de chaleur sur l'air vicié. Il n'est donc pas possible de comparer cette valeur avec le besoin de chaleur de la SIA 380/1 qui prend en compte un débit d'air fixe normalisé. Ce dernier ne correspond pas au débit thermiquement actif d'une ventilation mécanique contrôlée. Néanmoins, à partir de cette valeur mesurée d'énergie utile, on vérifiera ci-dessous, si la valeur limite Minergie-P est respectée, sachant qu'il faut également inclure la consommation d'ECS et d'électricité pour la ventilation et les circulateurs.

Il faut préciser que lors de ces acquisitions de mesures, le bâtiment était encore en chantier ce qui implique une dépense supplémentaire pour le chauffage liée au renouvellement d'air (ouvertures des portes) et à certains points faibles de l'enveloppe du bâtiment. En effet, la Figure 42 montre certaines finitions de la façade qui restaient à terminer.



Figure 42 : Etat de certaines parties de la façade en novembre 2010

Le même calcul peut être effectué pour la dépense en eau chaude sanitaire.

$$\frac{\overbrace{55'800}^{\text{Besoin d'ECS}}}{4'836} = 11.5 \text{ [kWh/m}^2\text{]} = 41.5 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$$

Cette valeur est inférieure à la valeur limite fixée pour l'ECS par la norme SIA 380/1 (75 [MJ/m<sup>2</sup>/an]).

Avec ces résultats, il est possible de vérifier si ce bâtiment répond à la valeur limite pour une rénovation Minergie-P, en utilisant comme données :

- $Q_{h,eff}$  (mesuré) besoin de chaleur pour le chauffage = 46.6 [MJ/m<sup>2</sup>/an]. Après pondération du rendement de chaudière :  $Q_{h,pondéré} = 49$  [MJ/m<sup>2</sup>/an].
- $Q_{ww}$  (mesuré) besoin de chaleur pour l'ECS = 41.5 [MJ/m<sup>2</sup>/an]. Après pondération du rendement de chaudière :  $Q_{ww,pondéré} = 45.1$  [MJ/m<sup>2</sup>/an].
- $E_{LK,v}$  (mesuré cf. §11.4) énergie électrique pondérée pour la ventilation = 9.4 [MJ/m<sup>2</sup>/an]
- $E_{LK,c}$  (calculé cf. Annexe C) énergie électrique pondérée pour les circulateurs = 15.9 [MJ/m<sup>2</sup>/an]

Avec ces valeurs et pour une chaudière à gaz à condensation, nous obtenons un indice pondéré de dépense d'énergie de 119.4 [MJ/m<sup>2</sup>/an]. Or dans ce bâtiment, c'est un couplage chaleur force (CCF) qui est installé en plus de la chaudière à gaz. Ainsi l'électricité produite par cette dernière peut être déduite de la consommation d'électricité pour la ventilation et les circulateurs. En effet, pour produire  $E_{LK,v} + E_{LK,c}$ , il faudrait que le CCF fonctionne 2'200 [heures]. Or, ce nombre d'heures devrait être facilement dépassé étant donné que pour un CCF, le nombre d'heures de fonctionnement est de l'ordre de 4'000 à 6'000 heures par an voire plus. Nous obtenons ainsi un indice pondéré de dépenses d'énergie de :

$$\text{Valeur Minergie-P} = 119.4 - (9.4 + 15.9) = 94.1 \text{ [MJ/m}^2\text{/an]}$$

Cette valeur est inférieure à la valeur limite Minergie-P (108 [MJ/m<sup>2</sup>/an]). Il faut mentionner, que ce résultat est basé sur des mesures alors que la valeur limite Minergie-P est normalement à comparer avec des valeurs calculées (380/1 + justificatif Minergie-P). Il faut donc prendre cette analyse avec précaution, car elle devrait se faire à partir de valeur calculée ( $Q_h$ ) ou des valeurs par défaut ( $Q_{ww}$ ) basé sur la SIA 380/1.

## 10.5 Comparaison avec la consommation de gaz

Une comparaison entre l'énergie consommée dans le bâtiment pour le chauffage et l'ECS et la consommation de gaz facturée permet de vérifier si les hypothèses prises pour extrapoler les résultats sur l'ensemble de l'année et l'ensemble des appartements sont valables.

Pour établir la comparaison avec la consommation de gaz, il faut additionner les énergies suivantes :

1. demande en chauffage
2. demande en ECS
3. pertes thermiques de la distribution
4. pertes thermiques entre la chaufferie et le compteur de chaleur général installé au 5<sup>ème</sup> étage
5. pertes de combustion par la chaudière
6. pertes thermiques de la cuve tampon

Les 3 premiers points ont déjà été définis dans ce chapitre. Le point 4 est calculé de la même manière que pour le point 3 avec les paramètres présentés au Tableau 19 suivant.

Pertes entre la chaufferie et le compteur de chaleur général	Colonne de distribution générale
Longueur de la conduite estimée sur les plans	2x 21 + 2x 15 = 72 [m] 21m : hauteur de la colonne 15m : longueur horizontale
Diamètre de la conduite	60 [mm]
Epaisseur d'isolation	50 [mm]
$\lambda_{\text{isolation}}$	0.032 [W/(m·K)]
Température moyenne mesurée de l'eau	65 [°C]
Pertes thermiques sur 4 semaines	1'550 [MJ]
Pertes thermiques sur la période de chauffage	<b>10'000 [MJ]</b>

Tableau 19 : Hypothèses et résultats des calculs théoriques pour les pertes thermiques entre la chaufferie et le compteur de chaleur général au 5<sup>ème</sup> étage

Pour le point 5, il y a le rendement de la chaudière à gaz qui intervient. Pour ce type de chaudière à condensation et une température d'utilisation de 70 [°C], le rendement de combustion est d'environ 98% sur le PCI. La norme SIA 380/1 estime le rendement annuel maximum à 95% car il prend en compte les enclenchements et les arrêts. Cette dernière valeur de 95% sera donc prise en compte dans cette étude. Connaissant la consommation de gaz pour la période considérée, il est alors possible de calculer les pertes en MJ. Le Tableau 20 précise les chiffres utilisés.

Pertes de combustion dans la chaudière	Paramètres
Consommation de gaz (énergie finale)	284'700 [MJ]
Rendement chaudière (PCI)	95 [%]
Pertes de production de la chaudière	<b>14'200 [MJ]</b>

Tableau 20 : Détermination des pertes de la chaudière durant la période du 1<sup>er</sup> octobre 2010 au 4 avril 2011

Le Tableau 21 précise les paramètres utilisés pour le calcul des pertes thermique de la cuve tampon et le résultat correspondant.

Pertes thermiques de la cuve	Paramètres cuve
Diamètre cuve	1.5 [m]
Hauteur cuve	2.2 [m]
Epaisseur d'isolation	100 [mm]
$\lambda_{\text{isolation}}$	0.045 [W/(m·K)]
Température moyenne de l'eau	65 [°C]
Energie sur la période de chauffage	<b>3'200 [MJ]</b>

Tableau 21 : Hypothèses et résultats des calculs théoriques pour les pertes thermique de la cuve située dans la chaufferie

Le Tableau 22 résume les énergies à considérer pour faire la comparaison avec le contenu énergétique du gaz consommé.

	Energie durant les 26 semaines de la période considérée [MJ]
1. Demande en chauffage	106'600
2. Demande en ECS	96'100
3. Pertes thermique de la distribution	124'000
4. Pertes thermique conduites chaufferie → compteur général	10'000
5. Pertes de la chaudière	14'200
5. Pertes thermiques de la cuve	3'200
TOTAL	<b>354'100</b>

Tableau 22 : Récapitulatif des énergies mises en œuvre pour la comparaison avec la consommation de gaz

Les 354'100 [MJ] sont à comparer avec les 284'700 [MJ] de gaz consommés par la chaudière. La différence de 20% peut s'expliquer par les hypothèses faites lors de cette étude. En effet, il n'y a pas de mesures à disposition durant une partie de cette période considérée (26 semaines). Il a fallu faire des extrapolations :

- la consommation de chauffage du bâtiment a été calculée à partir de celles des 4 appartements-témoins.
- la durée des mesures pendant la période de chauffe n'étant que partielle (10 semaines de mesures), une extrapolation a également été réalisée sur les 26 semaines de chauffage à partir des degrés-heures pour Morges.
- La consommation d'ECS a été considérée constante durant cette période et égale à la moyenne mesurée sur une autre partie de l'année alors que certains appartements été inoccupés.

Malgré cette différence d'énergie, il est possible de dire que les mesures récoltées sont cohérentes.



## 10.6 Comparaison de la consommation avant et après rénovation

Afin de comparer avec la consommation avant la rénovation, la période 2009-2010 est éliminée car cette dernière correspond au début des travaux ce qui perturberait l'analyse.

En s'aidant des données en degrés-heures des saisons 2007-2008, 2008-2009 et des consommations de gaz durant les mêmes périodes, il est possible de comparer la consommation avant et après la rénovation de l'immeuble. Ces 2 saisons présentent des valeurs DH les plus proches de celles de la saison 2010-2011 (Tableau 23).

Saison	Degrés-heures	Consommation de gaz (énergie finale) [MJ/m <sup>2</sup> /an]
2007-2008	55'840	512
2008-2009	60'540	492
2010-2011	57'414	114

Tableau 23 : Degrés-heures et consommation gaz

Pour le 2<sup>ème</sup> trimestre 2011, il n'y avait pas à disposition la consommation de gaz. Un calcul de cette valeur manquante a donc été réalisé en prenant les mesures de consommation d'énergie durant ce 2<sup>ème</sup> trimestre en incluant les différentes pertes thermiques.

Afin de séparer la consommation d'ECS de celle liée au chauffage, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- La consommation d'énergie utile pour l'ECS est identique pour les saisons étudiées. Pour les saisons 2007-2008 et 2008-2009, les valeurs sont différentes que pour la saison 2010-2011, car l'installation de production de l'ECS a été rénovée.
- Rendement de l'ancienne chaudière : 80% sur l'année, valeur limite inférieure selon la norme SIA 380/1 (car vieille chaudière)

Le Tableau 24 présente les différentes consommations de gaz en fonction de l'utilisation.

Période*	Consommation totale de gaz (sur factures)  [MJ/m <sup>2</sup> /an]	Consommation de gaz liée à l'ECS (production + distribution)  [MJ/m <sup>2</sup> /an]	Consommation de gaz liée au chauffage (production + distribution) [MJ/m <sup>2</sup> /an]
2007-2008 (avant rénovation)	512	90.5 <sup>(1)</sup>	421.5 <sup>(3)</sup>
2008-2009 (avant rénovation)	492	90.5 <sup>(1)</sup>	401.5 <sup>(3)</sup>
2010-2011 (après rénovation)	114	76.2 <sup>(2)</sup>	39.7 <sup>(3)</sup> 53.2 <sup>(4)</sup>

- (1) Cette consommation de gaz est calculée en prenant la même demande en chaleur pour la fourniture d'ECS et pertes de distribution que durant la saison 2010-2011 mais en utilisant un rendement de 80% d'une chaudière à gaz (ancienne chaudière)
- (2) Calculs à partir des mesures récoltées sur le bâtiment en incluant le calcul des pertes thermiques de production (cuve + chaudière en chaufferie) et en utilisant un rendement de 95% (nouvelle chaudière)
- (3) Est égale à la consommation totale moins celle pour l'ECS
- (4) Valeur basée sur les mesures en incluant le calcul des pertes thermiques de production (cuve + chaudière en chaufferie) et en utilisant un rendement de 95% (nouvelle chaudière)

Tableau 24 : Consommation de gaz selon les consommateurs. (\* deux derniers trimestres-deux premiers trimestres)

Il y a une différence de consommation de gaz pour le chauffage pour l'année 2010-2011 selon le mode de calculs (3: calculé) et (4: mesuré). Cette disparité est due à la différence entre la consommation de gaz facturée et les mesures réalisées durant la même période, comme expliqué au chapitre 10.5. Cette différence est importante en valeur relative, mais reste faible en valeur absolue.

En faisant une moyenne des deux saisons qui ont un DH équivalent à la période 2010-2011 mesurée, la baisse de la consommation de chauffage après rénovation est de **87 à 90%** selon la méthode de calculs pour définir la consommation de chauffage (chiffre (3) ou (4)).

De plus, l'hypothèse de la consommation d'ECS identique péjore ce résultat puisqu'avant rénovation le premier étage était principalement des bureaux avec une faible consommation d'eau chaude sanitaire. La part chauffage serait ainsi plus importante que dans le calcul effectué dans cette étude pour les deux saisons 2007-2008 et 2008-2009. Il en résulte que la réduction réelle de la consommation de l'énergie de chauffage devrait être un peu supérieure aux 87 ou 90% précédemment calculés.

## 11 Performances de la ventilation

Le système de ventilation est constitué d'un petit monobloc de ventilation dans chaque appartement. Il est muni d'un échangeur de chaleur afin de récupérer l'énergie sur l'air extrait pour réchauffer l'air neuf extérieur. Ces monoblocs sont alimentés par une même double conduite isolée verticale venant du toit. Grâce à une paroi commune, cette double conduite permet un échange thermique entre l'air extrait des appartements et l'air frais extérieur avant qu'il n'arrive dans les monoblocs.

Il y a donc un premier échange de chaleur dans cette double conduite verticale, puis dans chaque monobloc de ventilation, ce qui engendre un taux de récupération d'énergie élevé. Dans ce chapitre, les points suivants sont étudiés :

- L'efficacité de l'échangeur de chaleur entre la gaine montante et celle descendante
- L'efficacité de l'échangeur de chaleur dans le monobloc
- La qualité de l'air dans les appartements-témoins
- La consommation d'électricité des monoblocs de ventilation

Ces différents points sont présentés ci-dessous.

### 11.1 Echange de chaleur entre la gaine montante et descendante

Le rendement de l'échangeur de chaleur est définie pas la formule ci-dessous :

$$\text{Rendement} = \frac{T_{\text{air neuf réchauffé}} - T_{\text{air neuf froid}}}{T_{\text{air vicié chaud}} - T_{\text{air neuf froid}}}$$

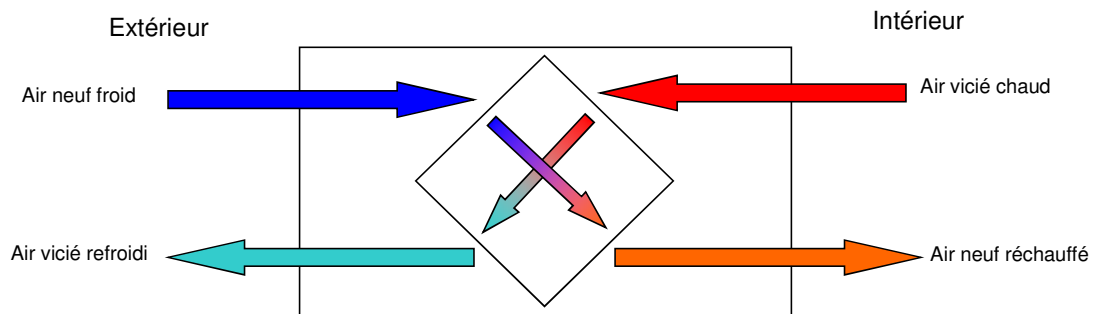


Figure 43 : Principe d'échange de chaleur entre l'air entrant et l'air sortant du système de ventilation

Cette équation du rendement est valide pour des débits d'air entrant et sortant identiques, ce qui est le cas dans ces appartements.

La Figure 44 présente la différence de température entre l'air extérieur et l'air dans la conduite descendante à différents étages (à l'entrée des monoblocs de chaque appartement)

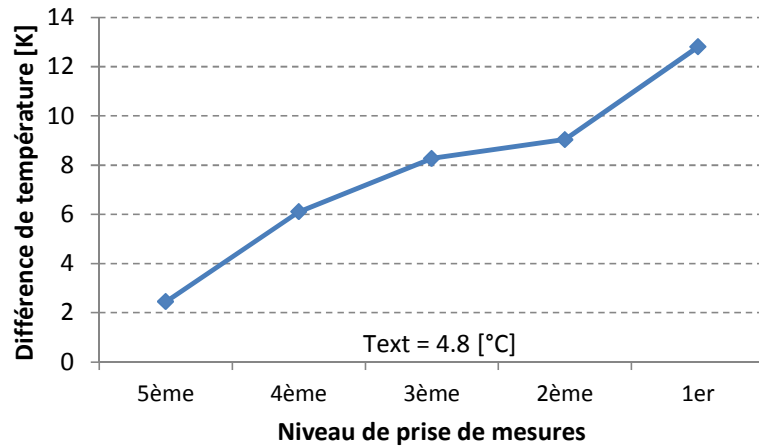


Figure 44 : Différence de température moyenne durant 3 jours entre l'air extérieur et l'air dans la conduite descendante à différents étages

Ces résultats proviennent de mesures réalisées entre le 28 février et le 2 mars 2011. Ces valeurs ont été obtenues avec un débit d'air en sortie de gaine de 65 [m<sup>3</sup>/h] ce qui correspond à une vitesse dans les conduites d'environ 0.5 [m/s].

Le Tableau 25 présente le calcul du rendement de cet échange de chaleur selon l'étage pour une température extérieure moyenne durant cette période de 4.8 [°C].

Etage	Température air neuf réchauffé (entrant dans le monobloc) [°C]	Température air vicié (sortant du monobloc) [°C]	Rendement de l'échange thermique [%]
1 <sup>er</sup>	17.3	20.3	80
2 <sup>ème</sup>	13.5	17.6	68
3 <sup>ème</sup>	12.6	17.5	61
4 <sup>ème</sup>	10.4	15.9	49

Tableau 25 : Rendement de l'échange thermique entre la conduite descendante et montante

Ce concept de récupération d'énergie entre les conduites d'air vicié et de l'air frais est donc intéressant.

## 11.2 Echangeur de chaleur interne au monobloc de ventilation

Le rendement de l'échangeur de chaleur du monobloc de ventilation est définie de la même manière que pour celle de la gaine montante et descendante, mais appliqué aux flux d'air traversant le monobloc, i.e. donné par

$$Rendement = \frac{T_{air\ neuf\ réchauffé} - T_{air\ neuf\ froid}}{T_{air\ vicié\ chaud} - T_{air\ neuf\ froid}}$$

La Figure 45 illustre les valeurs obtenues du rendement de récupération de chaleur par monobloc de ventilation en fonction de la semaine de l'année.

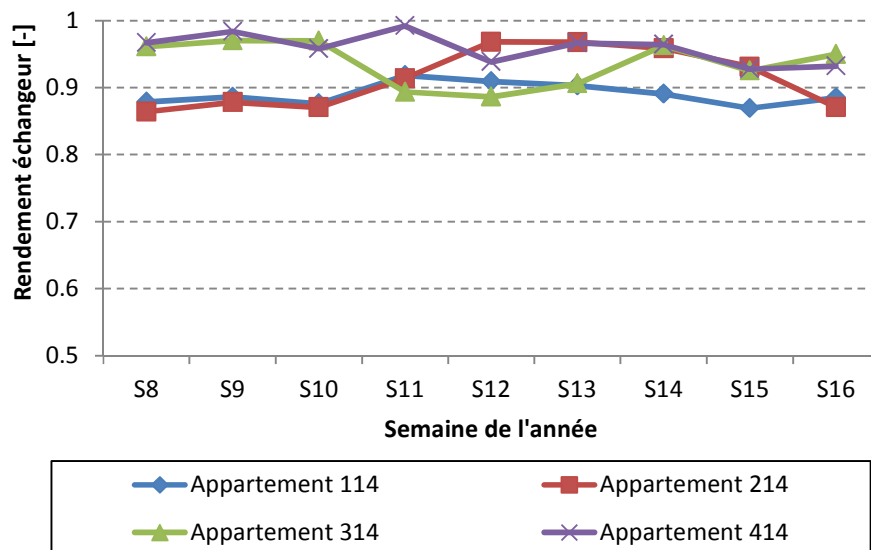


Figure 45 : Rendement de récupération de chaleur des échangeurs des monoblocs de ventilation

La valeur moyenne du rendement de la récupération de chaleur pour les appartements-témoins est de 92 [%] avec une incertitude en hiver de  $\pm 8$  [%] liée à la précision des sondes de température (0.4 [K]).

Ce rendement de récupération d'énergie est élevé car les débits d'air sont faibles, entre 15 et 25 [m<sup>3</sup>/h] et la chaleur dégagée par le ventilateur d'air fourni (air neuf) est également récupérée.

La Figure 46 présente le débit d'air moyen en fonction des vitesses des ventilateurs.

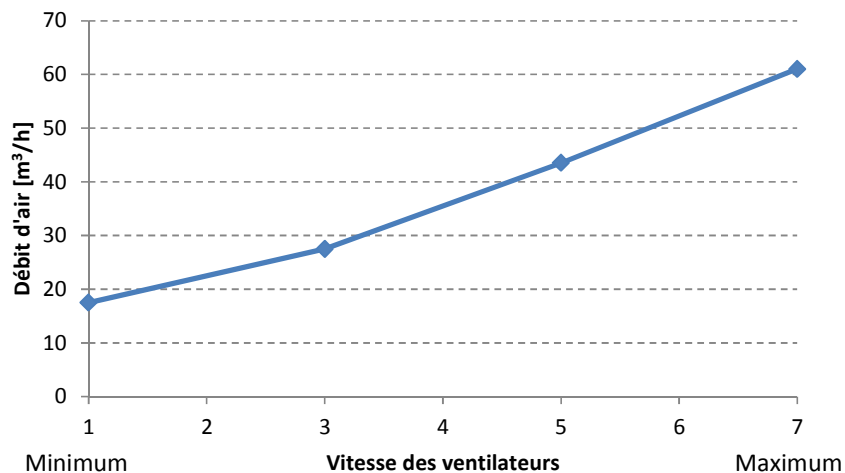


Figure 46 : Débit d'air en fonction de la vitesse des ventilateurs des monoblocs

Comme 90% des locataires des 59 appartements utilisent des vitesses inférieures ou égales à 3, les débits d'air dans l'ensemble du bâtiment sont globalement faibles.

La récupération de chaleur de l'échangeur du monobloc de ventilation additionnée à la récupération dans la gaine de distribution centrale permettent une récupération de chaleur totale de l'air extrait supérieure à 90% en moyenne sur l'année, ce qui est très bon.

Avec ces débits d'air très faibles, il semble que les échangeurs des monoblocs de ventilation soient suffisamment efficaces pour récupérer l'énergie. Cependant, ce concept de récupération de chaleur dans les gaines d'amené d'air serait peut-être plus intéressant pour des débits d'air plus élevés.

## 11.3 Qualité de l'air dans les appartements

Les différentes pièces des 4 appartements-témoins sont munies de sondes pour mesurer les variations de la concentration de CO<sub>2</sub> et des COV au cours du temps.

### 11.3.1 Mesures du CO<sub>2</sub>

Le Tableau 26 indique les niveaux de qualité de l'air en fonction de la concentration de CO<sub>2</sub> selon la norme SIA 382/1 [11].

Qualité de l'air	Concentration de CO <sub>2</sub> dans les locaux [ppm]
Excellente	<950
Moyenne	>950 et <1'350
Basse	>1'350

Tableau 26 : Qualité de l'air selon la concentration en CO<sub>2</sub> [11]

Selon le commentaire de l'article 16 "Climat des locaux" de la loi du travail du canton de Vaud (OLT3), l'air ambiant est considéré comme de qualité lorsque la concentration globale de CO<sub>2</sub> n'excède pas 1'000 ppm durant toute la durée d'utilisation des locaux que ce soit pour le travail ou pour l'habitat [12]. Cette concentration de 950 ppm demande selon la norme SIA 382/1 un débit d'air par personne supérieur à 36 [m<sup>3</sup>/h]. Pour atteindre les 1'350 ppm, il est possible de diminuer le débit d'air par personne jusqu'à 22 [m<sup>3</sup>/h].

La Figure 47 montre les concentrations moyennes de CO<sub>2</sub> mesurés sur l'air extrait dans les appartements-témoins durant la période de mesures avec des débits d'air par appartement entre 15 et 25 [m<sup>3</sup>/h] (sonde de CO<sub>2</sub> dans le monobloc de ventilation).

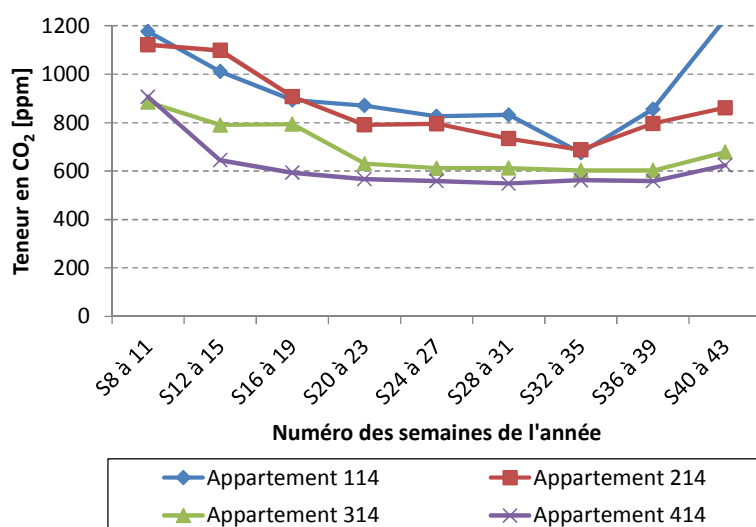


Figure 47 : Teneur moyenne en CO<sub>2</sub> dans les appartements

En hiver, l'ouverture des fenêtres étant moindre, la teneur moyenne de CO<sub>2</sub> est plus élevée qu'en été. La teneur en hiver peut être qualifiée de médiocre, voire basse, alors qu'en été elle est de moyenne à médiocre. Il n'y a pas de différence significative entre les appartements avec un débit de 15 [m<sup>3</sup>/h] et ceux avec 25 [m<sup>3</sup>/h].

En regardant l'évolution de la concentration sur une journée à la Figure 48, cette teneur en CO<sub>2</sub> grimpe à plus de 1'700 [ppm] dans les chambres durant la nuit alors que le reste de la journée la concentration de CO<sub>2</sub> reste basse.

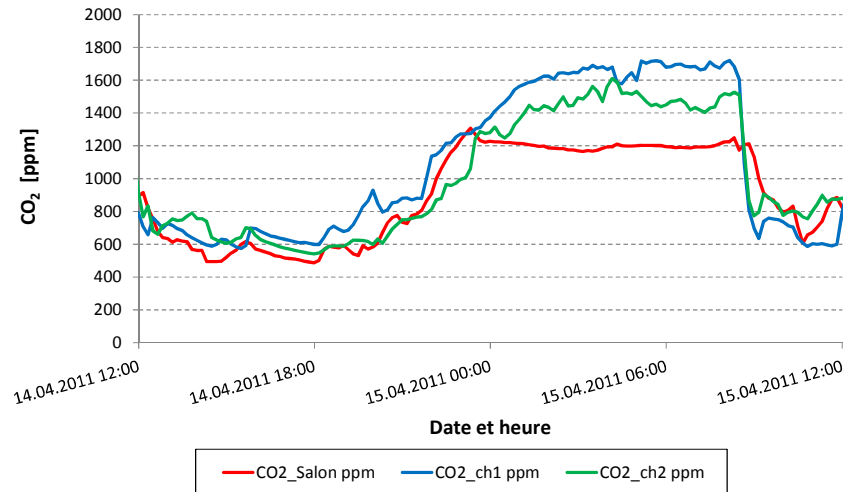


Figure 48 : Concentration en CO<sub>2</sub> durant 1 journée type dans différentes pièces dans un des appartements-témoins

Dans les pièces occupées par 2 personnes, l'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> dépasse parfois 1'700 [ppm], comme le montre la Figure 48. Dans ce cas, la qualité de l'air est basse.

Toutefois, les occupants ne semblent pas ressentir une qualité de l'air insuffisante, puisque dans le cas contraire, ils ont la possibilité d'agir directement sur la vitesse des ventilateurs pour diminuer cette teneur en CO<sub>2</sub>.

D'après les experts en ventilation, cette valeur de CO<sub>2</sub> est faible au vu du faible débit d'air et ils émettent l'hypothèse que les fenêtres sont ouvertes. Malheureusement, il n'y a pas d'information sur l'ouverture de ces fenêtres durant cette période. Il faut signaler que les mesures de CO<sub>2</sub> dans les différentes pièces n'ont été valides qu'à partir d'avril 2011. Les prochaines mesures pendant l'hiver 2011-2012 permettront d'observer cette concentration de CO<sub>2</sub> lors de basses températures, soit lorsque l'ouverture des fenêtres est peu probable.



### 11.3.2 Mesures des COV

Les COV proviennent entre autres des peintures, colles et vernis. Les produits d'entretien, aérosol et certains meubles en bois aggloméré peuvent être des sources de COV. De plus, il existe différents types de COV, comme les formaldéhydes qui sont traités de manière différente par rapport aux autres COV. Le but ici est d'apprécier la concentration générale des COV.

Il n'existe actuellement pas de norme régissant la concentration de COV dans les bâtiments d'habitation. Mais selon l'Institut de santé du Travail du Canton de Vaud, si la concentration de COV est faible, par rapport au  $\text{CO}_2$ , il n'y a en général pas lieu de s'inquiéter.

La Figure 49 illustre les concentrations de  $\text{CO}_2$  en comparaison de celles du COV.

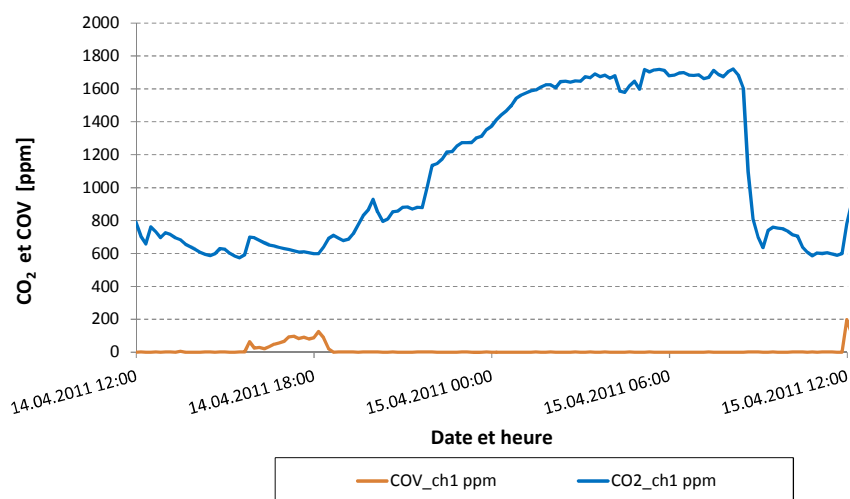


Figure 49 : Concentration en  $\text{CO}_2$  et COV durant 1 journée type dans une des chambres d'un appartement témoin

La teneur en COV est presque toujours nulle. Par moment, il y a des émanations comme le montre la Figure 49, pour la fin de journée du 14.4.2011. Cette émission peut avoir différentes origines, comme une bougie parfumée. Ces concentrations sont donc très faibles en comparaison du  $\text{CO}_2$  et ainsi il semble que les COV ne présentent pas de problème majeur dans ce bâtiment.

### 11.3.3 Mesures de l'humidité relative

L'humidité relative intervient dans le confort thermique des occupants et dans la durabilité du bâtiment en évitant la condensation sur des surfaces froides. La Figure 50 montre le taux d'humidité relative durant une semaine dans un appartement occupé par 4 personnes.

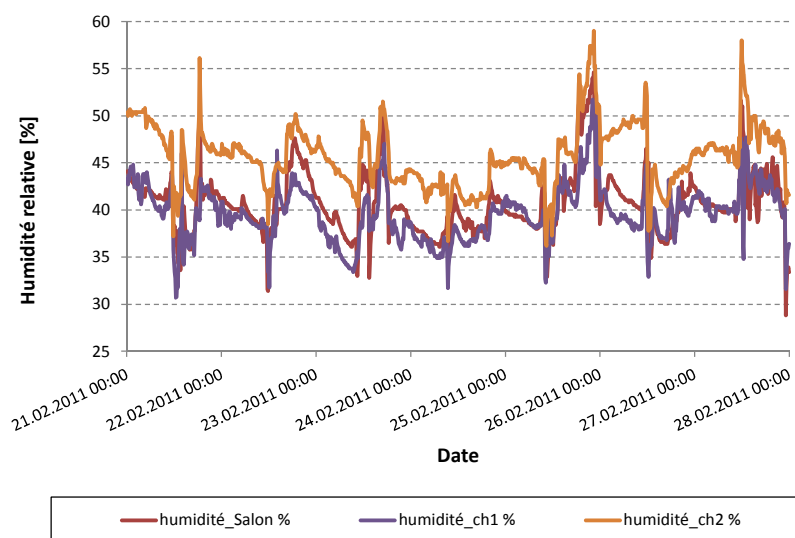


Figure 50 : Taux d'humidité pour différentes pièces dans l'appartement 214

Hormis quelques pics, l'humidité relative reste entre 35 et 50% durant la période de chauffe. Ce taux est compris entre 35 et 45% pour le même type d'appartement occupé cette fois-ci par seulement 2 personnes.

La ventilation ainsi utilisée semble satisfaire au maintien d'une humidité relative correspondant aux critères de confort et de santé du bâtiment. Ceci est dû au faible débit d'air dans les appartements. La norme SIA 382/1 (paragraphe 2.2.2.7) indique qu'il est possible en hiver de diminuer le débit de la ventilation afin de garantir un taux d'humidité de 50%. Le débit d'air peut ainsi être de 15 [m<sup>3</sup>/h] par personne.

## 11.4 Consommation électrique des monoblocs de ventilation

Afin de contrôler l'avantage de la récupération de chaleur des monoblocs de ventilation, il faut comparer l'énergie électrique consommée par les ventilateurs par rapport à l'énergie thermique économisée sur l'air ventilé.

La Figure 51 montre pour les quatre appartements-témoins, les mesures de la consommation électrique liée au fonctionnement des monoblocs de ventilation.

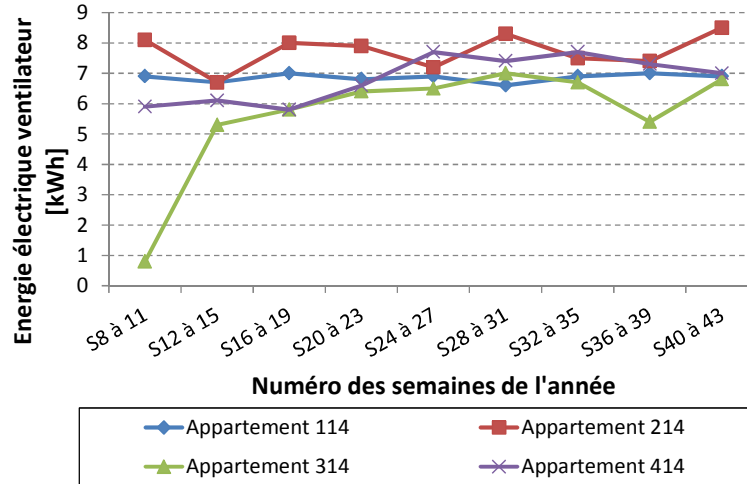


Figure 51 : Consommation électrique des ventilateurs des monoblocs

La Figure 51 montre que la valeur moyenne est comprise entre 6 et 8 [kWh] pour 4 semaines soit une puissance moyenne de 9 à 12 [W]. La valeur faible de la consommation électrique pour l'appartement 314 au début des mesures est liée à l'arrêt de la ventilation.

Avec un débit moyen de 15 [m³/h] et une différence de température de 17 [K] (22-5) entre l'air extérieur et l'air intérieur, la puissance thermique récupérée s'élève à :

$$P_{\text{Récupérée}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot \text{Rendement}_{\text{Echangeur}}$$

Avec :

$\dot{m}$  : débit d'air [kg/s]

$C_p$  : chaleur spécifique massique de l'air sec [J/kg/K]

$\Delta T$  : différence de température entre l'air extérieur et l'air intérieur des appartements [K]

$\text{Rendement}_{\text{Echangeur}}$  : Rendement de récupération d'énergie [%]

Soit :

$$P_{\text{Récupérée}} = \frac{15 \times 1.293}{3600} \times 1005 \times (22 - 5) \times 0.92 = 85 \text{ [W]}$$

Il y a un facteur 7 à 9 entre la puissance électrique des ventilateurs et celle récupérée sur l'air. L'intérêt de la ventilation avec la récupération de chaleur est indéniable du point de vue énergétique. Par m² de surface de référence énergétique, la consommation annuelle d'électricité est de 1.3 [kWh/m²/an] pour la ventilation.

Selon la norme SIA 382/1, ce type de monobloc devrait avoir une puissance spécifique de 0.28 [W/m³/h] en valeur limite et de 0.166 [W/m³/h] comme valeur cible (classe SP1). Ce type de système atteint 0.5 à 0.6 [W/m³/h] ce qui est largement supérieur aux valeurs demandées par la norme. Ceci est lié en partie aux faibles débits utilisés qui ne correspondent pas au débit nominal du monobloc de ventilation.

## 12 Sondage d'opinions

Afin d'avoir un avis des locataires sur la perception générale de ce bâtiment, un sondage d'opinion a été réalisé. Les questions posées concernaient les domaines suivants :

- Confort thermique été/hiver dans les différentes pièces
- Isolation acoustique contre les bruits extérieurs/intérieurs
- Nuisance sonore de la ventilation dans les différentes pièces
- Confort de l'ECS
- Utilisation de la régulation de la ventilation
- Gestion de l'ouverture des fenêtres été/hiver

Pour plus de détails sur les questions posées, le formulaire utilisé est en Annexe D. Sur les 59 appartements, 34 réponses ont été retournées ce qui représente 57% des appartements. A quelques exceptions près, le questionnaire a été rempli complètement ce qui en facilite l'analyse.

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques avec pour chaque question le pourcentage des avis rapporté au nombre de réponses récoltées.

Pour la représentation des résultats, les avis pour les chambres 2 à 4, selon les appartements, ont été regroupées car elles représentent des similitudes de réponses contrairement à la chambre 1 qui est contigüe à la salle de bain.

### 12.1 Confort thermique

Pour le ressenti thermique, la même gradation a été utilisée que pour des mesures du confort thermique présenté au chapitre 9, et défini dans la norme ISO 7730 (SIA 180)

La Figure 52 présente la distribution des résultats, moyenné sur 34 appartements, pour la période estivale selon la pièce de l'appartement.

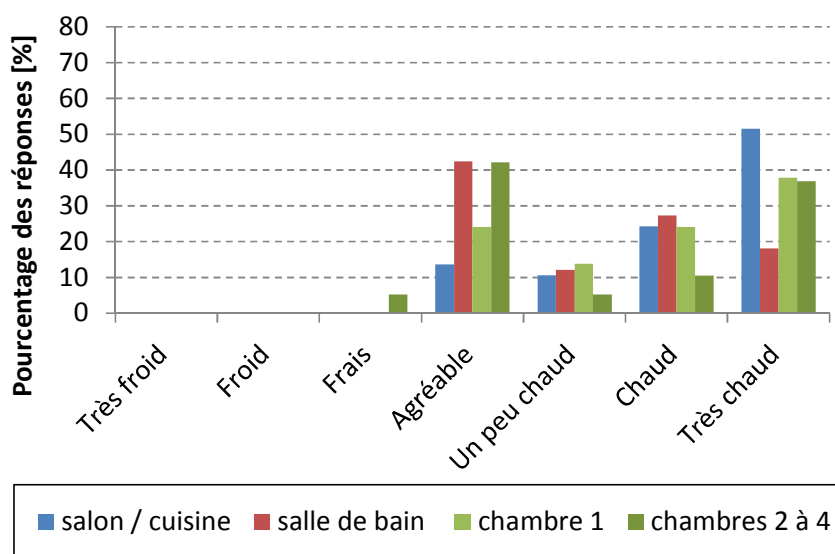


Figure 52 : Confort thermique des occupants durant la période estivale

Globalement, le ressenti est plutôt chaud. Cette sensation semble principalement liée à la température extérieure. En effet, même dans les appartements côté nord, le ressenti est "Chaud". Sur le nombre d'échantillon, il est donc difficile de classer les appartements selon l'orientation nord/sud. En reprenant le principe de calcul du confort thermique du chapitre 9, le calcul du PPD pondéré pour le salon est de 73% d'insatisfaits et de 55% en moyenne pour les chambres.

Comme pour la figure précédente, la Figure 53, ci-dessous, présente les résultats selon les pièces de l'appartement mais pour la période hivernale.

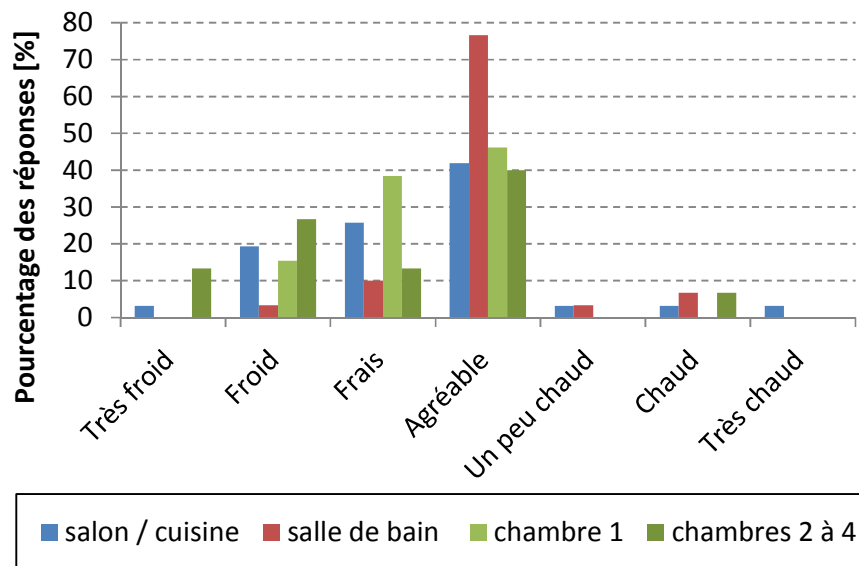


Figure 53 : Ressenti thermique durant la période hivernale

De façon générale, le confort est plutôt agréable à frais, bien que la perception "agréable" soit majoritaire. Comme pour la période estivale, il est difficile de classer les appartements selon l'orientation nord/sud. Seule une partie des appartements au 5<sup>ème</sup> étage semble présenter une sensation de froid voire très froid dans certaines pièces.

Pour cette période hivernale, le calcul du PPD pondéré pour le salon et les chambres donne 33% d'insatisfaits.

Sur les 4 appartements-témoins, il y a 2 questionnaires en retour. Ainsi, il est possible de faire une comparaison entre les températures mesurées dans les appartements et le ressenti des locataires. Pour garder l'anonymat, les 2 appartements examinés sont rebaptisés A et B. La Figure 54 présente la température ambiante au salon pour une partie de la période hivernale entre février et mars avec une température moyenne extérieure de 7.7 [°C].

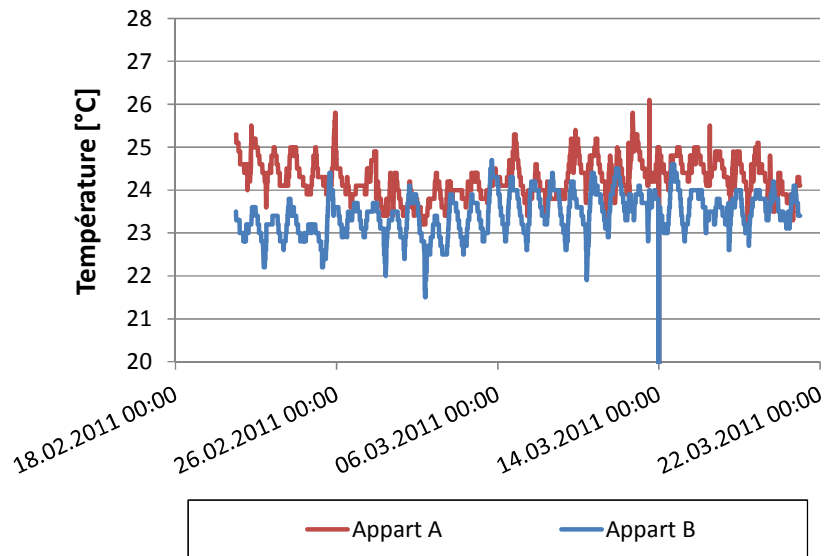


Figure 54 : Température au salon en février-mars 2011 dans 2 appartements

La température dans l'appartement A, occupé par un couple de personnes jeunes, est plus élevée de 0.8 [K] par rapport à l'appartement B, qui est occupé par un couple de personnes à la retraite. Le ressenti des occupants en A est "Froid" alors que celui en B est "Agréable". Cette différence entre l'avis et les mesures est également présente pour les chambres. Il est à noter que l'humidité relative est très proche pour les 2 appartements et qu'elle n'a donc pas d'effet sur cette différence du ressenti thermique.

Cette analyse montre que la notion de confort est très relative et qu'une enquête de satisfaction ne donne pas forcément les mêmes résultats que les mesures effectuées selon les normes ISO qui avaient montrés un confort satisfaisant dans ces appartements (cf. § 9).

## 12.2 Confort acoustique

La rénovation de l'immeuble a permis d'installer de nouvelles fenêtres. Les couloirs du bâtiment ont également été munis de matériaux absorbants les bruits. La Figure 55 montre la répartition de la perception des bruits provenant de l'extérieur de l'appartement.

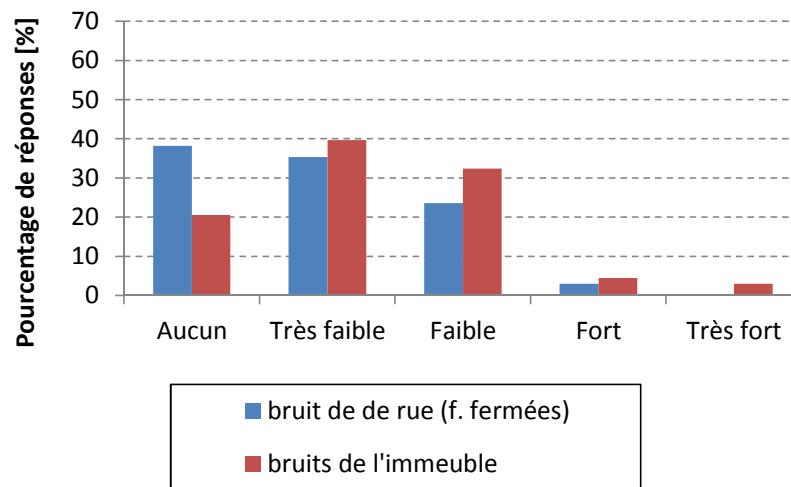


Figure 55 : Perception des bruits extérieurs à l'appartement

Dans la majorité des cas, les bruits extérieurs sont ressentis comme inexistant à faible. De plus, dans un environnement particulièrement silencieux que sont ces appartements, le moindre bruit est perçu de façon plus forte.

Une seconde question concernant le confort acoustique a été posée aux occupants. La Figure 56 donne la distribution de ressenti par rapport au bruit de la VMC dans les appartements.

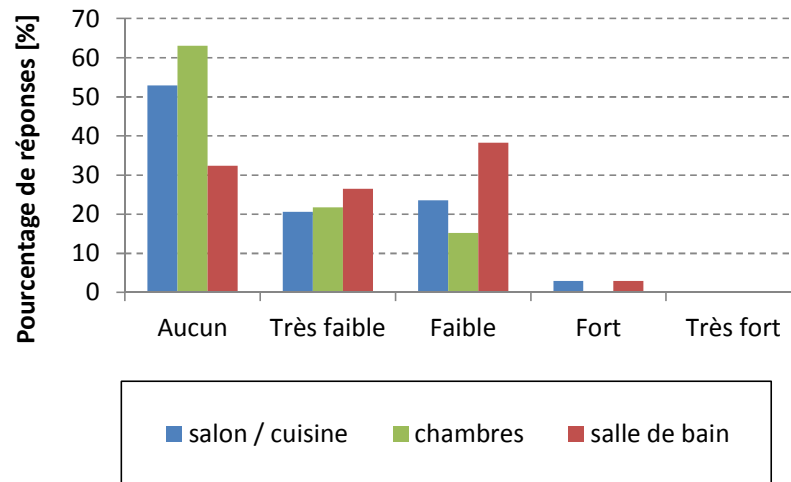


Figure 56 : Perception des bruits de la ventilation dans l'appartement

Comme pour les bruits extérieurs, la perception est entre "aucun" et "faible" avec une majorité pour "aucun". Cette perception du bruit dépend également des personnes, puisque dans deux des 4 appartements-témoins le bruit est considéré comme "aucun" pour certains à "faible" pour d'autre, alors que les mesures réalisées ont montré un niveau sonore inférieur à 16 dB(A) à la vitesse sélectionnée du ventilateur (voir Figure 25).

### 12.3 Confort pour l'ECS

L'eau chaude sanitaire est fournie par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur à plaques qui soutire l'énergie de chauffage au circuit de chauffage. La préparation de l'eau se fait de manière instantanée.

Ce sondage permet de vérifier le confort pour l'obtention de l'ECS, avec une question concernant le niveau de la température atteinte et une seconde concernant le temps d'obtention de cette dernière. La Figure 57 donne les résultats obtenus pour ces deux questions.

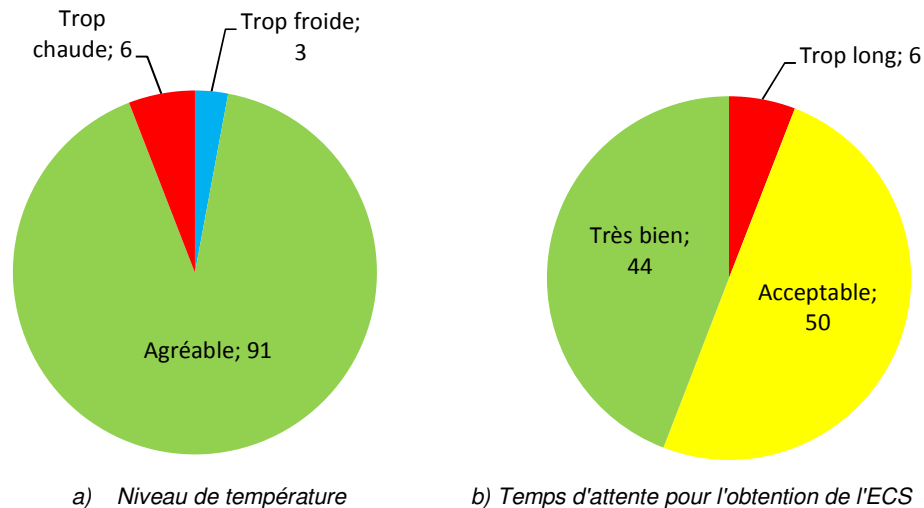


Figure 57 : Perception pour l'obtention de l'ECS

Le résultat de gauche de la Figure 57, montre que le niveau de satisfaction concernant la température de l'ECS fournie avec l'échangeur à plaque est agréable pour plus de 90% des occupants.

Concernant la rapidité d'obtention de l'ECS, 44% des occupants sont très satisfaits et la moitié trouve que c'est acceptable. Ainsi plus de 90% des occupants trouvent que la rapidité d'obtention de l'ECS leur convient. Il reste une petite dizaine de pourcent qui aimeraient avoir une ECS au robinet plus rapidement.

Dans l'ensemble plus de 90% des personnes semblent satisfaites du système de préparation de l'eau chaude sanitaire fourni par le système Varios. Ce résultat est très positif, étant donné la simplicité de la mise en œuvre du système, qui ne requiert qu'un seul circuit d'eau chaude dans les appartements (pour le chauffage et l'ECS).



## 12.4 Utilisation de la ventilation

Les locataires ont la possibilité de modifier en tout temps la vitesse des ventilateurs entre 7 niveaux, 7 étant la vitesse maximale. Afin de connaître la vitesse à laquelle les ventilateurs fonctionnent, une question a été posée aux occupants concernant leur choix de réglage le plus souvent utilisé. La Figure 58 présente la vitesse fixée le plus fréquemment par les occupants.

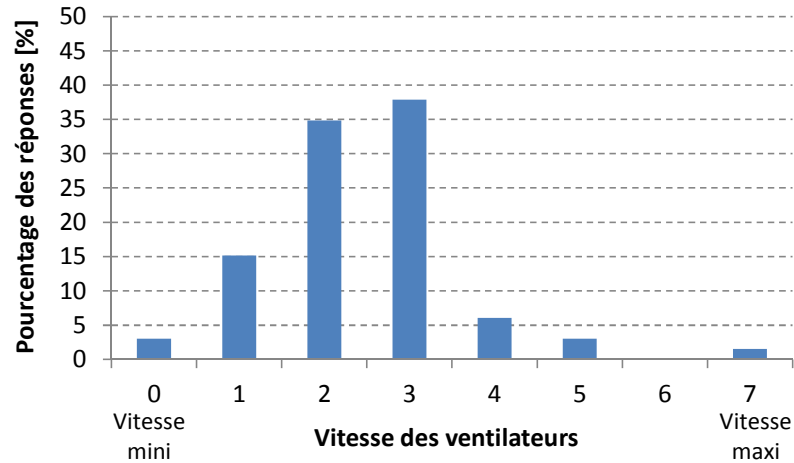


Figure 58 : Utilisation la plus fréquente de la vitesse des ventilateurs par les occupants

Dans l'ensemble, les occupants n'utilisent pas la ventilation à des vitesses élevées, ce qui semble être suffisant pour assurer leur confort comme présenté au chapitre 11.

Une seconde question a été posée concernant le taux de modification de la vitesse du ventilateur par les occupants. La fréquence de cette modification du réglage du ventilateur par les occupants est présentée à la Figure 59.

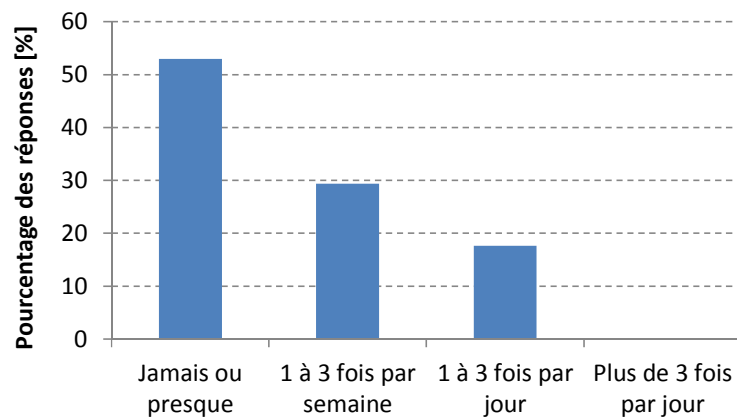


Figure 59 : Fréquence de la modification de la vitesse des ventilateurs par les occupants

Il y a 53% des gens qui ne touche jamais ou presque la vitesse des ventilateurs alors que 47% la modifie 1 à 3 fois par semaine voire plus. Certaines personnes augmentent momentanément cette vitesse lors de préparation de repas dégageant de fortes odeurs comme par exemple la fondue et semblent être satisfaites du résultat.

## 12.5 Ouverture des fenêtres

Une remarque revient souvent lors de discussion au sujet des bâtiments Minergie ou Minergie-P, mentionnant qu'il n'est pas possible d'ouvrir les fenêtres dans ce type de bâtiment. Les figures 60 et 61 présentent les habitudes de vie à ce sujet pour respectivement pour les périodes estivale et hivernale.

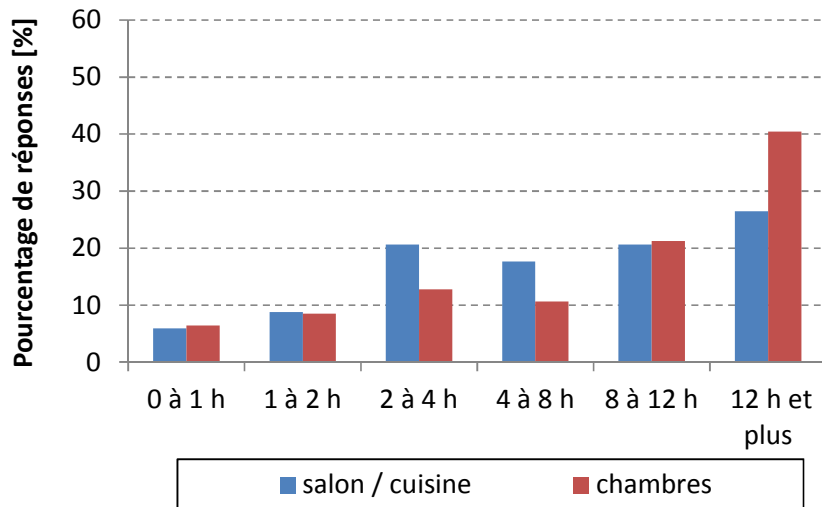


Figure 60 : Temps moyen d'ouverture des fenêtres en été

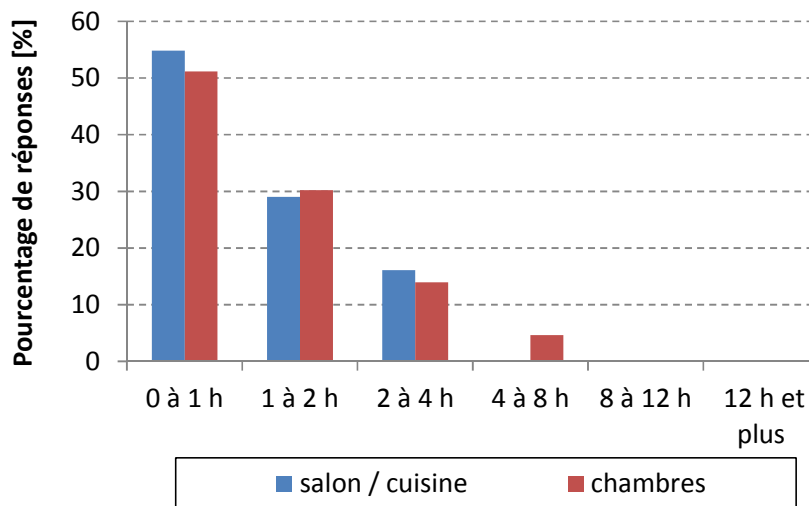


Figure 61 : Temps moyen d'ouverture des fenêtres en hiver

En été, le temps d'ouverture est bien sûr élevé, alors qu'en hiver ce temps d'ouverture est limité mais toujours présent. Une ouverture en grand durant quelques minutes par jour est suffisante surtout avec une ventilation mécanique.

## 12.6 Impression générale

Deux dernières questions ont été posées aux occupants des appartements concernant l'impression générale de l'appartement :

- Trouvez-vous l'appartement globalement agréable?
- Recommanderiez-vous ce type d'appartement?

La Figure 62 présente les résultats obtenus à ces deux questions.

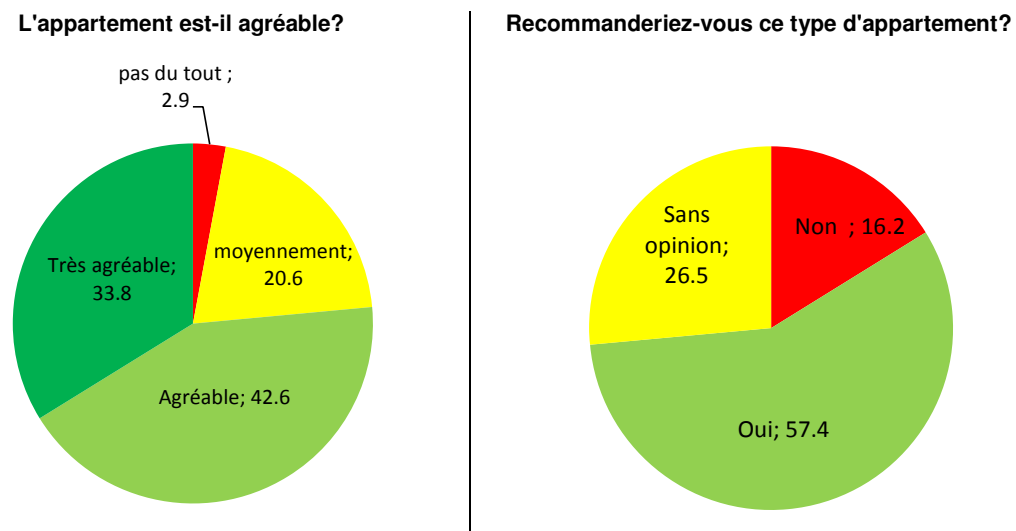


Figure 62 : Impressions générales des appartements

On remarque, que plus de  $\frac{3}{4}$  des occupants trouvent leur appartement agréable à très agréable et que seulement 3% ne trouvent pas leur appartement agréable. Ces 3% sont liés au problème de surchauffe en été.

A la fin de l'enquête, il a été donné la possibilité aux personnes de faire des commentaires complémentaires. Sur les 34 formulaires dépouillés, 20 possédaient une ou plusieurs remarques, soit un total de 26 remarques.

Comme le montre le Tableau 27, seize remarques font référence à des sujets indépendants aux problématiques analysées dans la présente étude, comme des défauts (porte, fenêtre, robinetterie) ou accès à l'immeuble. Concernant les dix remarques restantes, elles concernent toutes le confort intérieur.

Remarque	Nombre de remarque(s)
Divers n'intervenant pas dans le confort comme par exemple la défectuosité d'une robinetterie	16
Trop chaud en été	5
Bruit de pas des voisins du dessus	2
Bruit de conduites de 22h30 à 23h30	1
Manque de lumière	1
Bruit ventilation extérieure (sur un toit)	1

Tableau 27 : Remarques diverses

Sur les 59 locataires, 25 n'ont pas répondu au questionnaire. On peut s'imaginer que dans le cas d'un inconfort avéré, ces personnes se seraient manifestées, ce qui n'a pas été le cas.

Dans l'ensemble, les locataires sont majoritairement satisfaits du confort de leur appartement. Néanmoins, il ressort du sondage que durant la période estivale, les occupants ressentent une surchauffe, qui avait été constatée par les mesures du confort, mais pas avec autant de personnes insatisfaites. Etant donné l'échantillonnage, nous ne pouvons pas remarquer de différence de confort entre les personnes dont les appartements sont orientés au nord ou au sud.

Par contre, aucun occupant n'a mentionné la problématique de l'inconfort en période hivernale dans les remarques générales, alors que les occupants ressentent en moyenne une sensation de froid (ce qui n'est pas corroboré par la mesure du confort cf. §9).

## **12.7 Synthèse du sondage d'opinion**

Dans son ensemble le sondage d'opinion montre que ce bâtiment a une image positive auprès des locataires et que le confort dans les différents domaines analysés est généralement bon. Il n'y a pas de différence notable selon l'orientation des appartements nord/sud, ni en fonction de l'étage, si ce n'est pour le dernier étage où des différences apparaissent en hiver pour le confort thermique. Il est à rappeler que les parois de ce dernier étage ne sont pas constituées d'éléments préfabriqués GAP-Solution. .

L'acceptation générale des occupants par rapport aux points analysés dans ce projet est supérieure à 75%. Il est à signaler que parmi les personnes moins satisfaites, les critiques formulées concernaient certaines fonctionnalités comme les accès (personne handicapée) ou des défauts de certains éléments. Ces problèmes ne concernent pas directement les thèmes étudiés dans ce sondage (acoustique, confort thermique, etc.) et aura probablement influencé l'analyse globale de ces personnes.

## 13 Conclusion

Ce projet avait pour but de mesurer les performances (chauffage, eau chaude, ventilation et confort) d'un bâtiment d'habitation collectif de 59 appartements situé à Morges et qui a été rénové afin de réduire très fortement la consommation d'énergie de chauffage (facteur 8 à 10). Afin d'arriver à un tel objectif, la rénovation a consisté principalement en la mise en œuvre de deux systèmes particuliers :

- Une isolation de 18 cm de laine minérale additionnée à un module GAP-Solution
- Un système Varios dans la salle de bain de chaque appartement, qui inclut un monobloc de ventilation avec récupération de chaleur et un système de production d'eau chaude sanitaire à la volée, qui soutire sa chaleur sur le circuit de chauffage.

Afin de mesurer les performances du bâtiment rénové, les analyses suivantes ont été effectuées et comparées aux recommandations et normes en vigueur :

- Valeur U des parois en tenant compte de l'orientation nord/sud de la façade,
- Niveau acoustique dans toutes les pièces des appartements-témoins, pour différentes vitesses de ventilation,
- Confort thermique estival et hivernal dans les appartements-témoins,
- Consommation d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire,
- Efficacité des monoblocs de ventilation,
- Qualité de l'air dans les pièces des appartements-témoins,
- Sondage d'opinion auprès des occupants.

Durant ce projet, le planning prévu initialement n'a pas pu être respecté car le chantier a pris du retard. Le système d'acquisitions n'a pas pu être installé suffisamment tôt pour que l'enregistrement des mesures puisse commencer avant la période de chauffage 2010-2011. La mise en place de l'acquisition a débuté en décembre 2010 et les premières données enregistrées n'ont pas été exploitables car le système d'acquisition était mal connecté pour certains compteurs de chaleur. Il a fallu alors intervenir dans des appartements occupés ce qui a retardé le début des mesures. Les premières mesures valables ont été effectuées à partir de la semaine 4 de 2011 (24 janvier) et ceci uniquement dans les quatre appartements-témoins. Les mesures dans les 55 autres appartements ont été valides à partir de la semaine 8 de 2011 (21 février).

Ce retard n'a eu d'influence que pour l'analyse de la consommation d'énergie de chauffage, mais n'a pas empêché d'effectuer les autres analyses. Les résultats obtenus avec les données à disposition pour la consommation de chauffage ont été extrapolées pour la saison de chauffage au moyen des degrés-heures afin d'avoir une idée relativement précise de la consommation pour la période de chauffage 2010-2011.

Pour chaque domaine étudié, les résultats obtenus sont les suivants :

- **Valeur U des parois** : de par la composition des éléments GAP-solution, les valeurs U des façades sont sensibles au rayonnement solaire. Les valeurs U mesurées doivent donc être différenciées selon l'orientation et les conditions d'ensoleillement. Pour une façade Sud, sans ombrage et durant une période ensoleillée hivernale, la valeur U obtenue est  $0.073 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ . Pour la façade nord, protégée du rayonnement solaire direct, la valeur U est  $0.103 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ .

Il est important de tenir compte de l'orientation des façades pour avoir une valeur U représentative lors du calcul du bilan thermique pour une demande de permis de construction, pour ce type de façade.

- **Acoustique** : dans la salle de bain, pour des vitesses inférieures à 4, les niveaux acoustiques mesurés sont inférieurs aux exigences accrues (Minergie : < 30 dB(A)) dans trois quarts des cas et au-dessous de l'exigence minimale (SIA : < 33 dB(A)) pour 100% des cas. Pour des vitesses égales ou supérieures à 4, les niveaux acoustiques dépassent les exigences minimales. Mais selon l'enquête de satisfaction, environ 90% des occupants utilisent la ventilation sur une vitesse inférieure à ou égale au niveau 3.

Pour les autres pièces, la situation est encore meilleure. Les niveaux acoustiques mesurés sont toujours inférieurs aux exigences accrues (inférieur à 25 dB(A)) dans tous les appartements mesurés.

Nous pouvons donc dire que le système de ventilation dans le bloc Varios est conforme aux exigences accrues dans ce bâtiment pour les vitesses d'utilisation fixées par les occupants. Ces résultats sont confirmés par l'enquête de satisfaction.

- **Confort thermique** : la mesure du confort thermique dans les appartements est :
  - En hiver : bonne (PPD < 20%) que ce soit avec ou sans un pull et pour une activité sédentaire
  - En été : selon les conditions extérieures, il y a une surchauffe qui génère un PPD > 20% pendant 14% du temps (hors canicule selon SIA 180)

Le Tableau 28 ci-dessous résume les valeurs mesurées en fonction de la saison et comparées à la valeur limite de la norme SIA 180 et aux résultats du sondage d'opinion.

PPD	Eté	Hiver
Limite supérieure SIA 180	20%	20%
Moyenne hors période de canicule (mesuré selon ISO 7730 : 2005) cf. § 9	12.3%	6.7% avec pull 19.4% sans pull
Temps où le PPD > 20% (mesuré selon ISO 7730 : 2005) cf. § 9	14%	100%
Sondage d'opinion cf. § 12	55% (chambres) 73% (salon)	33%

Tableau 28 : Résumé du confort thermique (valeurs moyennes)

Alors que les mesures montrent des résultats satisfaisants pour le confort thermique, le sondage d'opinion met en avant un inconfort ressenti. Toutefois, il faut relativiser cette comparaison, car comme vu au chapitre 12 pour des conditions similaires (Figure 54), le ressenti est très différent d'une personne à l'autre.

- **Consommations d'énergie pour le chauffage et l'ECS** : le besoin de chaleur (énergie utile pour le chauffage) du bâtiment obtenu à partir de mesures et de calculs (extrapolation sur toute la période de chauffage) pour l'hiver 2010-2011 donne :

$$Q_{h,eff} = 12.9 \text{ [kWh/m}^2\text{/an]} = 46.6 \text{ [MJ/m}^2\text{/an]}$$

Cette valeur est extrêmement faible, surtout s'agissant d'une rénovation. Cela démontre la grande efficacité de l'enveloppe mise en place lors de la rénovation et de l'intérêt du module de GAP-Solution, couplé avec le système Varios pour la ventilation avec la récupération de chaleur.

La consommation d'énergie du bâtiment a pu être réduite d'un facteur 8 après rénovation tout en gardant un confort raisonnable en hiver (uniquement le porte-serviettes). Plus du trois quarts des occupants sont très satisfaits de leur nouveau logement.

Le besoin en eau chaude sanitaire annuel calculé à partir des mesures (extrapolation sur l'année) donne :

$$Q_{ww} = 11.5 \text{ [kWh/m}^2\text{/an]} = 41.5 \text{ [MJ/m}^2\text{/an]}$$

La valeur limite Minergie-P de 30 [kWh/m<sup>2</sup>/an] (108 [MJ/m<sup>2</sup>/an]) a pu être respectée avec une valeur de 26.1 [kWh/m<sup>2</sup>/an], soit 94.1 [MJ/m<sup>2</sup>/an].

- **Récupération de chaleur de la ventilation** : la ventilation est munie d'un système de récupération d'énergie dont le rendement mesuré est en moyenne supérieur à 90 [%] avec les débits utilisés.

Il existe également un échange de chaleur dans la distribution générale verticale de l'air entre les appartements d'une zone de distribution. Ce contact entre le canal d'air vicié et le canal d'air frais permet de préchauffer l'air arrivant au niveau des appartements. Le rendement mesuré de cet échangeur dépend de l'étage où est situé l'appartement et varie de 50% pour l'étage le plus haut à 80% pour l'étage le plus bas. Pour quatre appartements superposés, la valeur moyenne de cet échangeur est de 65%. Ainsi, l'ensemble de l'installation de ventilation permet de récupérer plus de 90% de la chaleur de l'air vicié.

- **Qualité de l'air** : les concentrations de COV et de CO<sub>2</sub> ont été mesurées dans les pièces des appartements-témoins.

Dans certains cas, la concentration de CO<sub>2</sub> dans les chambres à coucher atteint 1'800 ppm, ce qui est élevé. Toutefois, les occupants de cet appartement ne semblent pas ressentir une qualité de l'air insuffisante, puisque dans le cas contraire, ils ont la possibilité d'agir directement sur la vitesse des ventilateurs pour augmenter le débit d'air frais et ainsi diminuer cette teneur en CO<sub>2</sub>.

La mesure des COV a montré que la concentration est le plus souvent nulle. Au cours de certaines journées et ponctuellement, il y a de faibles émissions de ces substances dues au mode de vie des occupants (bougies...). Les teneurs enregistrées restent néanmoins très faibles ce qui ne nécessite aucune attention particulière dans les appartements.

Malgré le fait que les débits d'air soient inférieurs aux recommandations Minergie cela ne semble pas poser de problème de confort aux habitants sondés. En effet, Minergie recommande un débit d'air frais d'environ 100 [m<sup>3</sup>/h] pour un appartement témoin (3 pièces). Or le débit d'air moyen mesuré est de 20 [m<sup>3</sup>/h] par appartement.

- **Sondage d'opinion** : un sondage a été effectué auprès des occupants de l'ensemble des appartements. Les résultats obtenus sont les suivants :
  - Confort thermique : Il est bon dans l'ensemble, même si la situation pourrait être améliorée dans le séjour en période de chauffage.
  - Acoustique : Malgré l'environnement plutôt animé, les bruits extérieurs sont considérés comme faibles à nuls par les occupants, ce qui n'est pas surprenant étant donné le triple vitrage. Concernant la ventilation, une nuisance est estimée comme très faible par les occupants. Pour les chambres et le salon/cuisine, la nuisance est considérée comme très faible à nulle.
  - Confort ECS : Le niveau de température offert par le système Varios est considéré par 90% des occupants comme agréable, et par les autres comme trop chaud ou trop froid. Concernant le temps d'attente pour obtenir l'eau chaude, il est considéré comme trop long pour uniquement 6% des occupants. Ces résultats sont très instructifs et montrent que la production d'ECS avec le système Varios est très bien acceptée par les utilisateurs.

En résumé, les résultats obtenus durant cette campagne de mesures, démontrent que les solutions utilisées pour ce bâtiment permettent d'envisager des rénovations très performantes. Si l'aspect de la façade a été modifié avec l'utilisation des modules GAP-Solutions, ces derniers permettent d'obtenir des parois avec un très haut pouvoir isolant.

Le couplage avec le système compact Varios permet ainsi d'offrir un très fort potentiel d'économie d'énergie de chauffage, tout en offrant une qualité de confort intérieur de qualité.

Pour terminer, il est à préciser que la chaîne d'acquisition restera en place pour la saison de chauffage 2011-2012 afin de vérifier si les résultats obtenus pendant l'hiver 2010-2011 se confirment.



## 14 Remerciements

Nous tenons ici à remercier particulièrement :

L'Office Fédéral de l'Energie pour le financement de ce projet.

Nous aimerions également remercier M. Beat Nussbaumer et Energie-Cluster pour leur soutien au démarrage du projet.

Nous tenons également à remercier les personnes suivantes pour leur soutien financier ou logistique à ce projet :

- M. Ravani, SwissRenova A.G.
- M. Goselin, Siemens Suisse S.A.
- M. Lemaire, Romande Energie S.A.
- M. Kunze, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud.

Nous remercions également :

- M. Egg de l'entreprise SwissFrame qui nous a fourni les informations nécessaires concernant le système Varios et pour sa collaboration afin de mettre en place certains instruments de mesures dans les systèmes Varios.
- M. Frank Sapin (Architecture et acoustique, Genève) pour les mesures acoustiques et pour s'être levé tôt le matin afin d'effectuer les mesures dans des bonnes conditions.
- MM. Li Puma et Chironi (Siemens), M. Blaser (SwissRenova), M. Sapin (Sapin SA) qui ont toujours cherché à trouver des solutions techniques et pour leurs implications pour la mise en place du système d'acquisition
- La Régie de la Couronne pour les informations concernant la consommation de gaz.
- Les locataires de l'immeuble pour avoir répondu le plus complètement possible au questionnaire.
- Christophe Brunner et Werner Hässig pour leur retour concernant l'analyse du système de ventilation.

Un projet de cette ampleur a nécessité un engagement de ces personnes et sans elles, ce projet n'aurait pas été possible.

## 15 Collaboration nationale

Ce projet s'est fait avec les partenaires suivants :

- SwissRenova, Flavio Ravani, Directeur, rénovation du bâtiment.
- SwissFrame, Balz Egg, Gérant, système Varios.
- Siemens, Marc Gosselin, Responsable de Division. Building Automation chez Siemens Suisse SA, Instrumentation.
- HEIG-VD/LESBAT, S. Citherlet, J. Bony, C. Hildbrand, O. Georges, M. Richard : pilotage du projet et analyse des mesures.

## **16 Collaboration internationale**

L'agence internationale de l'Energie (AIE/IEA) a démarré en 2011, l'Annexe 56 intitulée «Energy & Greenhouse Gas Optimised Building Renovation ». Suite à différentes réunions entre les partenaires de la Task 56 et la HEIG-VD, il est envisagé que le bâtiment étudié dans le présent rapport, soit pris comme étude de cas exemplaire afin de pouvoir partager les résultats de ce projet et de participer à la promotion des rénovations performantes dans le domaine de la construction.

## 17 Références

- [1] J. Bony, S. Citherlet : Rénovation à très haute performance d'un bâtiment d'habitation multifamiliale à Morges, Symposium ER'10, 24-26 novembre, 2010.
- [2] GAP-Solution, [www.gap-solution.at](http://www.gap-solution.at), Welser Str. 37, 4060 Linz / Autriche
- [3] SwissRenova AG, Dorfmatweg 8a, CH-3110 Bern-Münsingen : <http://www.swissrenova.ch>
- [4] SwissFrame AG, Dammweg 39 - 3053 Münchenbuchsee : <http://www.swissframe.ch>
- [5] Marc Richard : Analyse énergétique et environnementale de la rénovation à hautes performances du bâtiment d'habitation « Les Charpentiers » à Morges, thèse de master 2011, février 2011.
- [6] Norme ISO 9869 :1994 : Isolation thermique – Eléments de construction – Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique.
- [7] ISO 7730 : Ergonomie des ambiances thermiques —Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. Troisième édition 2005-11-15.
- [8] Delta OHM srl, 35030 Caselle di Selvazzano ( PD ) Italy Via Marconi, 5.
- [9] <http://www.agrometeo.ch>, station de météo Suisse.
- [10] Degré Heure du site de l'état de Vaud : <http://www.vd.ch>
- [11] Norme SIA 382/1 : Performances techniques pour les installations de ventilation et de climatisation.
- [12] Ordonnance sur la loi du travail, article 16 : Climat des locaux.

Il y a également eu plusieurs publications dans des quotidiens et des magazines spécialisés, comme

- Chantiers & Rénovation, ÉTUDE : RÉNOVATION DE FAÇADE à MORGES, 1.6.2010
- Journal de Morges, Un complexe immobilier morgien, entièrement rénové selon le standard Minergie-P, est devenu un modèle du genre. 28.5.2010
- Le Nouvelliste, Derrière les façades, 28.4.2010

# Annexes

## Annexe A Description des habillements utilisés pour cette étude

<b>Description habillement (été)</b>	0.4 [clo]	soit : 0.062 [m <sup>2</sup> .K/W]
<ul style="list-style-type: none"><li>• Slip</li><li>• Chemises</li><li>• Pantalon léger</li><li>• Chaussettes</li></ul>		
<b>Description habillement (hiver, avec pull)</b>	0.93 [clo]	soit : 0.145 [m <sup>2</sup> .K/W]
<ul style="list-style-type: none"><li>• Slip</li><li>• Maillot de corps</li><li>• Chemises manche longue</li><li>• Pull tricot moyen</li><li>• Pantalon normal</li><li>• Chaussettes</li></ul>		
<b>Description habillement (hiver, sans pull)</b>	0.64 [clo]	soit : 0.0994 [m <sup>2</sup> .K/W]
<ul style="list-style-type: none"><li>• Slip</li><li>• Maillot de corps</li><li>• Chemises manche longue</li><li>• Pantalon normal</li><li>• Chaussettes</li></ul>		

Annexe B    Degrés-heures pour Morges

DEGRES-HEURES SIMPLES

SAISON 2010 - 2011

Année 2010

Semaine No :	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	1
Relevé du :	20 sept	27 sept	04 oct	11 oct	18 oct	25 oct	01 nov	08 nov	15 nov	22 nov	29 nov	06 déc	13 déc	20 déc	27 déc	03 janv	10 janv
Morges	464.4	666.2	758.8	507.3	1291.1	1646.9	1645.3	1220.7	1355.4	2009.1	2617.0	3156.4	2279.0	3091.5	2640.6	2877.7	2210.2

Année 2011

Semaine No :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Relevé du :	07 janv	14 janv	21 janv	28 janv	04 févr	11 févr	18 févr	25 févr	03 mars	10 mars	17 mars	24 mars	31 mars	07 avr	14 avr	21 avr	28 avr
Morges	1923.8	2826.1	2753.7	2786.8	2285.7	2054.2	2150.3	2254.1	1761.6	1360.2	1315.9	919.5	514.2	1024.5	479.5	565.2	465.5

Tableau 29 : Degrés-heures 2010-2011 pour Morges

## Annexe C    Calculs de la consommation électrique pour la circulation de l'eau de distribution

Pour le calcul de la consommation électrique nécessaire à la distribution de chaleur, certaines hypothèses sont faites. Le Tableau 30 présente ces hypothèses ainsi que les résultats des calculs théoriques afin de contrôler l'ordre de grandeur de cette consommation.

	Colonnes de distribution	Distribution générale
Longueur des conduites estimées à partir des plans	360 [m] Avec : 12 = nbr. de colonnes 15 = hauteur de la colonne	120 [m] Avec : 2x 60 (distribution après compteur de chaleur) +2x36 (distribution avant compteur de chaleur)
Diamètre des conduites	35 [mm]	45 [mm]
Débit	0.8 [m <sup>3</sup> /h]	9.5 [m <sup>3</sup> /h]
Pertes de charge théorique	9'000 [Pa]	153'000 [Pa]
Majoration estimative pour tenir compte des pertes de charges singulières	50 [%]	
Rendement du moteur du circulateur	50[%]	
Puissance circulateur	1220 [W]	
Consommation spécifique	2.2 [kWh/m <sup>2</sup> /an] / 7.9 [MJ/m <sup>2</sup> /an]	
Consommation pondérée E <sub>LK</sub>	4.4 [kWh/m <sup>2</sup> /an] / 15.9 [MJ/m <sup>2</sup> /an]	

Tableau 30 : Hypothèses et résultats des calculs théoriques pour les pertes de charge de la distribution de chaleur dans l'immeuble ainsi que la consommation électrique du circulateur

## Annexe D Sondage d'opinion – page 1

<b>heig-VD</b> <small>Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud</small>	<b>Rue des Fossés 6-8, 1110 Morges</b> <b>SONDAGE D'OPINION</b>	<b>Hes-SO</b> <small>Haute Ecole Spécialisée des Sciences Sociales</small>
<b>Informations générales</b> (cocher les cases correspondantes)		
N° d'appartement : _____ OU Etage : _____ Orientation de l'appartement : <input type="checkbox"/> Rue / <input type="checkbox"/> Cour		
Nombre de personnes vivant dans l'appartement : _____ Date d'entrée dans l'appartement rénové : _____ Avez-vous été locataire avant la rénovation de l'immeuble ? <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON		
<b>Comment ressentez-vous la température ambiante dans votre appartement ?</b>		
Selon l'appartement	<b>Durant l'été</b>	Très froid / Froid / Frais / Agréable / Un peu chaud / Chaud / Très chaud
	- Salon / cuisine .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Salle de bain .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 1 (côté salle de bain) .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 2 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 3 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 4 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Selon l'appartement	<b>Durant l'hiver</b>	Très froid / Froid / Frais / Agréable / Un peu chaud / Chaud / Très chaud
	- Salon / cuisine .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Salle de bain .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 1 (côté salle de bain) .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 2 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 3 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 4 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Comment percevez-vous les bruits dans votre appartement ?</b>		
Selon l'appartement	Bruits de la rue (avec fenêtres fermées) .....	Aucun / Très faible / Faible / Fort / Très fort <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Bruits de l'immeuble .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Bruits de la ventilation	
	- Salon / cuisine .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Salle de bain .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 1 (côté salle de bain) .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	- Chambre 2 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
- Chambre 3 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
- Chambre 4 .....	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
<b>Tournez la page S.V.P.</b>		



5

☐ Plus de 3 fois par jour

9

5

**Sans opinio**

Projet Reno-HP, S. Citherlet et al., HEIG-VD