



Ademe



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

MULHOUSE Quartier Franklin

Evaluation technico-économique de réhabilitations « basse consommation » d'immeubles d'habitation

Rapport final

Mars 2010



INGENIEURS CONSEILS

26160 Félines sur Rimandoule

☎ 04 75 90 18 54 - contact@enertech.fr

www.enertech.fr

SOMMAIRE

Partie I :	Description de la campagne de mesure	4
I.1	Présentation de la campagne de mesures	4
I.2	Description des bâtiments et des travaux de RENOVATION	4
I.3	Métrologie mise en œuvre	5
I.3.1	Le lecteur optique	5
I.3.2	Le compteur d'impulsions	6
I.3.3	Les thermomètres	6
I.4	Description de la campagne de mesures	6
I.4.1	Liste détaillée des usages suivis	6
Partie II :	Etude des consommations thermiques	7
II.1	Consommation thermique pour le chauffage des bâtiments	7
II.1.1	Consommation annuelle	7
II.1.2	Evolution de la consommation au cours de l'année	8
II.1.3	Consommations et températures	8
II.1.4	Courbes de charges journalières des consommations d'énergie utile	9
II.2	Consommation d'énergie utile pour la production d'ECS	10
II.2.1	Consommation annuelle	10
II.2.2	Evolution de la consommation	11
II.3	Production d'ECS solaire	11
II.3.1	Production annuelle	11
II.3.2	Taux de couverture solaire	13
II.3.3	Evolution de la production solaire	14
II.3.4	Consommation d'énergie utile pour la production d'ECS (appoint + solaire)	15
II.4	Consommation chauffage et ECS en énergie primaire	16
II.4.1	Rendement de production	16
II.4.2	Consommation de gaz des bâtiments (énergie primaire)	17
II.4.3	Explication des divergences entre consommations mesurées et prévues de chauffage 19	
II.5	Taux de charge des chaudières	21
Partie III :	Etude des consommations électriques des services généraux	25
III.1	Consommations électriques des services généraux	25
III.2	variation de la consommation électrique des services généraux	27
III.2.1	Evolution mensuelle de la consommation	27
III.2.2	Courbe de charge journalière	28
Partie IV :	Etude des consommations électriques privatives des logements	30
Partie V :	Etude des températures dans les logements	33
V.1	Température en hiver	33
V.1.1	Températures observées	33
V.1.2	Courbes de charge des températures	35
V.1.3	Température intérieure fonction de la température extérieure	36
V.2	Température en été	38
V.2.1	Températures observées	38
Partie VI :	Analyse économique	41
VI.1	Méthodologie utilisée	41
VI.1.1	Objet de l'étude	41
VI.1.2	Liste des postes retenus et limites de prestations	41
VI.1.3	Mode opératoire	43

VI.2	Résultats de l'étude	44
VI.2.1	Coût de la STU	44
VI.2.2	Coût des autres travaux liés à l'énergie.....	47
VI.2.3	Coût des travaux non liés à l'énergie	47
VI.3	Enseignements et perspectives	49
VI.3.1	Menuiseries triple vitrage.....	49
VI.3.2	Ventilation double flux.....	50
VI.3.3	Régulation terminale performante.....	51
VI.3.4	Production de chaleur performante	52
VI.3.5	Installation solaire	52
VI.3.6	Perspectives d'évolution des prix.....	53
Partie VII :	Synthèse - Conclusion.....	55
Partie VIII :	Annexe récapitulative.....	60

Partie I : Description de la campagne de mesure

I.1 PRESENTATION DE LA CAMPAGNE DE MESURES

Cette campagne de mesures porte sur trois bâtiments d'habitation comportant au total 10 logements. Elle a duré un an. Les immeubles ont été construits au 19^{ème} siècle. Ils ont subi en 2006-2007 d'importants travaux de rénovation dont l'objectif était de ramener leurs consommations de chauffage, d'Eau Chaude Sanitaire (en énergie primaire) et d'électricité (en énergie finale) aux valeurs suivantes :

kWh /m ² _{Shab} /an	Chauffage	ECS	Electricité spécifique des parties privatives
Consommations initiales (estimations)	410	Inconnu. Moy Française : 38	Moy. Française : 32
Consommation après rénovation	50	30	30

Figure 1.1: Tableau récapitulatif des équipements des différents bâtiments

Les bâtiments ainsi que les travaux effectués sont décrits en détails dans le paragraphe I.2. Le but de la campagne de mesures était de vérifier le niveau de consommation de ces trois bâtiments après rénovation.

Les usages suivis au cours de cette campagne l'ont été au pas de temps de 10 minutes :

- La consommation thermique (chauffage et eau chaude)
- La consommation électrique de chaque logement
- La consommation électrique des parties communes
- La température de l'ensemble des logements (deux ou trois sondes de température ont été installées dans chaque appartement).
- La température extérieure
- La consommation de gaz (seulement les index des compteurs pour une partie de l'année)
- La consommation d'eau (chaude et froide) lorsque les compteurs étaient accessibles.

Quatre bâtiments supplémentaires qui ont fait l'objet d'une rénovation du même type ont bénéficié d'un suivi léger. Pour ceux-ci, il a été relevé tous les mois :

- La consommation thermique (chauffage et eau chaude)
- La consommation électrique des parties communes
- La consommation de gaz (pour une partie de l'année seulement)
- La consommation d'eau (chaude et froide) lorsque les compteurs étaient accessibles.

On traitera dans ce rapport non seulement les données issues de la campagne de mesures mais également celles des relèves ponctuelles de compteurs afin de vérifier la performance des sept bâtiments.

I.2 DESCRIPTION DES BATIMENTS ET DES TRAVAUX DE RENOVATION

Le tableau de la figure 1.2 reprend les caractéristiques du matériel de chauffage, production d'ECS et de ventilation de l'ensemble des bâtiments.

	13 Vosges	31 Vosges	33 Maçons	53 Runtz	37 Runtz	19 Vosges	45 Vosges
Système de régulation chauffage	Thermostats+ vannes électrothermiques	Thermostat central + robinets thermostatiques dans les différentes pièces	Thermostats+ vannes électrothermiques	Thermostats+ vannes électrothermiques	Thermostats+ vannes électrothermiques	Thermostats+ vannes électrothermiques	Thermostats+ vannes électrothermiques
Marque référence chaudière	De Dietrich 15 kW condensation MC15LP	De Dietrich condens 35 kW	De Dietrich 15 kW condensation MC15LP	De Dietrich 15 kW condensation MC15LP		De Dietrich 15 kW condensation MC15LP	De Dietrich condens 35 kW
Marque référence ventilation	VMC Systemair VR700EV	VMC Lemmen's REC HR1	VMC Systemair VR700EV	VMC Systemair VR700EV		VMC Systemair VR700EV	VMC Lemmen's REC HR1
Marque référence installation solaire	Viessman Vitosol, 100	De Dietrich Pro 2.5	Viessman Vitosol, 100	Viessman Vitosol, 100	De Dietrich Pro 2.3	Viessman Vitosol, 100	De Dietrich Pro 2.3

Figure 1.2: Tableau récapitulatif des équipements des différents bâtiments

1.3 METROLOGIE MISE EN ŒUVRE

1.3.1 Le lecteur optique

Le lecteur optique est un appareil qui compte les impulsions lumineuses (flash) émises par les compteurs électroniques à chaque pulse. L'ensemble des compteurs du bâtiment ont été suivis à l'aide de ce type d'appareil.

Ces enregistreurs sont totalement autonomes sur piles, la mémoire ayant par ailleurs une taille permettant de stocker des mesures à 10 minutes collectées pendant plus d'un an.



Figure 1.3 : Lecteur optique

I.3.2 Le compteur d'impulsions

Le compteur d'impulsions permet la comptabilisation d'impulsions provenant de divers appareils tels que compteur de chaleur ou du compteur gaz au pas de temps de 10 minutes.

Ces enregistreurs sont totalement autonomes sur piles. Leur mémoire a par ailleurs une taille qui permet de stocker des mesures à 10 minutes collectées pendant plus d'un an.

I.3.3 Les thermomètres

Le thermomètre autonome est un enregistreur électronique autonome de dimensions très réduites muni d'un capteur de température. Il effectue une mesure toutes les deux minutes, fait la moyenne chaque dix minutes et stocke cette valeur en mémoire. Le thermomètre possède une gamme de mesures très large (-50°C à 120°C) qui autorise des usages très variés. Sa précision est de +/-0.5°C entre -20 et +80°C. Ce mesureur a été utilisé pour suivre l'évolution des températures extérieures et des logements.



Figure 1.4 : Thermomètre

I.4 DESCRIPTION DE LA CAMPAGNE DE MESURES

La campagne de mesures s'est déroulée entre le 18/11/2008 et le 17/11/2009. L'hiver a été moyennement froid (2699 DJU18 pour la saison 2008-2009) et l'été très chaud.

I.4.1 Liste détaillée des usages suivis

Au total 53 appareils de mesures ont été installés dans les bâtiments ce qui correspond à 2,8 millions de données collectées. Elles ont été mises en base de données afin de pouvoir être traitées.

Détails des caractéristiques dans le tableau de la figure 1.5.

Type de mesureur	Suivi	Nombre
Lecteur optique	Comptage d'impulsions des compteurs d'énergie électrique de tableau (compteur individuel et des parties communes)	13
Compteur impulsions	Comptage d'impulsions des compteurs de chaleur de chauffage, ECS et solaire	11
Thermomètre	Mesure de la température des logements (minimum 2 par logement) + une sonde de température extérieure	30

Figure 1.5 : Usage et nombre de mesureurs de chaque type

Partie II : Etude des consommations thermiques

Rappelons les objectifs de consommation fixés pour ce projet :

- 50 kWh/an/m² en énergie primaire pour le chauffage
- 30 kWh/an/m² en énergie primaire pour l'ECS

II.1 CONSOMMATION THERMIQUE POUR LE CHAUFFAGE DES BATIMENTS

II.1.1 Consommation annuelle

L'énergie utile de chauffage est mesurée à l'aide d'un compteur de chaleur placé en aval de la chaudière sur le circuit radiateurs de chaque immeuble. L'énergie utile moyenne des six bâtiments (équipés de compteurs de chaleur) vaut **65,8 kWh/an/m²** (cf. figure 2.1). Cependant, on note de grandes disparités entre les immeubles (rapport de 1 à 4,6 entre les extrema).

La consommation de l'immeuble situé au 53 rue du Runtz est la plus élevée, avec environ 120 kWh/an/m². Cette valeur paraît très élevée. Hélas, ce bâtiment n'a pas fait l'objet d'un suivi détaillé à l'aide d'appareils de mesures. L'explication tient peut-être dans des températures excessives dans les logements ou une régulation terminale qui ne fonctionne pas correctement ou encore de longues périodes de fonctionnement du chauffage avec les fenêtres ouvertes. Ce dernier phénomène a en effet été observé dans plusieurs logements pendant la pose des capteurs.

A *contrario*, le bâtiment situé au 13 rue des Vosges possède une consommation très faible (26,4 kWh/an/m²). Cette consommation très basse s'explique par l'absence d'un des deux locataires de l'immeuble durant 4 mois d'hiver. De plus on note dans ce bâtiment un arrêt du chauffage un mois avant la fin de la saison de chauffe des autres opérations suivies.

Si on élimine du panel le 53 rue du Runtz sur lequel pèse une grosse incertitude, la moyenne de l'énergie utile en aval des chaudières est alors de **54,5 kWh/m²/an**.

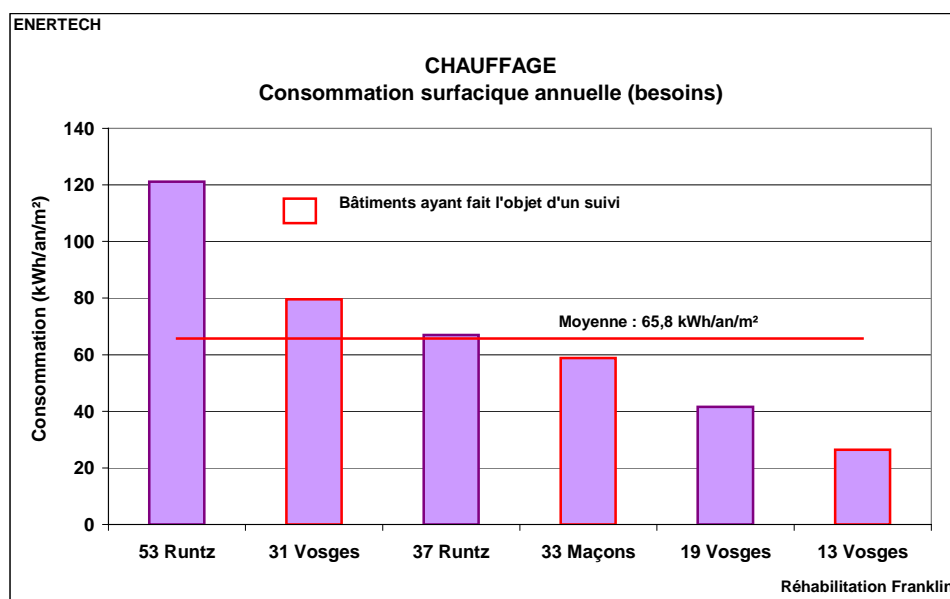


Figure 2.1 : Energie utile surfacique annuelle en aval des chaudières

II.1.2 Evolution de la consommation au cours de l'année

La figure 2.2 représente l'évolution des besoins de chauffage au cours de l'année pour les trois bâtiments.

Première observation très surprenante : il existe des consommations de chauffage en période estivale dans les trois bâtiments. Ces consommations ne sont pas très élevées, mais elles s'élèvent à (en valeur absolue et en pourcentage des besoins annuels) :

- « 13 rue des Vosges » : 21 kWh / 0,6%
- « 31 rue des Vosges » : 133 kWh / 0,9%
- « 33 rue des Maçons » : 160 kWh / 1,3%

Il n'est pas certain que ces consommations soient nécessaires compte tenu de l'inertie des logements. **Il faudrait à l'avenir arrêter l'installation de chauffage de fin Avril à début Octobre** par exemple.

On constate aussi que les pics de consommation varient dans un rapport un à trois (consommation surfacique) sur l'échantillon des trois bâtiments, mais surtout qu'ils n'ont pas eu lieu en même temps. Ceci met en évidence le mode de réaction spécifique de chaque bâtiment, en fonction de son type d'occupation, de la charge climatique, de son inertie, des apports internes, etc :

- « 13 rue des Vosges » : 327 Wh/m²/jour le 09/01/2009
- « 33 rue des Maçons » : 501 Wh/m²/jour le 18/01/2009
- « 31 rue des Vosges » : 950 Wh/m²/jour le 09/01/2009

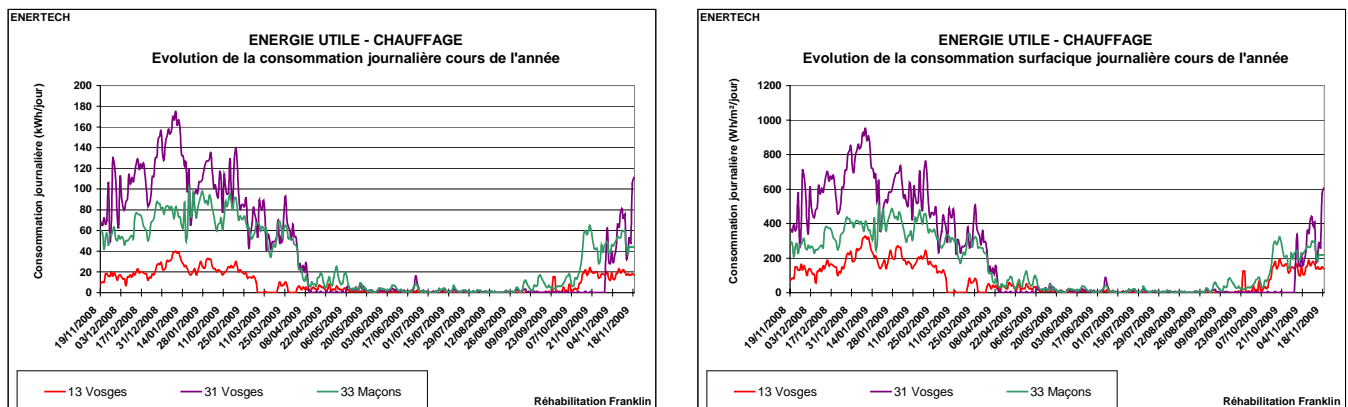


Figure 2.2 : Evolution de la consommation journalière au cours de l'année

II.1.3 Consommations et températures

Les figures 2.3 et 2.4 représentent respectivement l'énergie utile (aux compteurs de chaleur) journalière spécifique en fonction de la température extérieure moyenne journalière, et l'énergie utile journalière spécifique en fonction de l'écart de température moyen journalier entre l'intérieur et l'extérieur. Ces courbes mettent en évidence plusieurs phénomènes :

- Sur la figure 2.3, les consommations sont réparties le long de droites ayant pratiquement la même origine sur l'axe des températures : environ 16°C. Cette température apparaît, compte tenu des températures intérieures, comme la température de non chauffage,
- Les différentes droites n'ont pas les mêmes pentes, ce qui traduit des niveaux de besoins très différents d'un bâtiment à l'autre, ce qu'avait déjà mis en évidence la figure 2.1.

- Cette représentation permet d'identifier les dysfonctionnements éventuels, comme le point de mesure à plus de 550 Wh/m²/jour pour une température extérieure de 10°C dans le bâtiment du 31 rue des Vosges,
- La figure 2.4 est aussi très intéressante car elle met en évidence l'augmentation de température intérieure due à l'ensemble des apports gratuits. On voit que, quel que soit le bâtiment, cette augmentation de température est de 6°C. C'est une caractéristique des bâtiments très performants : ils valorisent très bien les apports gratuits. Rapproché du résultat précédent fixant à 16°C la température de non chauffage, on peut aussi en déduire que la température intérieure est « probablement » pas très loin de 16+6 = 22°C.

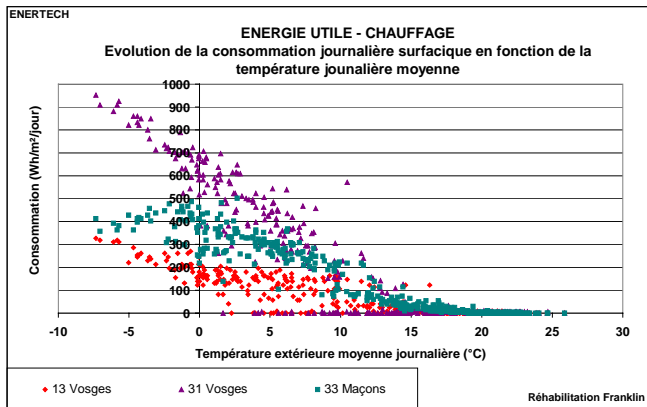


Figure 2.3 : Evolution de l'énergie utile journalière de chauffage en fonction de la température moyenne journalière

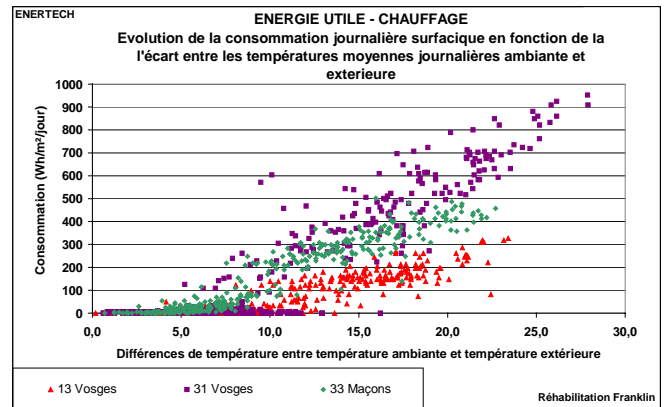


Figure 2.4 : Evolution de l'énergie utile journalière de chauffage en fonction de l'écart entre les températures moyennes journalières intérieure et extérieure

II.1.4 Courbes de charges journalières des consommations d'énergie utile

La figure 2.5 représente les courbes de charge moyennes journalières de la consommation spécifique d'énergie utile de chauffage (toujours au niveau des compteurs de chaleur en aval de la chaudière), exprimées en pourcentage de la valeur maximale annuelle atteinte.

On observe des comportements propres à chaque bâtiment :

- il existe bien un ralenti de nuit très contrasté au 31 rue des Vosges. La relance a lieu, tout à fait normalement, entre 6 et 7h le matin.
- il existe également un ralenti au 13 rue des Vosges, mais curieusement, la relance est complètement dérégulée puisqu'elle s'effectue vers 3h du matin ! Il s'agit là d'un dysfonctionnement important, source de surconsommation qu'il conviendra de corriger rapidement,
- on n'observe pratiquement pas de ralenti pour le bâtiment du 33 rue des Maçons, ce qui est une source importante de surconsommation. A modifier également.

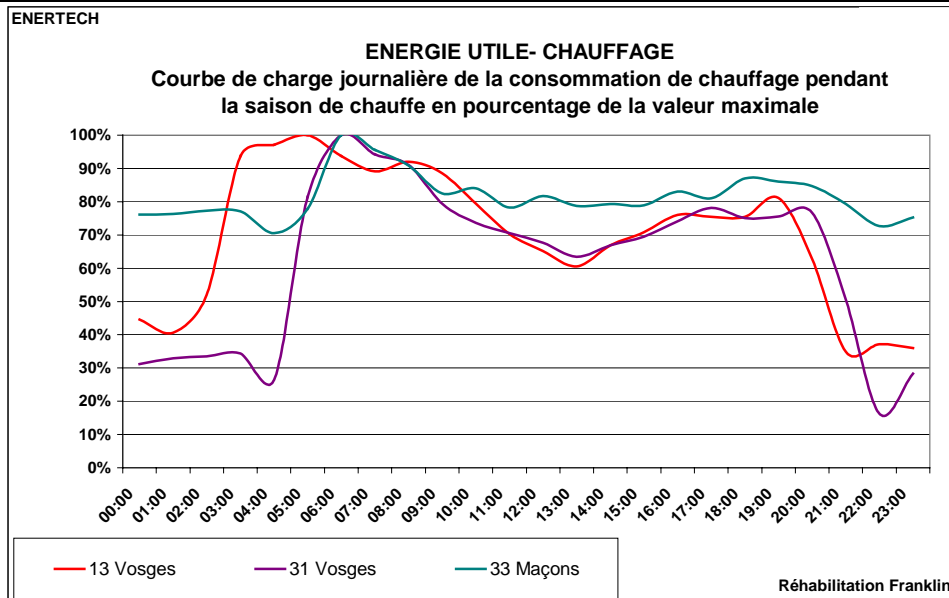


Figure 2.5 : Courbe de charge journalière de la consommation d'énergie utile surfacique de chauffage (en pourcentage de la valeur maximale)

II.2 CONSOMMATION D'ENERGIE UTILE POUR LA PRODUCTION D'ECS

II.2.1 Consommation annuelle

Nous avons observé des problèmes récurrents sur le compteur de chaleur de production ECS du 19 rue des Vosges. On n'a donc pas pris en compte la consommation de ce bâtiment dans les traitements.

La consommation moyenne d'énergie utile (au niveau des compteurs de chaleur en aval de la chaudière) pour la production annuelle d'ECS est de **15,4 kWh/m²/an**. Ce résultat est excellent.

On observe un écart relativement important entre les différents bâtiments car la consommation pour ce poste varie de 10,9 à 20,9 kWh/an/m². Ceci peut s'expliquer par des différences importantes de puisage d'eau chaude d'un logement à l'autre, de production solaire ou encore de pertes dans les réseaux.

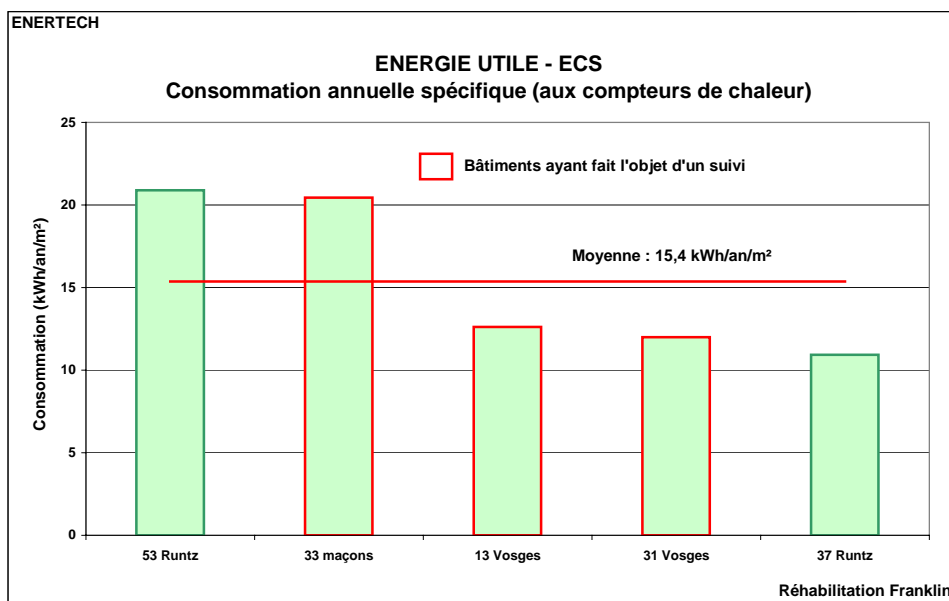


Figure 2.6 : Consommation annuelle surfacique d'énergie utile pour l'ECS

II.2.2 Evolution de la consommation

Deux opérations ont été suivies de manière satisfaisante à l'aide de capteurs sur les compteurs de chaleur (des problèmes de compteurs de chaleur ont perturbé les autres sites). La figure 2.7 représente la consommation d'énergie utile journalière moyenne à l'échelle de chaque semaine du suivi pour la préparation d'ECS.

On a eu deux longs arrêts de la production pour un total de 84 jours au 31 rue des Vosges. Pendant la même période la production solaire a été très importante mais il est étonnant que la consommation de l'appoint ECS soit nulle pendant ces 84 jours alors qu'en plein été elle n'est pas nulle. Ceci correspond peut-être à des différences de besoins, ou à des pannes du système. Mais dans ce cas, ce qui est curieux, c'est que personne ne s'est plaint....

On observe des variations de la consommation d'énergie présentant très légitimement un minimum en été. On verra en étudiant la production solaire que ceci correspond évidemment à une augmentation de celle-ci.

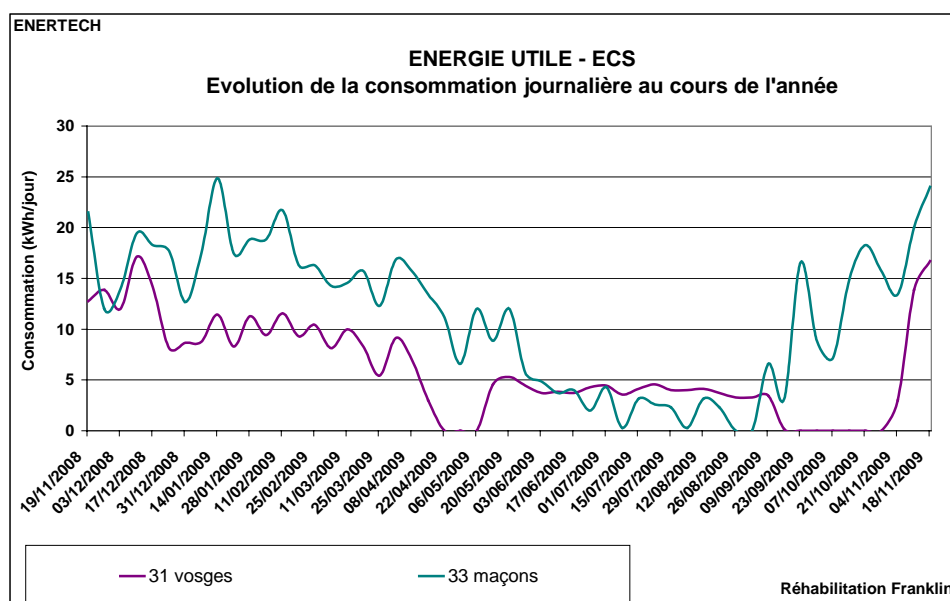


Figure 2.7 : Evolution de la consommation d'énergie utile journalière d'ECS au cours de l'année

II.3 PRODUCTION D'ECS SOLAIRE

II.3.1 Production annuelle

L'ensemble des bâtiments de l'opération de rénovation a été équipé de panneaux solaires thermiques.

Bâtiments	Surface installée (m ²)	Nombre de logements	Surface installée par personne supposée
33 rue des maçons	6,9	5	0,69
13 rue des Vosges	4,6	2	1,15
19 rue des Vosges	4,6	2	0,92
31 rue des Vosges	7,56	3	1,51
37 rue du Runtz	7,56	3	1,08
53 rue du Runtz	6,9	3	0,99

Figure 2.8 : Surfaces de panneaux solaires installées

Les compteurs de chaleur associés à la production solaire n'ont pas fonctionné pour deux opérations (19 Vosges et 37 Runtz). Nous n'avons donc des données correctes que pour 4 opérations.

De plus, en traitant les données, on a observé de très grandes différences de productivité des panneaux. Celle-ci est définie comme le ratio de la production annuelle solaire (mesurée en sortie de ballon solaire) rapportée à la surface de panneaux.

La figure 2.9 représente la production d'ECS solaire par mètre carré de panneaux pour chacun des bâtiments. On sait que cette productivité est d'autant plus élevée que la surface de capteurs par logement (ou par personne) est faible, ce que confirme la valeur observée pour le 33 rue des Maçons où la productivité est de 600 kWh/m²capteur et la surface de capteurs de seulement 0,69 m²/personne. Cette valeur de productivité est d'ailleurs exceptionnellement élevée, notamment pour Mulhouse.

En revanche, la productivité du 13 rue des Vosges, 126 kWh/an/m², est anormalement basse (elle aurait dû être proche de 450 kWh/m²capteur) et met en évidence soit que le compteur de chaleur ne fonctionne pas correctement, soit qu'il y a une un dysfonctionnement majeur sur cette production.

D'une manière générale, les écarts observés sur la figure 2.9 sont trop importants et attestent vraisemblablement de dysfonctionnements.

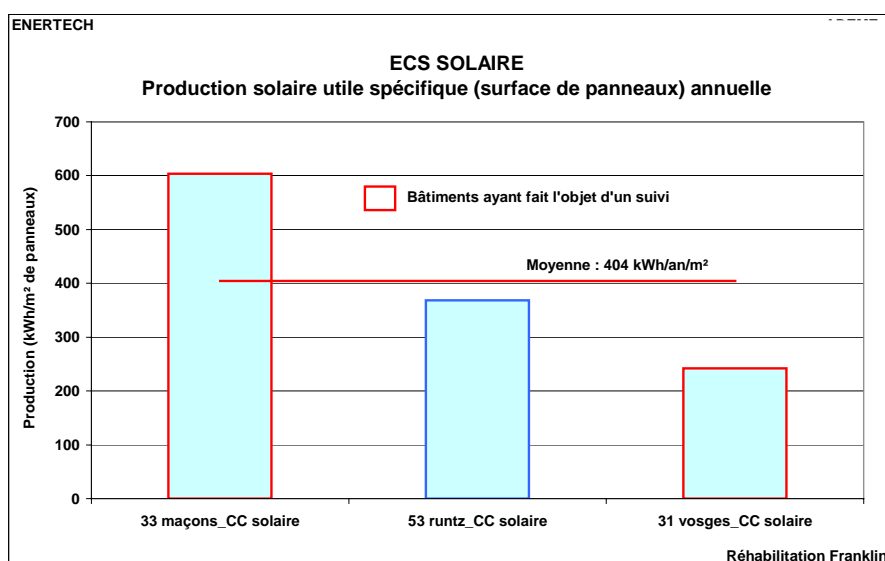


Figure 2.9 : Productivité annuelle des capteurs solaires destinés à la production ECS

La production d'énergie solaire spécifique (rapportée au m² de surface habitable) est très importante : 15 kWh/m²_{shab}/an. Ceci est dû à la quantité importante de panneaux mis en œuvre par logement (figure 2.10).

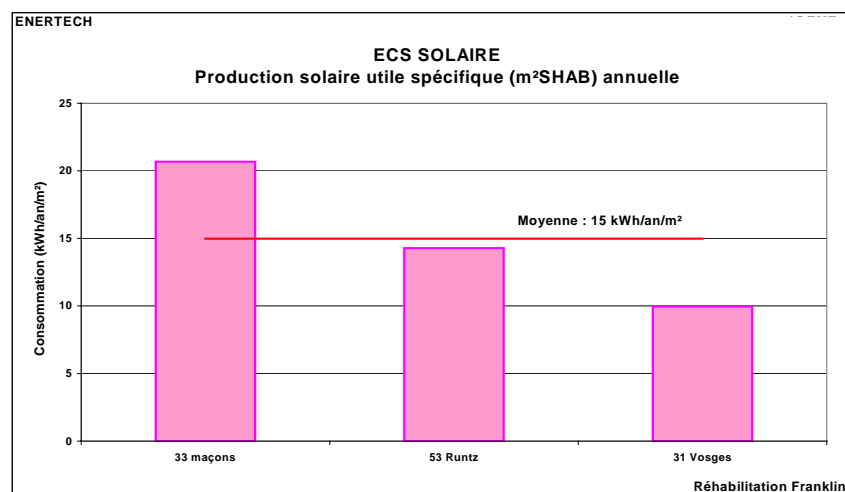


Figure 2.10 : Production annuelle spécifique d'énergie solaire

II.3.2 Taux de couverture solaire

Le **taux de couverture solaire** est le rapport des apports solaires à la somme des besoins aux robinets et des pertes dans la distribution. C'est donc aussi le rapport des apports solaires sur la somme des apports solaires et de l'énergie d'appoint mesurée sur notre compteur de chaleur (qu'il faudrait en toute exactitude encore diviser par le rendement de génération de la chaudière).

Ce taux est en moyenne annuelle de 45%, mais l'opération du 53 rue du Runtz a connu un problème de comptage sur trois mois. Si on exclut ce bâtiment, le taux moyen de couverture solaire est de 48%. Ce taux ne permet en revanche pas de préciser s'il y a eu surproduction en été par suite d'un surdimensionnement.

En hiver, le taux de couverture moyen est de 24,5% (sur les 2 opérations valides). En mi saison (Avril mai), il est de 72 % (les 3 opérations sont valides à cette période).

On observe dans 2 bâtiments des 3 bâtiments suivis une diminution anormale du taux de couverture à un moment ou à un autre de l'année :

- Au 31 rue des Vosges, on a observé que 2 des 3 logements étaient inoccupés (forte diminution de la consommation électrique) au mois de juillet/août. En l'absence des occupants, les puisages d'ECS sont nuls, et donc la quantité d'énergie solaire prélevée ainsi que le taux de couverture solaire, deviennent aussi nulles.
- Au 53 rue du Runtz, le taux chute brutalement à une valeur proche de 0 probablement du fait d'un problème au niveau de l'installation ou du compteur.

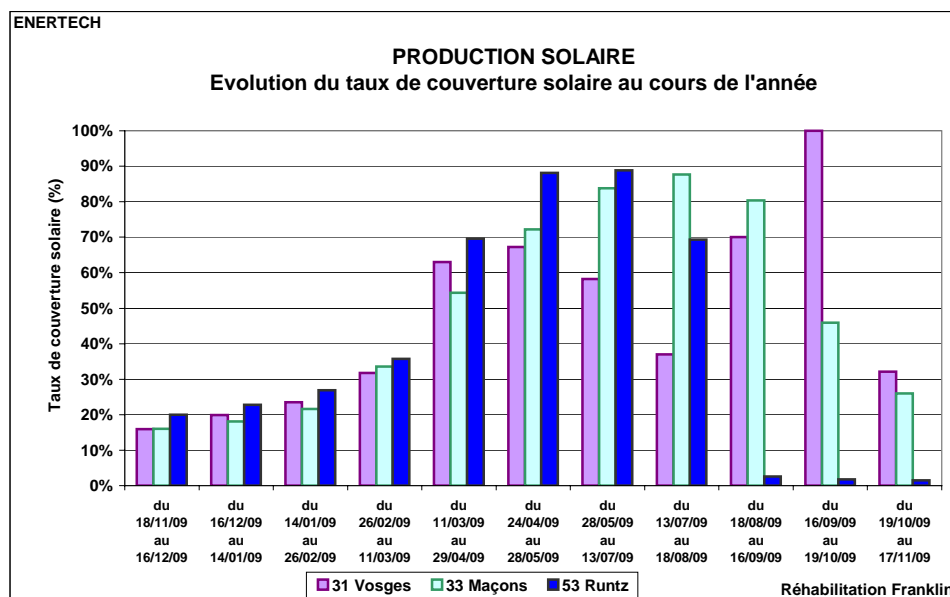


Figure 2.11 : Evolution du taux de couverture solaire au cours de l'année

La figure 2.12 représente les courbes de fréquences cumulées du taux de couverture solaire journalier des bâtiments situés aux 31 rue des Vosges et 33 rue des Maçons. On observe que le taux de couverture est de 100 % pendant 15 à 20 % du temps et nul pendant 2 à 15%.

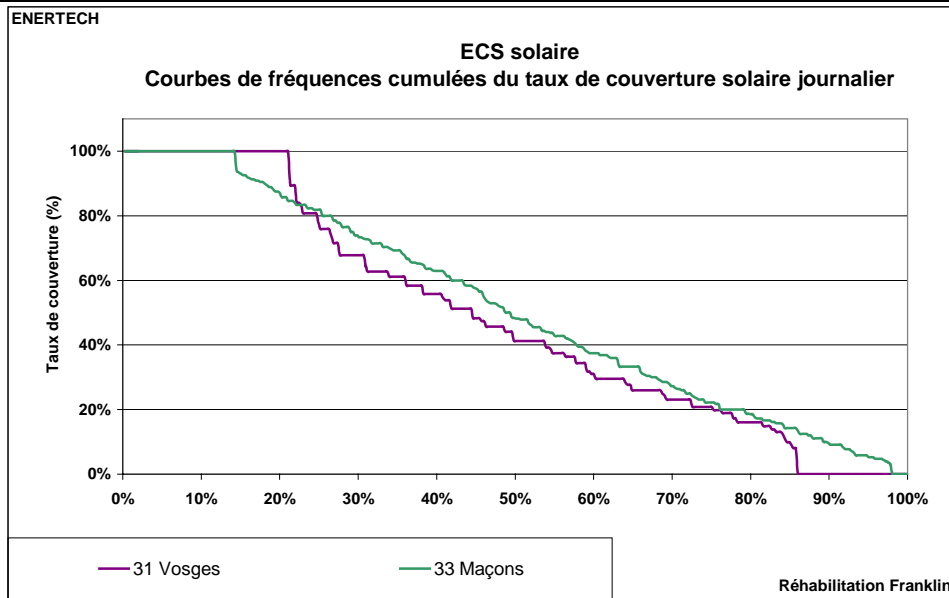


Figure 2.12 : Courbes de fréquences cumulées du taux de couverture solaire journalier

II.3.3 Evolution de la production solaire

La figure 2.13 représente, pour les 3 bâtiments instrumentés, l'évolution de la productivité solaire journalière (à l'échelle de la semaine) par mètre carré de panneaux au cours de l'année. Il existe d'importantes différences d'un bâtiment à l'autre, avec des facteurs de dispersion de 1 à 6 sur la productivité. Les installations du 13 rue des Vosges, et dans une moindre mesure du 31 rue des Vosges, ne fonctionnent pas correctement. S'agissant d'installations neuves, il serait bon que les installateurs prennent l'habitude de livrer des équipements en état de marche. Nous avons nous mêmes remis en route une pompe « gommée » sur un circuit solaire lors d'une de nos visites. Il incombe à chacun d'assumer ses responsabilités, et ce n'est pas le cas sur ces installations.

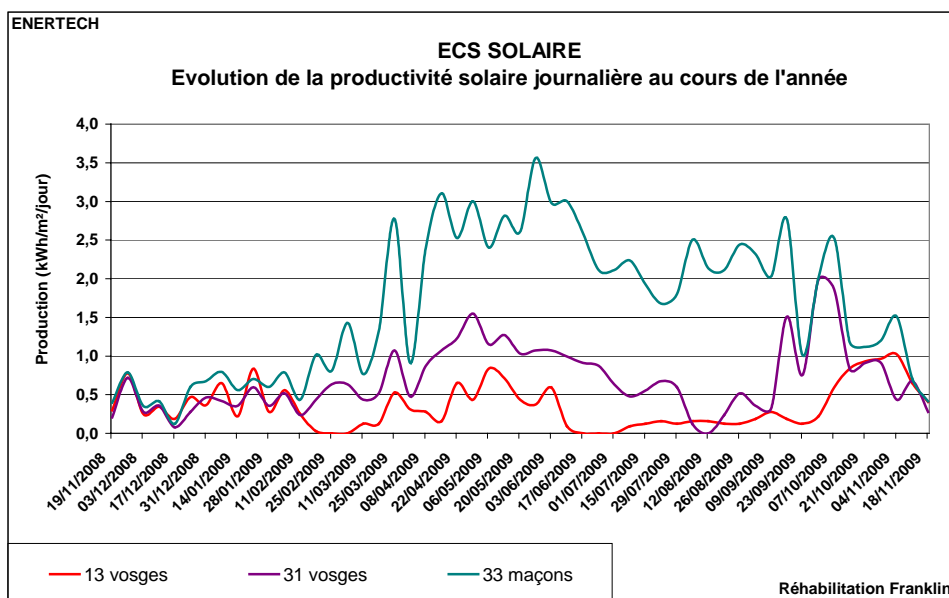


Figure 2.13 : Evolution de la productivité solaire journalière au cours de l'année

II.3.4 Consommation d'énergie utile pour la production d'ECS (appoint + solaire)

La figure 2.14 représente l'énergie utile totale nécessaire à la préparation d'ECS (solaire + appoint) exprimée en moyenne journalière pour chaque semaine du suivi. Il existe d'importantes variations qui sont probablement dues à une fluctuation de la charge interne (nombre de personnes présentes). En revanche, on observe une réduction très marquée en été, consécutive à une réduction des besoins, phénomène identifié de longue date (voir étude du CSTB sur la variation saisonnière des besoins ECS).

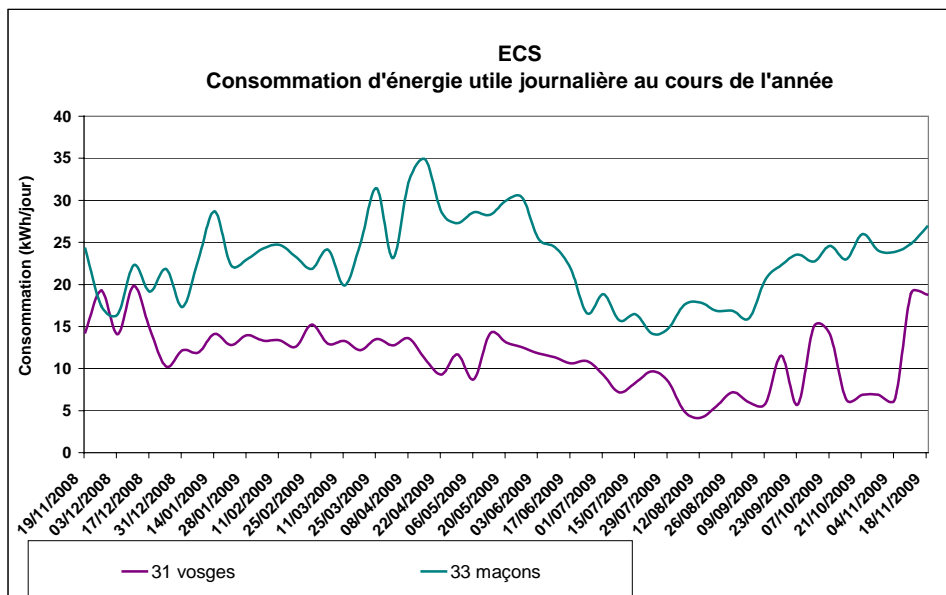


Figure 2.14 : Energie utile totale (appoint+ solaire)moyenne journalière par semaine pour la production d'ECS

En ajoutant l'énergie utile de la production d'appoint et celle de la production solaire on obtient l'énergie utile totale qu'aurait dû fournir une chaudière gaz pour assurer le service d'ECS.

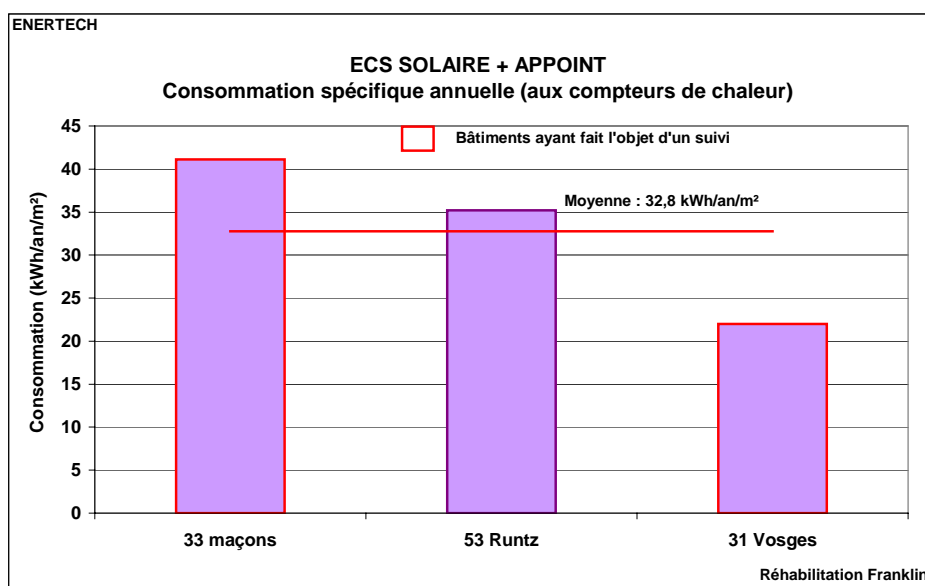


Figure 2.15 : Energie utile spécifique totale (appoint+ solaire) pour la production ECS

Avec une valeur moyenne de 32,8 kWh/m²shab/an d'énergie utile, la production d'eau chaude de ces bâtiments n'est pas exceptionnelle, elle n'est peut-être même pas dans la moyenne française (38

kWh/m²/an d'énergie primaire). Alors comment expliquer le bon résultat observé sur la consommation d'énergie utile de l'appoint ?

Il pourrait y avoir deux raisons pour lesquelles la consommation d'appoint est très bonne sur ces bâtiments : d'abord que les dispositifs permettant de réduire les débits à la source (c'est à dire aux robinets) ont fonctionné correctement. Ensuite que les capteurs solaires ont couvert une part importante des besoins.

Personne n'a dû vérifier que les limiteurs de débit avaient été posés, et que s'ils l'avaient été, ils avaient les caractéristiques requises...Et ceci est un écueil fréquent qu'il faut à tout prix éviter : les limiteurs de débit sont des dispositifs mal connus, souvent identifiés à de simples « mousseurs ». Ils n'ont pourtant rien à voir avec ces derniers. Et comme les installateurs pas plus que les grossistes ne font la différence, ce sont de simples mousseurs qui sont posés la plupart du temps. Il est donc nécessaire de contrôler sur tous les chantiers, au moyen de dispositifs de mesure de débit, que les matériels préconisés ont bien été installés.

Dans notre cas, il est patent que les dispositifs de réduction des volumes d'eau chaude n'ont pas fonctionné (ou pas été posés) et que seule la production de chaleur des capteurs solaires permet d'expliquer pourquoi le niveau de la consommation d'appoint est aussi faible. **Ce sont les capteurs solaires qui ont rendu possible ici la division par deux des consommations d'énergie d'appoint de la production d'ECS.**

II.4 CONSOMMATION CHAUFFAGE ET ECS EN ENERGIE PRIMAIRE

II.4.1 Rendement de production

Pour connaître la consommation d'énergie primaire, il faut mesurer au pas de temps de 10 minutes les consommations de gaz, ce que nous ne savions pas encore faire à l'époque de cette campagne. Nous n'avons donc pas pu obtenir directement cette information.

Toutefois, on dispose de relèves périodiques manuelles du compteur GDF. Ce qui suit est donc uniquement basé sur ces relèves.

Pour calculer la consommation théorique de gaz, nous avons déterminé, pour les périodes avec et sans chauffage, un rendement de génération moyen qui est le rapport de l'énergie utile pour le chauffage et l'ECS (mesurée par les deux compteurs de chaleur en amont de la chaudière), à l'énergie mesurée sur le compteur de gaz dans le même intervalle de temps.

Le tableau de la figure 2.16 donne les rendements de production ainsi obtenus, hors saison de chauffe (début mai à septembre) et en saison de chauffe (mi octobre 2009 à fin novembre 2009)

Plusieurs remarques s'imposent :

- les rendements ne sont pas très élevés, sauf peut-être pour le 53 Runtz,
- très légitimement les rendements sont plus faibles en été qu'en hiver du fait d'une intermittence très forte,
- les valeurs obtenues pour l'immeuble du 13 rue des Vosges laissent très perplexe. Elles sont beaucoup trop faibles et il est peu probable, mais cela reste à vérifier, que ce rendement catastrophique soit le seul fait du générateur de chaleur (il est vrai que dans cet immeuble la demande a été très faible, et donc l'intermittence forte, ce qui dégrade le rendement annuel d'exploitation). Nous pensons que le générateur n'est pas la seule cause de « glissement » du rendement en sous charge, mais que tout le circuit primaire, sa longueur, son \varnothing , son volume d'eau, son niveau d'isolation, etc. sont des éléments qui vont jouer un rôle important dans la détermination du rendement de génération. Car à chaque arrêt, puis relance du chauffage, il faut réchauffer tout ce circuit qui se refroidit ensuite à pertes dès l'arrêt du générateur. Et l'impact de l'intermittence est d'autant plus important que les besoins sont faibles, ce que semble parfaitement montrer ces valeurs.

- ces résultats doivent être manipulés avec précaution car le mode de calcul reste un peu approximatif, et le principal problème réside dans l'absence de relevés continus de la consommation de gaz. Mais il est probable qu'ils mettent le doigt sur un problème jamais évoqué et bien réel : celui du surdimensionnement des équipements et des conséquences de ce surdimensionnement sur le rendement annuel de génération.

	33 Maçons	13 Vosges	31 Vosges	53 Runtz
Rendement été	70%	53%	81%	92%
Rendement hiver	79%	54%	90%	96%

Figure 2.16 : Rendements de production de chaleur

II.4.2 Consommation de gaz des bâtiments (énergie primaire)

Le calcul de l'énergie primaire (gaz) nécessaire à la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire s'appuie donc sur les rendements de production définis au paragraphe précédent, avec toutes les incertitudes que cette méthode comporte, et sur le partage de la consommation totale au prorata des deux compteurs de chaleur sur le départ. Considérons qu'il s'agit d'une première approche qui mériterait d'être confirmée par des relevés complémentaires en continu sur la consommation de gaz.

Sur ces bases, la figure 2.17 représente les consommations de gaz (énergie primaire) des 4 bâtiments pour la production de **chauffage**. La consommation annuelle moyenne est de **84 kWh/an/m²**, sachant que l'objectif était de **50 kWh/m²/an**. Il n'est par conséquent pas atteint en moyenne. Seul l'immeuble du 13 Vosges l'atteint, mais l'occupation n'a pas été très régulière. Quant à l'immeuble du 53 Runtz, il n'a pas fait l'objet d'un suivi de mesures continu mais seulement de relèves et la valeur obtenue (120 kWh/m²/an) paraît suspect. Un complément d'investigations devrait être conduit sur cet immeuble au moyen d'un système de métrologie plus complet. Si l'on exclut ce bâtiment, **la consommation moyenne d'énergie primaire pour le chauffage des bâtiments effectivement suivis est de 71 kWh/m²Shab/an**.

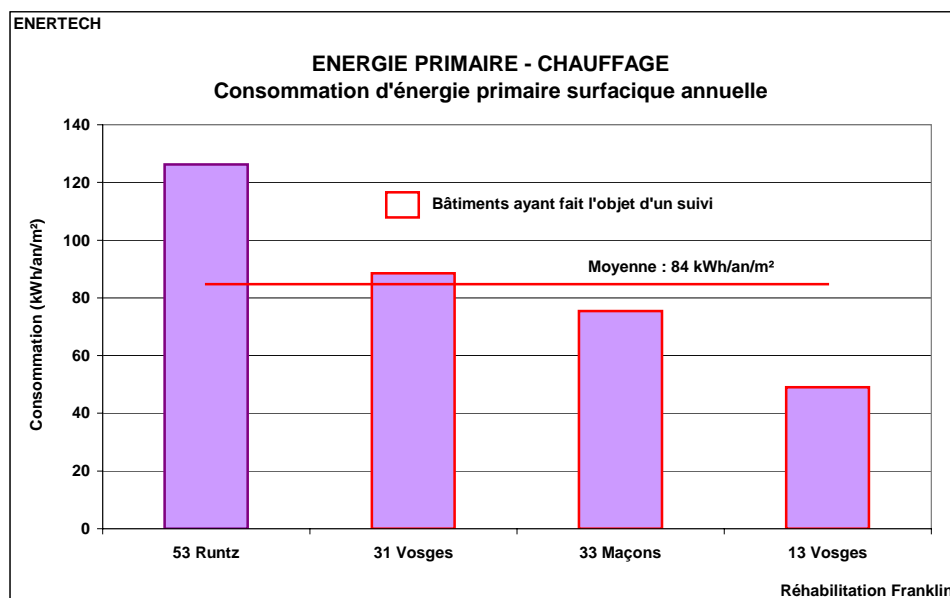


Figure 2.17 : Consommation spécifique de gaz (énergie primaire) pour le chauffage

La figure 2.18 reprend ce résultat mais en le comparant, pour chaque opération, à la consommation d'énergie utile. Peut-être n'est-ce qu'une coïncidence, mais toujours est-il que plus la charge (énergie utile) est faible, plus le rendement (traduit ici par l'écart entre énergie primaire et énergie utile) se dégrade. Cette observation est en tout cas conforme à la théorie : mais on est surpris de l'ampleur

de la dégradation traduite par ce graphique. Ce résultat n'est pas choquant, mais il est étonnant et mériterait de faire l'objet d'autres travaux permettant de le valider ou de l'infirmier.

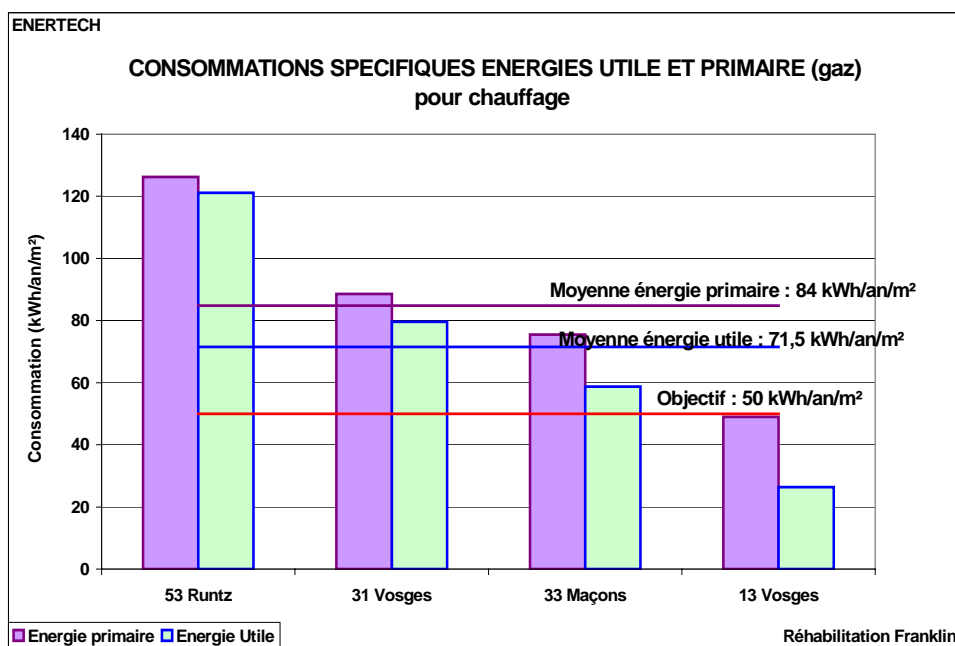


Figure 2.18 : Comparaison entre consommation spécifique d'énergie primaire et d'énergie utile pour le chauffage

La consommation de gaz (énergie primaire) pour la production d'ECS (figure 2.19) est en moyenne de **21 kWh/an/m²** avec un minimum de 14 et un maximum de 27 kWh/an/m². L'objectif de 30 kWh/m²Shab/an, est atteint. Ce bon résultat peut être dû à une réduction des volumes d'eau puisée (qui aurait pour origine les limiteurs de débit qui ont été posés, mais cela reste à valider) et la présence des capteurs solaires qui ont réduit, notamment en été lorsque les rendements de production sont très dégradés, la consommation de gaz.

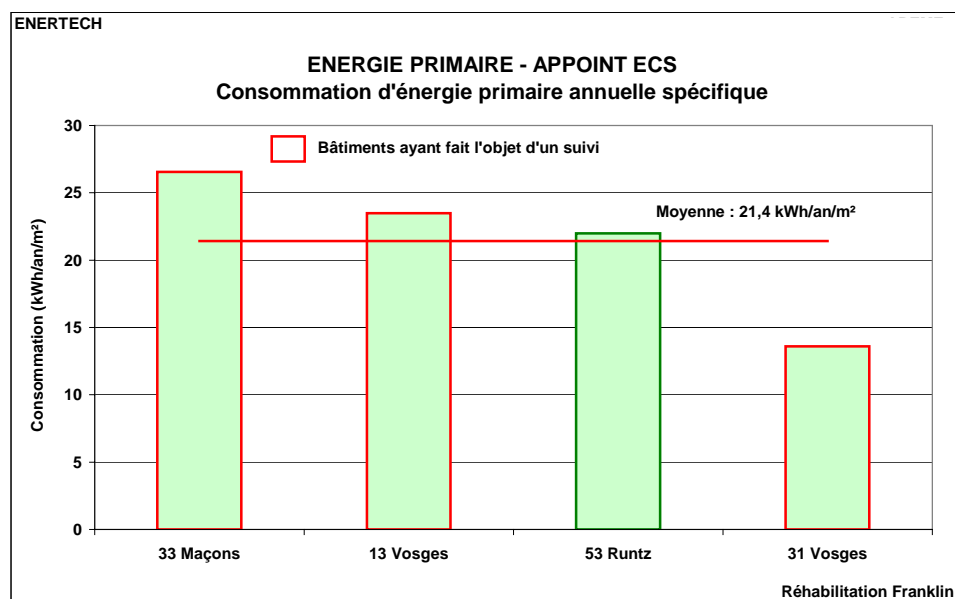


Figure 2.19 : Consommation spécifique de gaz (énergie primaire) pour l'appoint ECS

La figure 2.20 représente la consommation totale de gaz pour le chauffage et l'ECS. Sur l'ensemble des bâtiments pour lesquels on dispose d'éléments, la moyenne est de **106 kWh/an/m²_{Shab}** avec un

minimum de 72 kWh/m²/an (13 Vosges) et un maximum de 148 kWh/m²/an (53 Runtz). La part du chauffage est comprise entre 61 % (33 Maçons) et 79 % (31 Vosges). A nouveau le cas du 53 Runtz doit être mis à part puisque c'est le seul bâtiment pour lequel nous n'avons pas de suivi de mesure en continu. Si on exclut le cas de ce bâtiment, la consommation moyenne n'est plus que de **92 kWh/an/m²_{Shab}**. En rapprochant cette valeur des objectifs de 50+ 30 = 80 kWh/an/m²_{Shab} on observe un dépassement brut de 15 %. Mais il est clair que la faible taille de l'échantillon ne permet pas d'un point de vue scientifique de tirer des conclusions fiables des résultats qui précèdent. Il faudrait avoir suivi au moins une douzaine de logements, de manière complète et sans perte d'information, pour pouvoir tirer des conclusions plus solides de cette expérimentation.

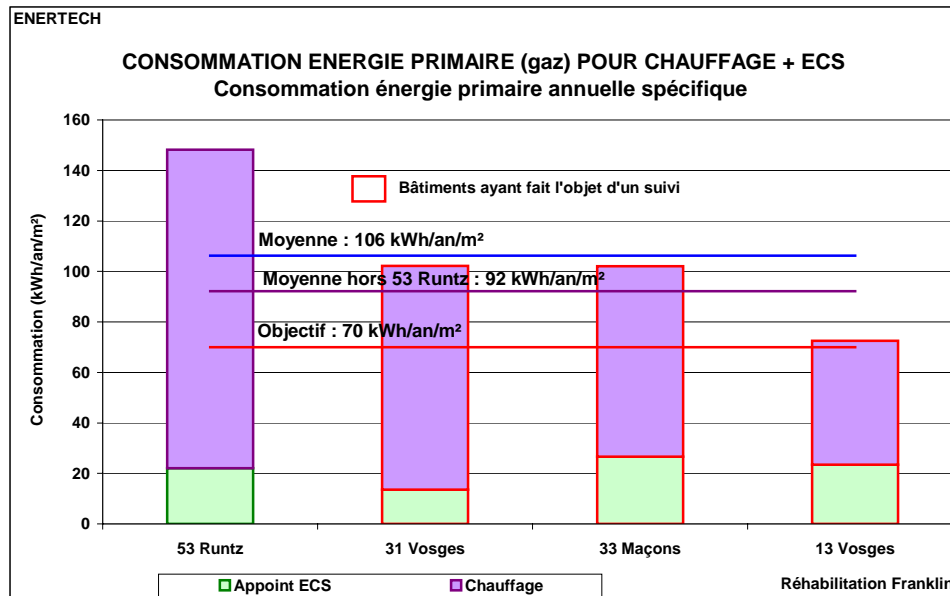


Figure 2.20 : Consommation d'énergie primaire annuelle surfacique pour chauffage+ECS

II.4.3 Explication des divergences entre consommations mesurées et prévues de chauffage

Ce qui précède montre que les performances globales pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des bâtiments suivis de manière fiable sont assez encourageantes : 92 kWh/m²Shab/an (ou 106 selon que l'on inclut ou non le 53 Runtz) au lieu de 80. Il faut conserver à l'esprit que cette opération du quartier Franklin à Mulhouse est la première de France : le travail a démarré en 2005 à une époque où personne ne parlait encore de rénovation à basse consommation. C'est donc une opération de défrichage qui a eu lieu, d'expérimentation totale à un niveau de performance qui, rappelons-le, visait à amener la consommation de chauffage des logements rénovés à la moitié de la consommation des logements neufs construits alors ! Qu'on pardonne aux acteurs de ce projet si l'objectif visé n'est pas parfaitement atteint, d'autant plus qu'il y a de nombreuses explications que nous allons maintenant passer en revue et qui éclairent cette performance d'un jour très différent.

Si l'on considère brutalement les résultats, les performances obtenues pour le chauffage peuvent ne pas paraître très satisfaisantes : la figure 2.16 nous montre que la consommation d'énergie primaire est de 84 kWh/m²Shab/an, ou de 71 si l'on exclut l'immeuble du 53 Runtz, mais tout ceci est supérieur à la valeur de 50 kWh/m²Shab/an envisagée. Quelles raisons peuvent être objectivement invoquées pour expliquer ce dérapage ?

- La première est évidemment la température de consigne maintenue dans les immeubles pendant l'hiver. Il faut rappeler que la température réglementaire fixée par le Code de la Construction et de l'Habitation est de 19°C. Mais elle est rarement respectée, pour des raisons en général assez peu rationnelles fondées sur l'habitude acquise par les usagers dans les immeubles anciens pas isolés. Il faut néanmoins savoir que dans des bâtiments à très faible consommation comme ceux du quartier Franklin, l'augmentation de température coûte très cher : **chaque degré supplémentaire conduit à une**

augmentation de 15 % de la consommation de chauffage. Ceci est dû au rôle majeur que jouent les apports gratuits dans les bâtiments performants.

■ La seconde explication est importante : en phase de conception, nous n'avons pas souhaité que les architectes travaillent sur la question de l'étanchéité à l'air au-delà de la jonction menuiserie/maçonnerie. Pour comprendre cette position de principe, il faut se souvenir qu'à l'époque, l'étanchéité à l'air était en France un sujet très mal connu, et nous avons pris le parti de concentrer nos efforts sur la mise en oeuvre d'isolation renforcée d'une part et sur l'intégration dans le bâti existant d'une ventilation double flux d'autre part. Nous estimions alors que c'était déjà suffisamment délicat pour la maîtrise d'oeuvre. Par voie de conséquence, le test d'étanchéité à l'air qui a été fait dans les bâtiments rénovés n'a pas été excellent : le n_{50} n'a jamais été inférieur à 5 vol/h (sous 50 Pa). Seule satisfaction : peu de fuites au droit des menuiseries, mais une perméabilité impressionnante de tous les fourreaux notamment les fourreaux électriques.

Cette très mauvaise perméabilité à l'air de l'enveloppe a une conséquence directe sur la consommation d'énergie pour le chauffage puisque chaque vol/h supplémentaire du n_{50} conduit à une augmentation de consommation de 4 kWh/m²Shab/an. Si l'on suppose que la performance qui aurait pu être atteinte par le n_{50} est de 1,0 vol/h au lieu de 5, c'est une réduction de 16 kWh/m²Shab/an que l'on aurait pu attendre et qui explique le dérapage majeur des consommations de chauffage de notre échantillon.

■ La dernière explication apparaîtra dans le chapitre 3. Il s'avère en effet que les consommations d'électricité domestique, qui constituent par ailleurs des apports gratuits significatifs, ont été beaucoup moins importantes que prévues. C'est une bonne nouvelle en ce sens que les consommations électrodomestiques commencent enfin à régresser, mais cela conduit à augmenter la consommation de chauffage par rapport aux prévisions qui avaient été faites dans les simulations dynamiques et qui étaient fondées sur des campagnes de mesures conduites il y a maintenant près de 10 ans sur les consommations des appareils ménagers.

La figure 2.21 représentent les corrections et explications de la consommation énergétique de chauffage pour les deux logements pour lesquelles nous disposons de toutes les informations nécessaires.

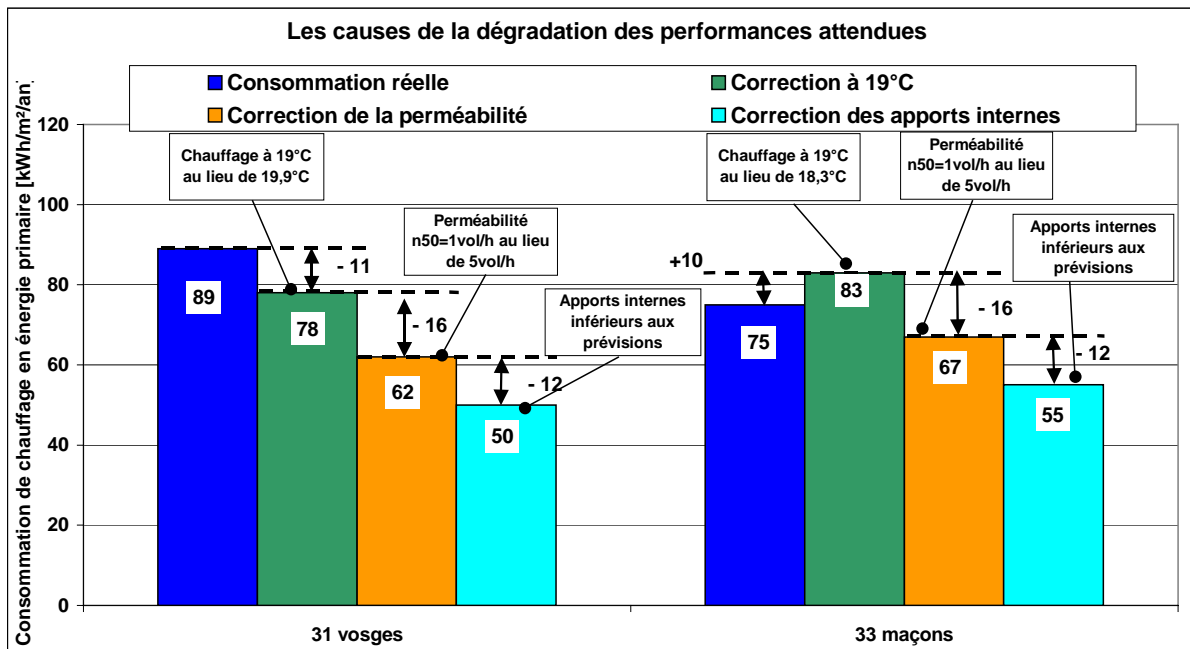


Figure 2.21 : Explication des écarts de consommation réelle et envisagée de chauffage

On observe que :

- la température n'a excédé 19°C que dans l'un des deux bâtiments. Les corrections que nous avons apportées pour revenir au niveau de la consigne à 19°C conduisent donc à une augmentation de consommation dans un cas et à une baisse dans l'autre,

- l'impact de la réduction des consommations électroménagères est très sensible : 12 kWh/m²Shab/an.

Le bilan final de l'ensemble de ces corrections conduit à des valeurs très proches des valeurs cibles : 50 kWh/m²Shab/an pour le 31 Vosges, et 55 kWh/m²Shab/an pour le 33 Maçons.

Et les autres bâtiments ? On aurait bien aimé avoir l'ensemble des informations nécessaires pour pouvoir faire le même type d'analyse. Et on ne peut que regretter l'étroitesse des informations dont on dispose. Ceci plaide pour de larges campagnes de mesures, fondées sur un suivi fiable de nombreux paramètres (dont, comme on le voit, les consommations électrodomestiques).

La leçon qu'il faut retenir de ce qui précède est qu'il est toujours très délicat de prévoir une consommation de chauffage, et ceci est d'autant plus vrai que les bâtiments sont très performants. En effet de nombreux paramètres interviennent et leur impact devient de plus en plus important en valeur relative au fur et à mesure que les besoins des bâtiments se réduisent. Ce qui était auparavant un phénomène marginal, comme les défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe, devient désormais un phénomène dominant. On a vu dans ce qui précède que le défaut d'étanchéité à l'air de l'enveloppe conduit à une surconsommation de 16 kWh/m²Shab/an soit près du tiers de la valeur cible. C'est considérable. On voit aussi le rôle très important des apports gratuits, qu'ils soient électrodomestiques ou solaires. Et on comprend qu'il n'est plus possible de raisonner uniquement sur la consommation de chauffage des bâtiments sans avoir une approche extrêmement fine des consommations électriques. Or celles-ci sont en pleine évolution avec l'arrivée progressive de matériels de plus en plus performants dans certains secteurs (froid, lavage, éclairage) qui peut avoir comme conséquence... l'augmentation de la consommation de chauffage par réduction des apports gratuits.

Il est nécessaire d'avoir tous ces paramètres à l'esprit pour pouvoir juger correctement de l'opération de rénovation du quartier Franklin.

11.5 TAUX DE CHARGE DES CHAUDIERES

Le taux de charge d'une chaudière ne peut être dissocié de l'intervalle de temps considéré pour son évaluation. C'est ainsi qu'on peut définir un taux de charge instantané, ou un taux de charge annuel. Dans ce qui suit nous allons raisonner (à cause de la précision un peu insuffisante des compteurs de chaleur) avec le **taux de charge horaire** que nous définirons comme le rapport de l'énergie fournie par la chaudière en une heure pour le chauffage et l'ECS, à l'énergie qui aurait été produite à pleine puissance pendant cette heure. Il permet donc de caractériser l'adéquation, au cours d'un intervalle de temps déterminé, de la chaudière avec les besoins réels du bâtiment.

Si nous nous intéressons au taux de charge des chaudières, c'est parce que le rendement des chaudières décroît fortement lorsque le taux de charge baisse. Une chaudière a un bon rendement lorsqu'elle est à pleine charge, mais ce rendement peut être divisé par un facteur deux ou trois à charge partielle faible. Rappelons aussi que les chaudières étudiées assurent chauffage et production ECS.

Les courbes de fréquences cumulées de ces taux apparaissent sur la figure 2.22. Le fait que les courbes ne soient pas « lisses » s'explique par le poids d'impulsion trop élevé des compteurs de chaleur : une impulsion correspond à 1 kWh ce qui est trop peu précis pour cette taille de bâtiment dont les besoins sont faibles. Seuls les cas du 31 rue des Vosges et du 33 rue des Maçons sont représentés. À cause de problèmes survenus sur le compteur du 13 rue des Vosges, ce bâtiment n'a pas pu être étudié.

Deux éléments sont intéressants pour chacune de ces courbes : la valeur maximale du taux de charge au cours de l'année, et le taux de charge annuel moyen.

Rappelons au préalable que la puissance de la chaudière du 31 rue des Vosges est de 35 kW et celle du 33 rue des maçons de 15 kW, alors que la surface des bâtiments à chauffer est sensiblement la même (204 m² pour la rue des maçons et 184 m² pour la rue des Vosges). Les puissances spécifiques installées sont donc respectivement de 172 et de 82 W/m²_{shab}.

Le taux de charge maximum atteint au cours de l'année est de 70 % de la puissance maximale pour le 33 rue des Maçons et de 30 % pour le 31 rue des Vosges. Les chaudières sont à l'arrêt complets entre 40 et 50% du temps. Les courbes de fréquences cumulées des puissances appelées (figure 2.23) fournissent la même information que précédemment, mais au lieu d'afficher les appels de puissance en fonction de la puissance maximale de la chaudière, elles indiquent les puissances intrinsèques. Pour la rue des Maçons et pour la rue des Vosges, la puissance maximale est la même : 10,5 kW !

Première conclusion : toutes les chaudières en place sont surdimensionnées d'au moins 50 %, et cette valeur peut atteindre 330 % ! La première conséquence pratique de ce surdimensionnement est un surcoût à la fois de la production de chaleur, mais aussi bien sûr de la distribution et de l'émission de chaleur.

Seconde conclusion : la puissance spécifique maximale nécessaire est de 51,6 W/m² pour la rue des maçons, et de 57,2 W/m² pour la rue des Vosges. Ces ordres de grandeur (ici en moyenne 55 W/m²) doivent être conservés à l'esprit par les concepteurs. On trouve trop souvent, pour ces mêmes postes chauffage+ECS, des puissances beaucoup plus importantes qui seront pratiquement toujours, pour ce type de bâtiment, le signe d'un surdimensionnement.

Troisième conclusion : c'est toujours moins cher à installer et plus performant de ne jamais surdimensionner les installations de chauffage et d'eau chaude sanitaire.

Le taux de charge annuel moyen des chaudières du 31 rue des Vosges et du 33 rue des Maçons est respectivement de 12 et 20 %. Ces deux valeurs sont faibles et elles conduisent à une dégradation du rendement annuel d'exploitation.

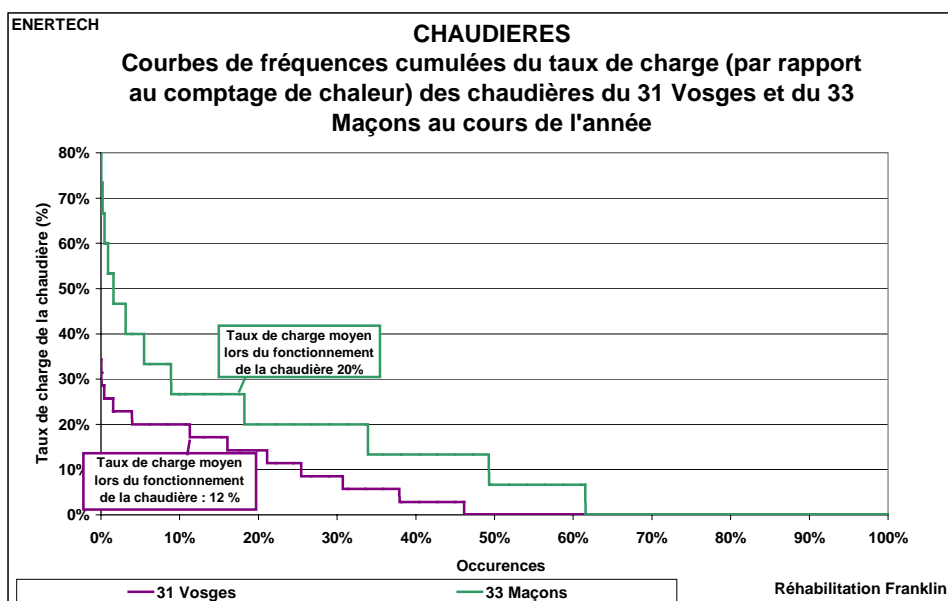


Figure 2.22 : Courbes de fréquences cumulées du taux de charge horaire des chaudières du 31 Vosges et 33 Maçons (tous usages confondus)

La figure 2.23 met aussi en évidence que les puissances moyennes livrées par les chaudières du 31 rue des Vosges et du 33 rue des Maçons sont au cours de l'année respectivement de 4,2 kW (pour une chaudière fait 35 kW) et de 3,0 kW (pour une chaudière de 15 kW).

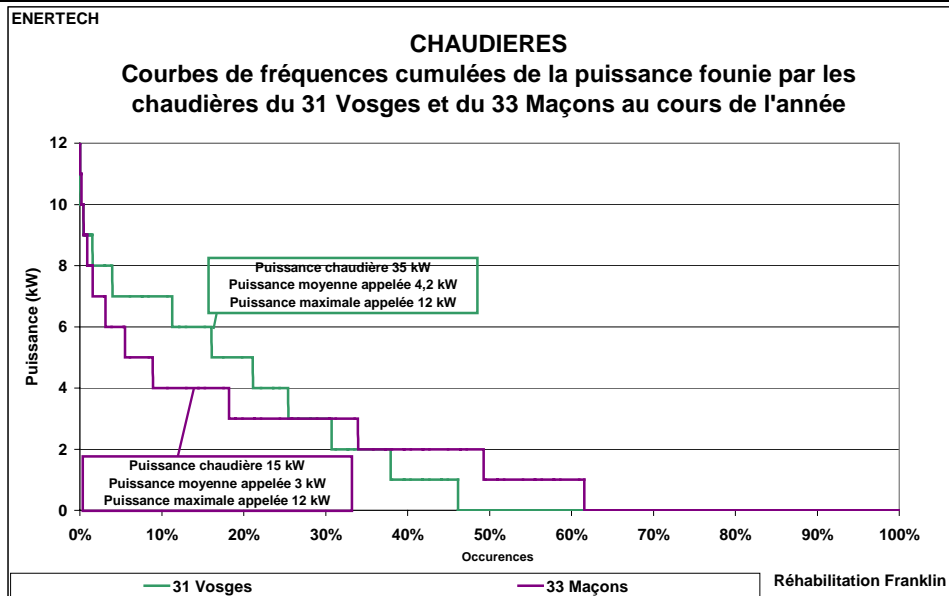


Figure 2.23 : Courbes de fréquences cumulées de la puissance délivrée par les chaudières du 31 Vosges et 33 Maçons (tous usages confondus)

Les figures 2.24 et 2.25 représentent, respectivement pour le 31 rue des Vosges et pour le 33 rue des Maçons, les deux courbes de fréquences cumulées du chauffage d'une part, et de l'eau chaude sanitaire d'autre part.

La conclusion est la même : l'eau chaude sanitaire, dans ces bâtiments, n'a pas encore atteint le même niveau que le chauffage, malgré la très forte isolation. Ceci s'explique d'abord par la rigueur du climat alsacien, mais aussi par les performances de grande qualité obtenues sur la consommation de gaz nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire.

Ceci signifie qu'on pourrait probablement encore réduire la puissance installée de la chaudière en la ramenant aux seuls besoins de chauffage (soit de l'ordre de 50 W/m²) en donnant une priorité à la production d'eau chaude sanitaire. L'inertie du bâtiment et sa très forte isolation lui confèrent une très forte constante de temps. Ceci a pour conséquence une très lente baisse de la température lorsque la production de chauffage est momentanément arrêtée. Ce faisant, on augmenterait le taux de charge des chaudières, et donc le rendement annuel de la génération de chaleur qui est aujourd'hui très dégradé.

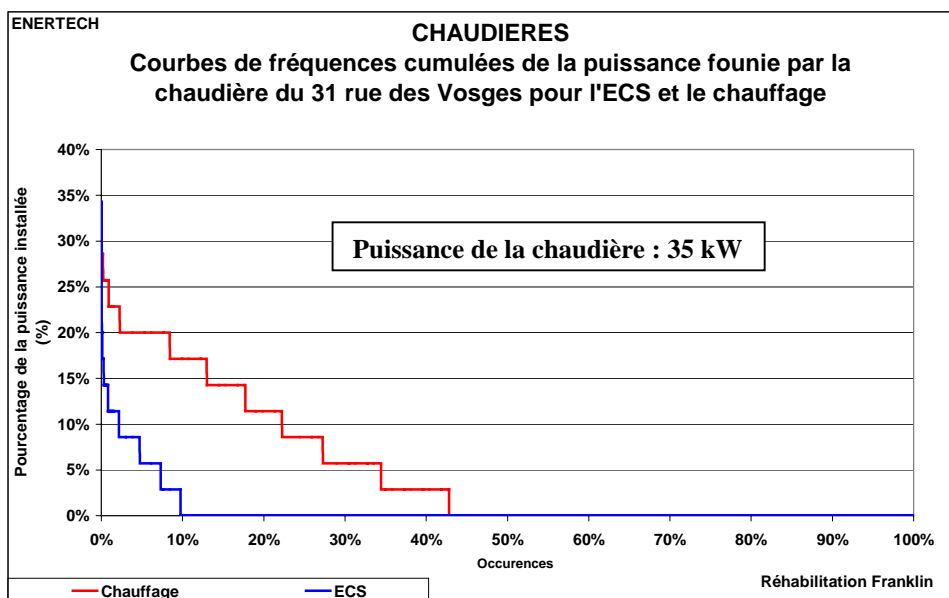


Figure 2.24 : Courbes de fréquences cumulées du taux de charge horaire de la chaudière du 31 rue des Vosges pour le chauffage et pour l'ECS

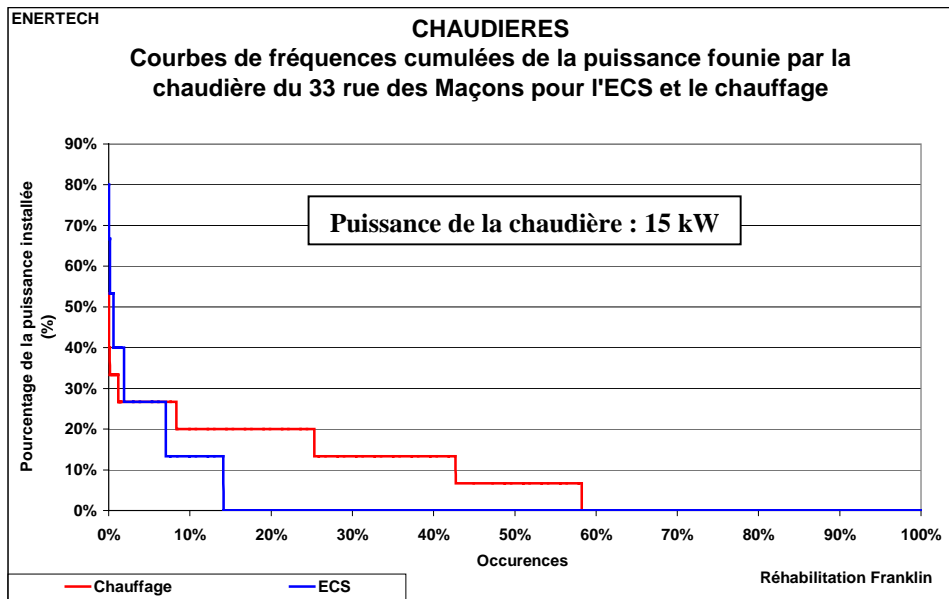


Figure 2.25 : Courbes de fréquences cumulées du taux de charge horaire de la chaudière du 33 rue des Maçons pour le chauffage et pour l'ECS

Partie III : Etude des consommations électriques des services généraux

III.1 CONSOMMATIONS ELECTRIQUES DES SERVICES GENERAUX

Les services généraux des bâtiments étudiés concernent les usages suivants :

- La chaudière
- La pompe de chauffage
- Les pompes ECS (solaire et appoint)
- La ventilation double flux
- L'éclairage des parties communes
- Le portier
- L'éclairage de sécurité

La consommation électrique moyenne des services généraux des différents bâtiments est de **2 857 kWh/an**, ou **17,7 kWh/an/m²_{shab}** soit encore **992 kWh/an/log**. Ces valeurs sont très élevées. En moyenne française, la consommation d'électricité des services généraux dans les logements sociaux est de 700 kWh/logt/an. Il y a donc une anomalie ici. Malheureusement, il va être difficile d'être très précis dans l'analyse, car la campagne de mesure ne devait comporter qu'un seul mesureur global et pas de sous comptage. On ne sait donc pas avec précision ce qui consomme quoi. Quoiqu'il en soit, les valeurs auxquelles on parvient en construction neuve avec les mêmes types d'équipement (VMC double flux, chauffe-eau solaire, etc) sont plutôt de 10 à 12 kWh/m²_{shab}/an.

Ramenées aux surfaces habitables des bâtiments, les consommations d'électricité des parties communes varient d'une opération à l'autre dans un rapport de 1 à 3,2, avec une valeur minimale de 8,9 kWh/an/m² pour le 31 rue des Vosges et 28 kWh/an/m² pour le 33 rue Maçons.

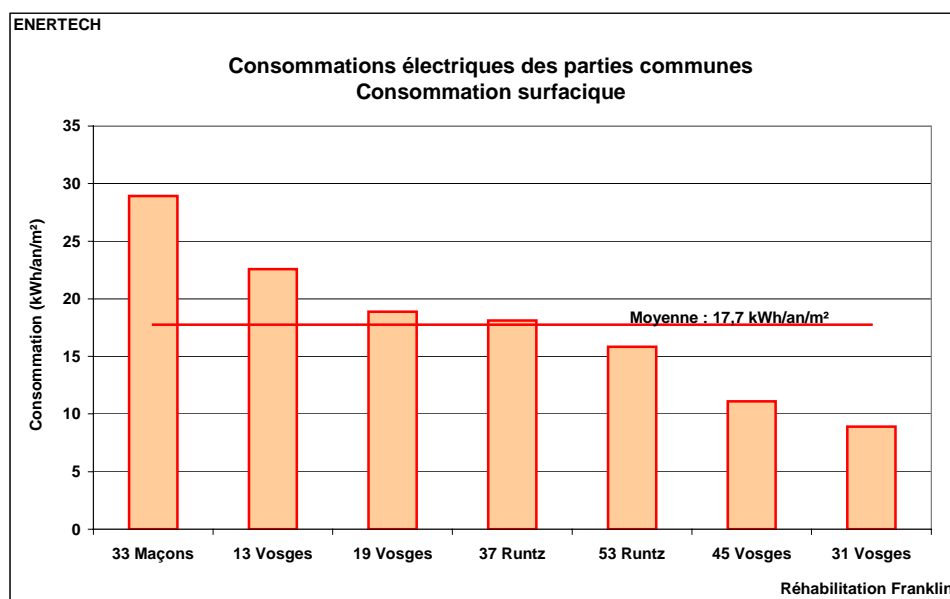


Figure 3.1 : Consommations électriques annuelles surfaciques des parties communes (référées à la surface habitable des bâtiments)

Le graphique de la figure 3.2 indique les consommations annuelles des services généraux par logement. On note des écarts importants (de 1 à 2,1). Ces valeurs sont globalement élevées par comparaison aux résultats obtenus pour d'autres immeubles ayant déjà fait l'objet d'un suivi (figure 3.3).

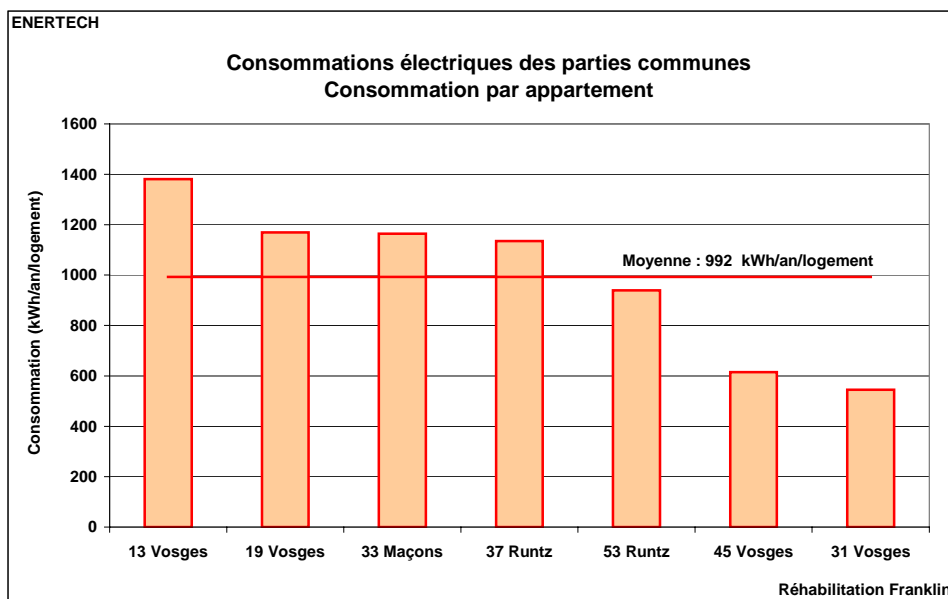


Figure 3.2 : Consommations électriques annuelles par logement des parties communes

La figure 3.3 représente les consommations annuelles par logement pour des opérations déjà suivies en France. La consommation moyenne est de 884 kWh/an/logement, et de 801 kWh/an/logement si l'on excepte les opérations mulhousiennes, dont la majorité ont des consommations supérieures à la moyenne. Leurs consommations sont même supérieures à celles d'opérations possédant un parking. Les deux seuls bâtiments du quartier Franklin ayant des consommations de bonne qualité sont ceux du 31 et du 45 rue des Vosges.

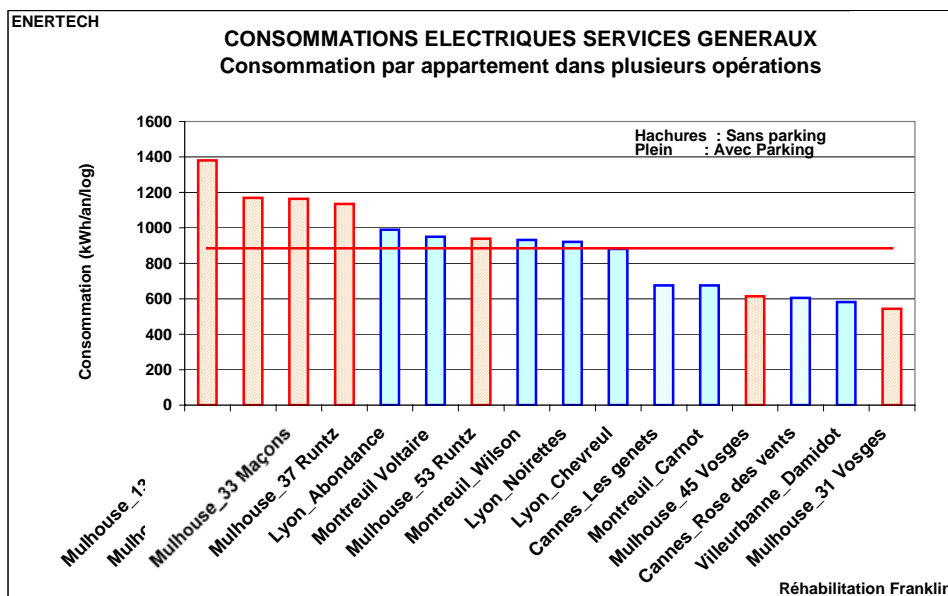


Figure 3.3 : Consommations électriques annuelles par appartement des parties communes de plusieurs opérations

Evidemment, si la consommation d'électricité des services généraux est élevée c'est aussi parce que les bâtiments disposent de ventilation double flux et d'une production d'eau chaude par capteurs solaires nécessitant le fonctionnement quasi permanent de plusieurs pompes. Mais il est troublants de

noter que les deux opérations dont la consommation est la plus faible sont aussi les deux seules disposant d'un système de ventilation de marque Lemmens REC HR1 alors que les autres ont des systèmes de marque Sytemair VR 700 EV, et de chauffe-eau solaire de marque De Dietrich Pro alors que les autres ont tous des systèmes de marque Visseman Vitrosol 100. Ceci ne constitue en rien une preuve. C'est seulement un indice. Il conviendrait d'examiner plus en avant comment ont été choisis les ventilateurs (sur puissance ou non), s'ils sont à vitesse variable, comment ont été choisies les pompes du chauffe-eau solaire, comment est-ce qu'elles sont asservies... Il peut s'agir autant d'un problème de matériel inadapté, que d'un problème de mise en oeuvre incorrecte, c'est-à-dire sans la possibilité d'arrêter ou de faire varier la vitesse des pompes et les ventilateurs. Il est probable que les différences importantes de consommation d'un bâtiment à l'autre s'expliqueront après analyse de ces paramètres.

III.2 VARIATION DE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DES SERVICES GENERAUX

III.2.1 Evolution mensuelle de la consommation

Deux mesureurs des consommations électriques des services généraux ont été arrachés pendant la campagne de mesure, entraînant la perte partielle de données pour deux bâtiments. Mais grâce aux relèves manuelles d'index des compteurs et à l'étude de la saisonnalité de la consommation il a été possible de reconstituer les données manquantes par extrapolation afin d'avoir un profil de consommation continu.

Les figures 3.4 et 3.5 représentent l'évolution de la consommation électrique des services généraux au cours de l'année.

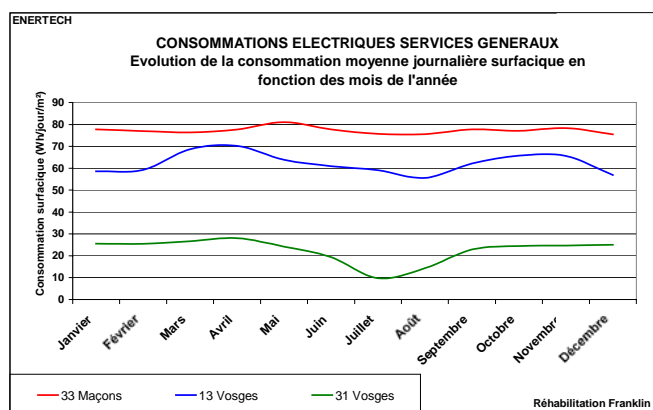


Figure 3.4 : Consommation spécifique moyenne journalière des services généraux pour chaque mois de l'année

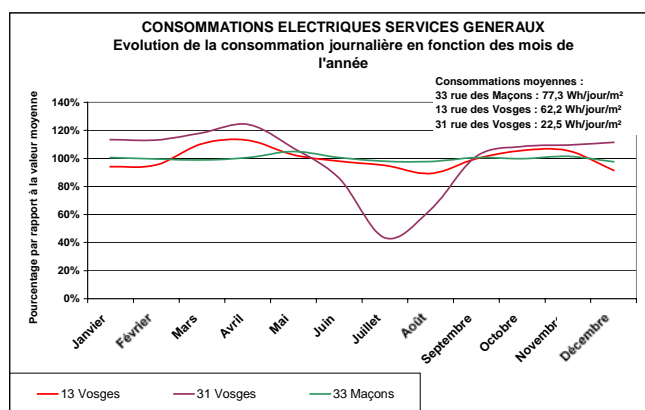


Figure 3.5 : Consommation spécifique moyenne journalière des services généraux pour chaque mois de l'année (en % de la valeur moyenne annuelle)

D'une manière générale, il existe une faible saisonnalité de la consommation à l'exception du bâtiment situé au 31 rue des Vosges. La consommation du 33 Maçons (bâtiment le plus consommateur) varie seulement de quelques pourcents au cours de l'année.

Le 31 rue des Vosges est à la fois l'immeuble le plus performant et celui dont la saisonnalité est la plus forte puisque la plage de variation entre hiver et été est de 1 à 2,9. En rapprochant cette information de celle de la figure 2.11, on peut expliquer la baisse de consommation estivale par la moindre productivité du chauffe-eau solaire, elle-même liée à la moindre consommation d'eau due à une présence réduite dans l'immeuble pendant l'été. Ce faisant les pompes solaires ont moins été utilisées, ce qui explique la variation des consommations d'électricité.

La figure 3.6 représente les courbes de fréquences cumulées des puissances appelées par les services généraux des différents bâtiments.

La puissance appelée par le 33 rue des Maçons est toujours supérieure à celle des autres bâtiments.

C'est le bâtiment du 31 Vosges qui présente les variations de puissance les plus importantes avec un maximum à $5,3 \text{ W/m}^2_{\text{shab}}$ et un minimum de $0,094 \text{ W/m}^2_{\text{shab}}$ si l'on excepte deux arrêts complets des compteurs électriques des services généraux représentant au total près de 36 heures.

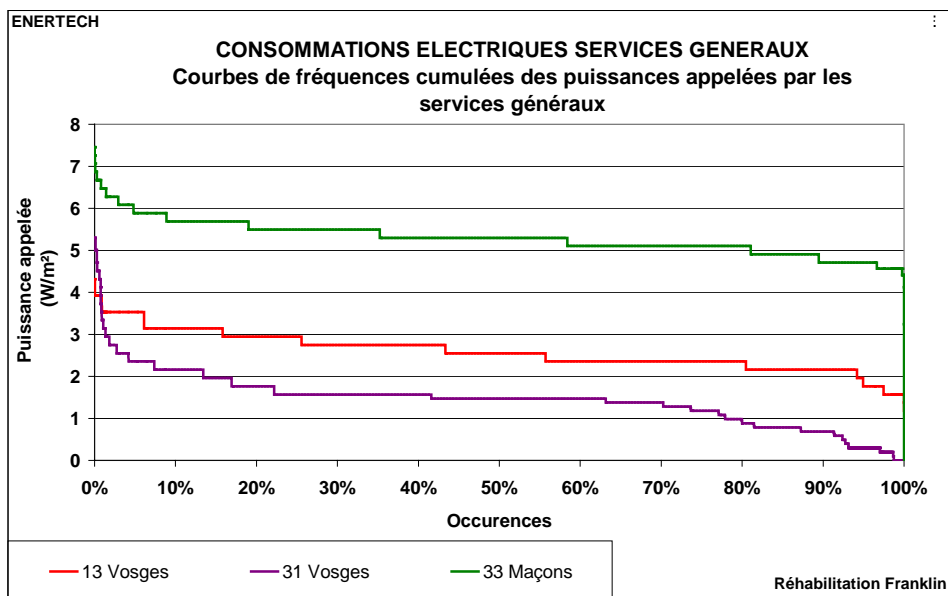


Figure 3.6 : Courbes de fréquences cumulées des puissances appelées par les services généraux

III.2.2 Courbe de charge journalière

Les figures 3.7 et 3.8 représentent les courbes de charge de la consommation électrique des services généraux des 3 bâtiments en été et en hiver. Les courbes de gauche représentent la charge en puissance et celles de droite la charge en pourcentage de la puissance journalière moyenne maximale.

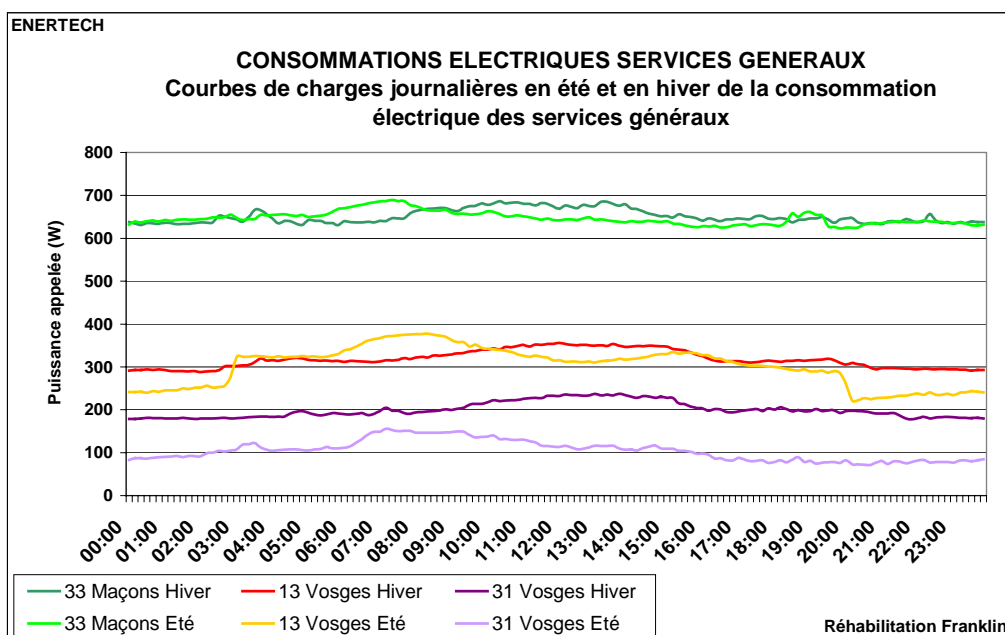


Figure 3.7 : Courbe de charge journalière en été et en hiver de la consommation électrique des services généraux

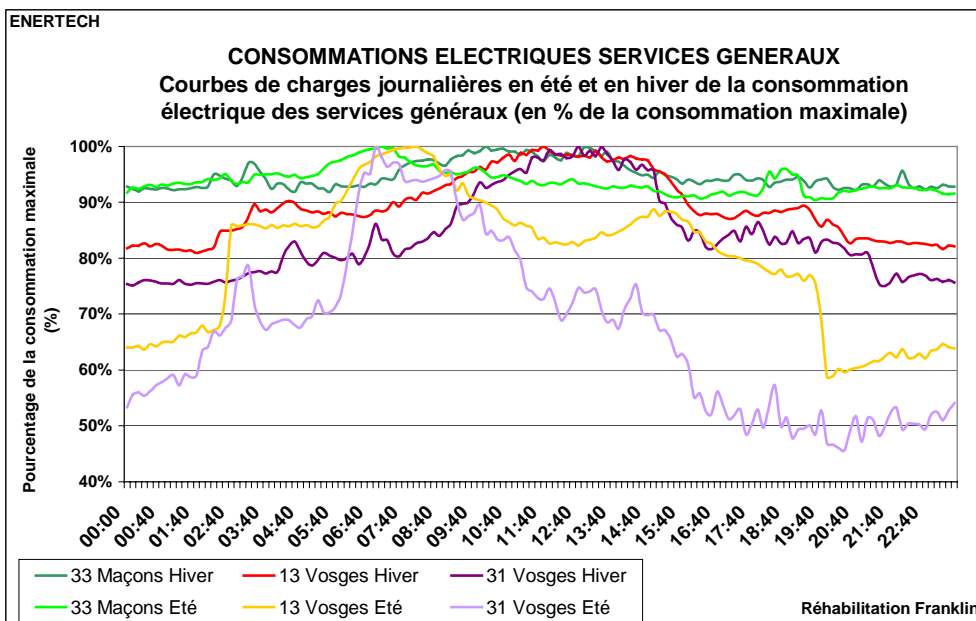


Figure 3.8 : Courbes de charges journalières en été et en hiver de la consommation électrique des services généraux (en % de la consommation maximale)

On observe que quelle que soit la saison, le bâtiment du 33 rue des Maçons appelle quasiment la même puissance au cours de la journée. On est certain que ni les pompes ni la ventilation ne bénéficient de variation de vitesse, ce qui est quand très regrettable....

A contrario pour le bâtiment situé au 31 rue des Vosges on note des variations de puissance pendant une journée et ce particulièrement en été. On a vu qu'il s'agissait sans grande ambiguïté du fonctionnement réduit des pompes du chauffe-eau solaire en été.

Partie IV : Etude des consommations électriques privatives des logements

Des « lecteurs optiques » avaient été posés sur le compteur électrique général de chaque logement afin de récupérer les informations de consommation au pas de temps de 10 minutes, mais deux ont été arrachés et un troisième mal positionné, ce qui a empêché un suivi correct des consommations dans ces trois logements. Il nous est cependant possible de connaître les consommations annuelles globales de tous les logements car nous avons relevé les index en début et fin de campagne de mesures.

La consommation moyenne d'électricité des 10 logements suivis est de 1 098 kWh/an (fig. 4.1). Elle varie entre 386 kWh/an et 1 890 kWh/an.

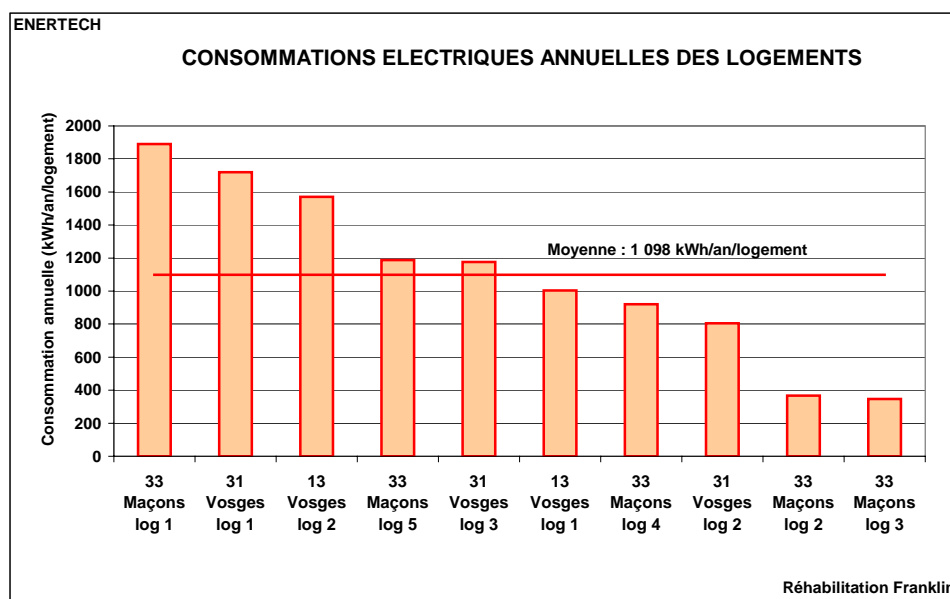


Figure 4.1 : Consommations électriques annuelles des logements

Ces niveaux sont extrêmement faibles et tout à fait inhabituels. Il faut se rappeler qu'en France la consommation moyenne d'électricité à usage spécifique est de 2600 kWh/an/logement. Les raisons peuvent être multiples. Il y a eu semble-t-il momentanément des étudiants dans ces logements. Ce qui explique une fréquentation réduite en été. Mais il se peut aussi que l'on soit en présence de familles aux revenus extrêmement modestes, et donc à l'équipement ménager très modeste lui-même. Comme aucun mesureur n'a été posé à l'intérieur des logements, on n'est pas en mesure de savoir quelle est la nature et la quantité des équipements de chaque logement, pas plus que leur qualité et leur capacité à être efficaces en énergie. L'une des conséquences indirectes de cette sous consommation a été évoquée au § II.4.3. Les apports de chaleur internes en hiver ont été minorés de 12 kWh/m²/an, ce qui a conduit à une augmentation de la consommation de chauffage par rapport aux valeurs prévisionnelles.

La valeur de 25 kWh/m²/an (fig. 4.2) pour la consommation annuelle surfacique est plus surprenante. En effet elle correspond à une valeur déjà rencontrée en logement social, mais il est vrai sans inclure l'usage cuisson comme ici à Mulhouse. Mais les logements sont plutôt de petite taille, et la consommation spécifique des petits logements est toujours plus élevée que celle des grands logements. Ceci pourrait constituer une explication.

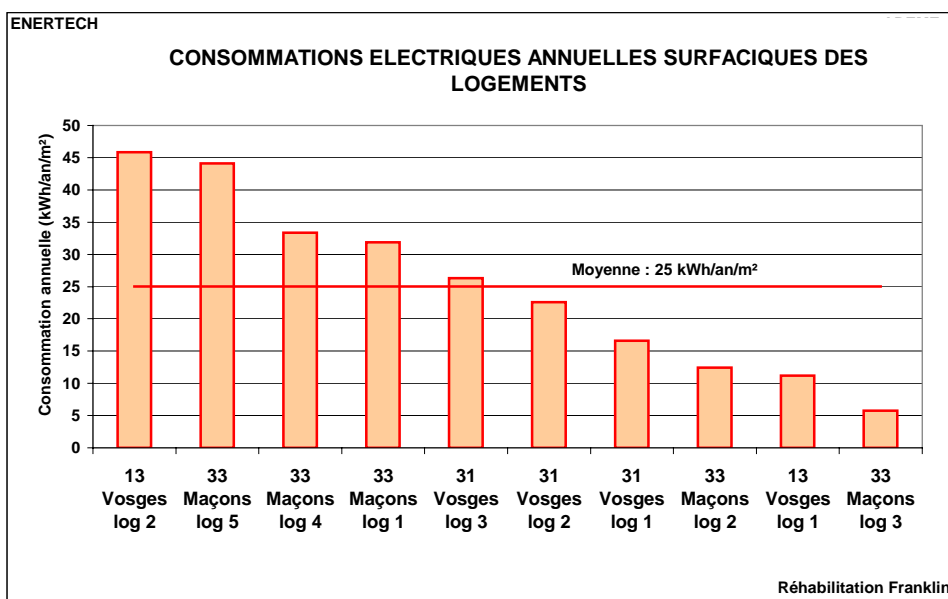


Figure 4.2 : Consommations électriques annuelles surfaciques des logements

Une autre explication se trouve dans les graphiques de la figure 4.3. Ils montrent sans ambiguïté que certains logements ne sont pas du tout occupés pendant plusieurs mois l'été, et que pour d'autres il y a, toujours en été, une baisse très marquée de la consommation électrique. Ces phénomènes concernent 3 des 7 logements de l'échantillon.

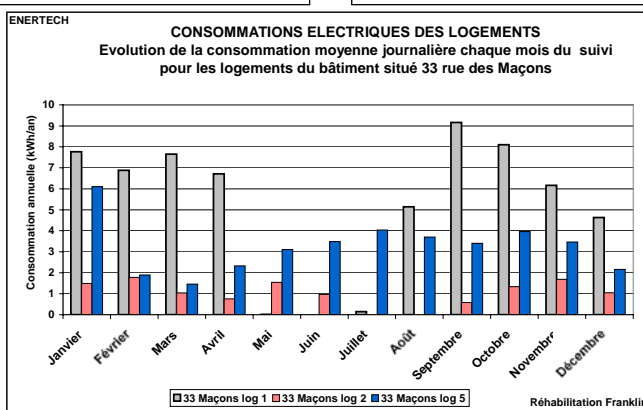
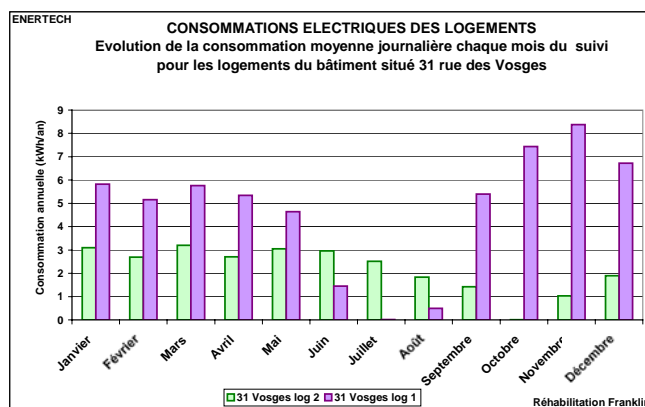
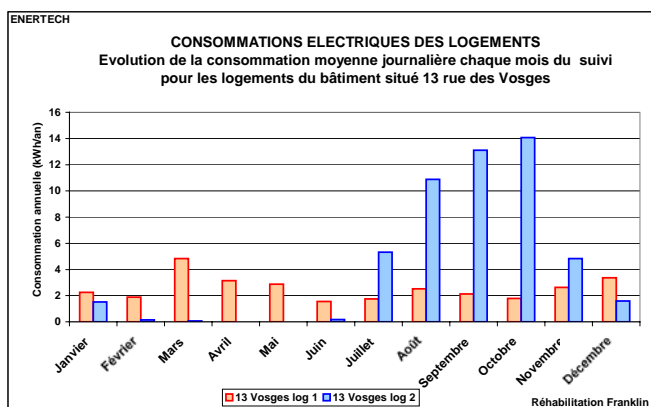


Figure 4.3 : Evolution de la consommation moyenne journalière d'électricité pour chaque mois de l'année dans les logements des différents bâtiments

Le tableau 4.4 donne les valeurs de puissances électriques appelées minimales/moyennes/maximales par chaque logement et pour chaque saison. On a défini les saisons comme suit :

- Eté : du 01/07/2009 au 31/08/2009
- Intersaison : du 15/03/2009 au 30/06/2009 et du 01/09/2009 au 11/09/2009
- Hiver : du 15/11/2008 au 15/03/2009 et du 12/09/2009 au 18/11/2009

		Eté		Inter saison		Hiver	
		Puissance (W)	Puissance surfacique (W/m²)	Puissance (W)	Puissance surfacique (W/m²)	Puissance (W)	Puissance surfacique (W/m²)
13 Vosges log 1	Moyenne	340	4	158	2	139	2
	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	2880	32	3072	34	3168	35
13 Vosges log 2	Moyenne	90	3	117	3	105	3
	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	2268	66	5346	156	2604	76
31 Vosges log 1	Moyenne	11	0	197	2	270	3
	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	696	7	4920	48	4560	44
31 Vosges log 2	Moyenne	91	3	100	3	84	2
	Min	24	1	0	0	0	0
	Max	408	11	456	13	936	26
33 Maçons log 5	Moyenne	160	6	123	5	140	5
	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	3408	127	3456	128	4500	167
33 Maçons log 1	Moyenne	112	2	197	3	275	5
	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	3168	53	3408	57	4158	70
33 Maçons log 2	Moyenne	0	0	43	1	58	2
	Min	0	0	0	0	0	0
	Max	0	0	2100	71	2184	74

Figure 4.4 : Tableau récapitulatif des valeurs de puissances électriques appelées minimales/moyennes/maximales par chaque logement et pour chaque saison

Partie V : Etude des températures dans les logements

V.1 TEMPERATURE EN HIVER

V.1.1 Températures observées

La figure 5.1 représente les courbes de fréquences cumulées de la température extérieure et des températures ambiantes dans les logements du 13 rue des Vosges sur l'ensemble de la période de chauffage. Deux ou trois sondes de température ont été installées dans chaque logement, et les valeurs utilisées dans ce qui suit sont les températures moyennes par logement au pas de temps de 10 minutes.

Le système de chauffage du logement 2 n'a pas fonctionné en début de saison de chauffe 2008/2009 ce qui a entraîné une température inférieure à 16°C pendant une longue période. Ce problème a disparu lors de la saison de chauffe 2009/2010. La température moyenne dans le bâtiment, hors dysfonctionnement, est de **21,9°C lors de la période de chauffe**. Dans le logement 2, les températures maintenues après le long dysfonctionnement sont toujours supérieures à 23°C ! Il s'agit peut être d'un débranchement du système de régulation terminale. Des températures excessivement hautes (de l'ordre de 23°C) ont également été observées dans le logement 1 en début de saison de chauffe 2009/2010.

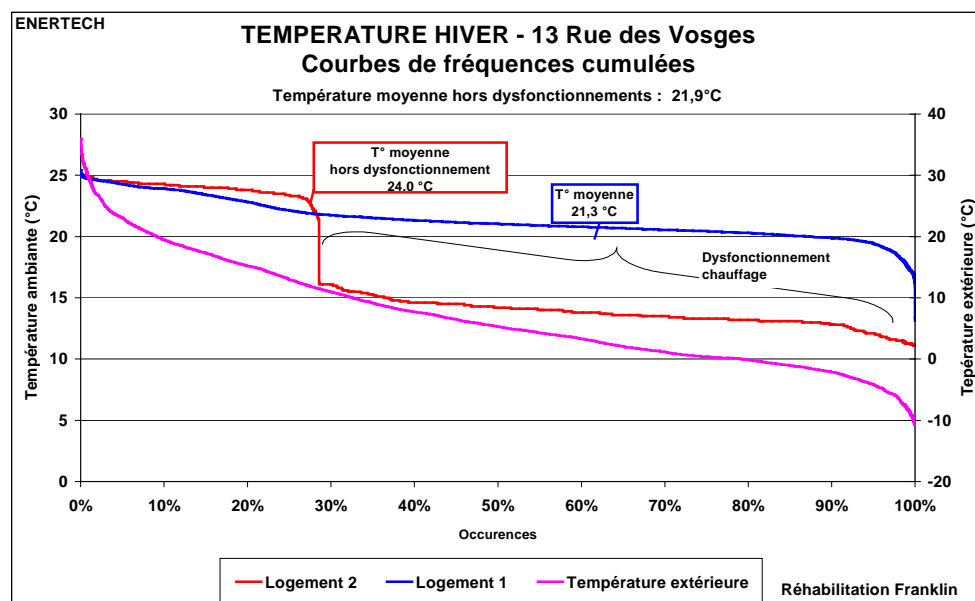


Figure 5.1 : 13 rue des Vosges - Courbes de fréquences cumulées des températures en hiver

En hiver la température moyenne du bâtiment 31 rue des Vosges (fig. 5.2) est de **20,3°C**. Cependant, il existe de grands écarts entre les trois logements : dans deux d'entre eux, la température moyenne est d'environ 21°C, et pendant 90 % du temps la température est supérieure à 19°C.

Pour le troisième, la température est inférieure à 14°C pendant 8 % du temps. Cela correspond à une inoccupation prolongée de l'appartement. En dehors de cette période, la température moyenne est de 18,8°C. La température dans ce logement oscille fréquemment : l'occupant doit très certainement être régulièrement absent. Il arrête le chauffage dans ces périodes.

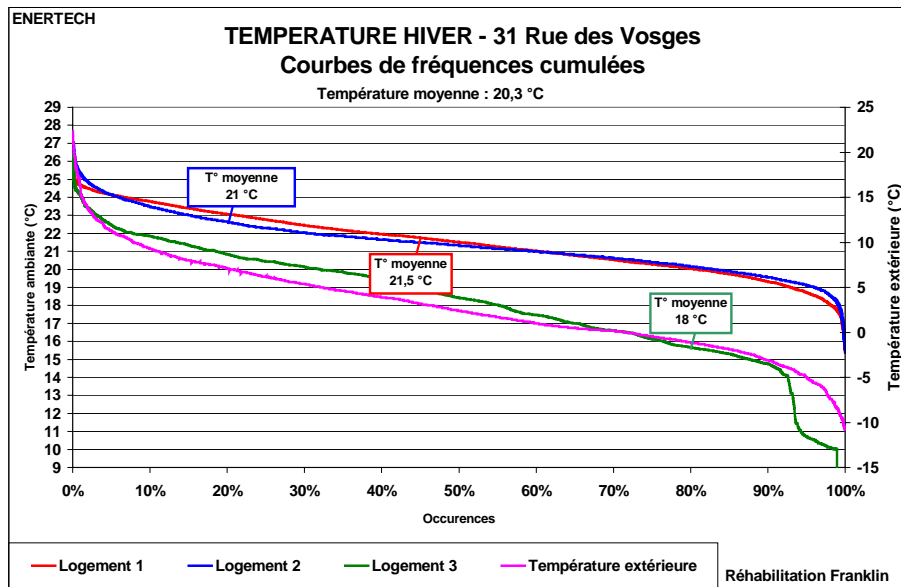


Figure 5.2 : 31 rue des Vosges - Courbes de fréquences cumulées des températures en hiver

Enfin, dans le bâtiment du 33 rue des maçons, la température moyenne est en hiver de 18,5 °C. Un des logements n’est quasiment pas jamais chauffé. La température ambiante y est en moyenne de 15,5°C avec une température inférieure à 15°C pendant plus de 40 % du temps. Si on ne tient pas compte de ce comportement atypique, on calcule une température moyenne du bâtiment de 19,2°C. La régulation terminale de ce bâtiment doit correctement fonctionner car les logements chauffés présentent des températures relativement similaires.

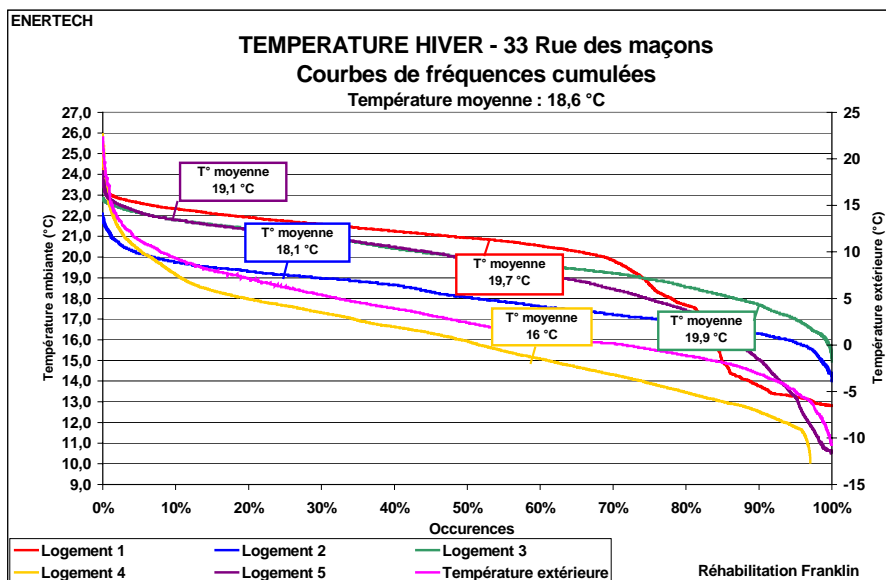


Figure 5.3 : 33 rue des Maçons - Courbes de fréquences cumulées des températures en hiver

On peut en conclure que, pour autant que les usagers occupent leur logement, les températures intérieures sont très confortables, mais elles restent dans certains cas trop élevées, ce qui dégrade singulièrement la consommation. Il faut se rappeler, et la simulation dynamique le montre très bien, que chaque degré supplémentaire dans un bâtiment très isolé conduit à une augmentation de la consommation de 15%.

V.1.2 Courbes de charge des températures

Les figures 5.4 à 5.6 représentent l'évolution journalière de la température moyenne intérieure au pas de temps de l'heure, pour les différents logements et les différents bâtiments.

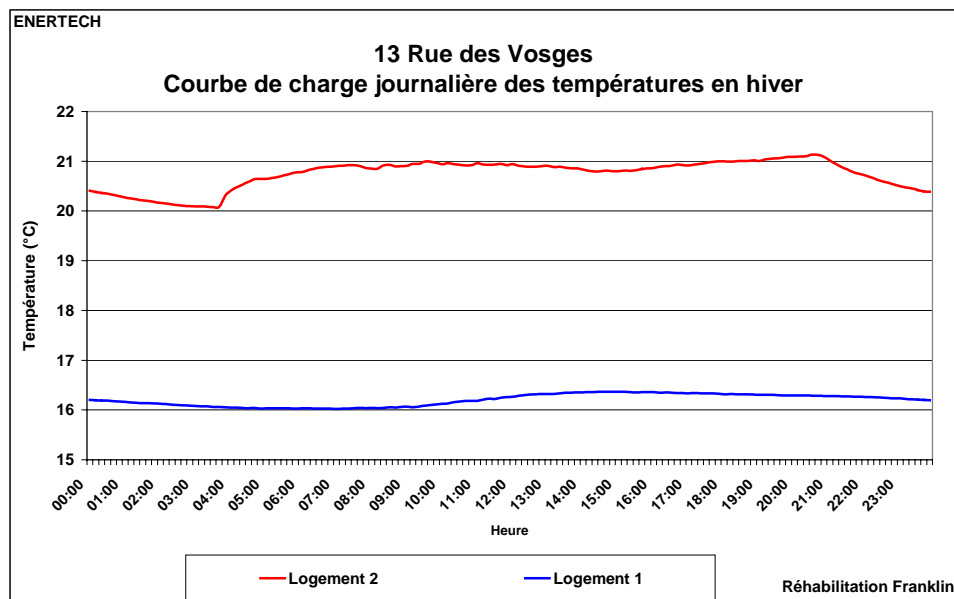


Figure 5.4 : 13 rue des Vosges - Courbe de charge journalière des températures en hiver

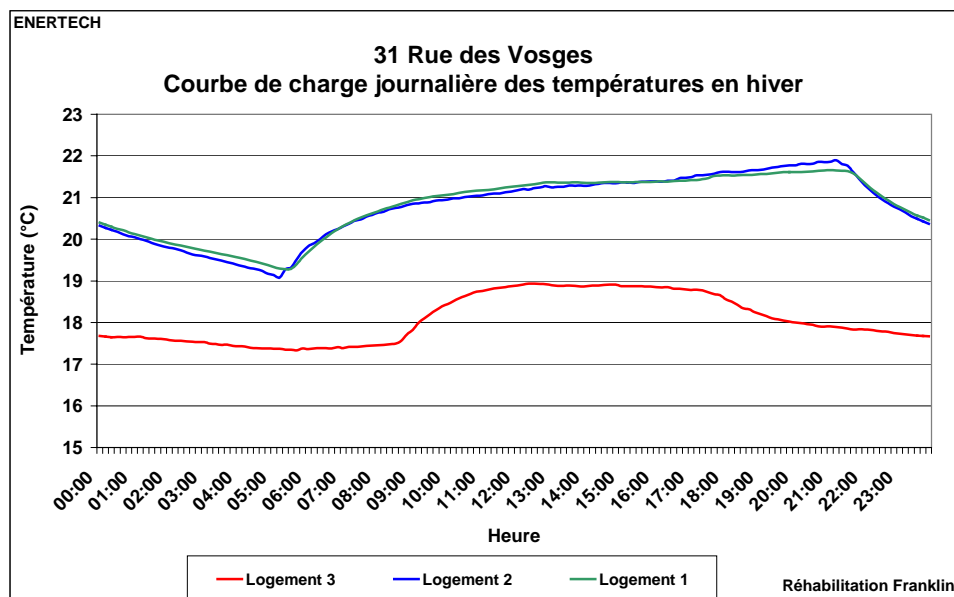


Figure 5.5 : 31 rue des Vosges - Courbe de charge journalière des températures en hiver

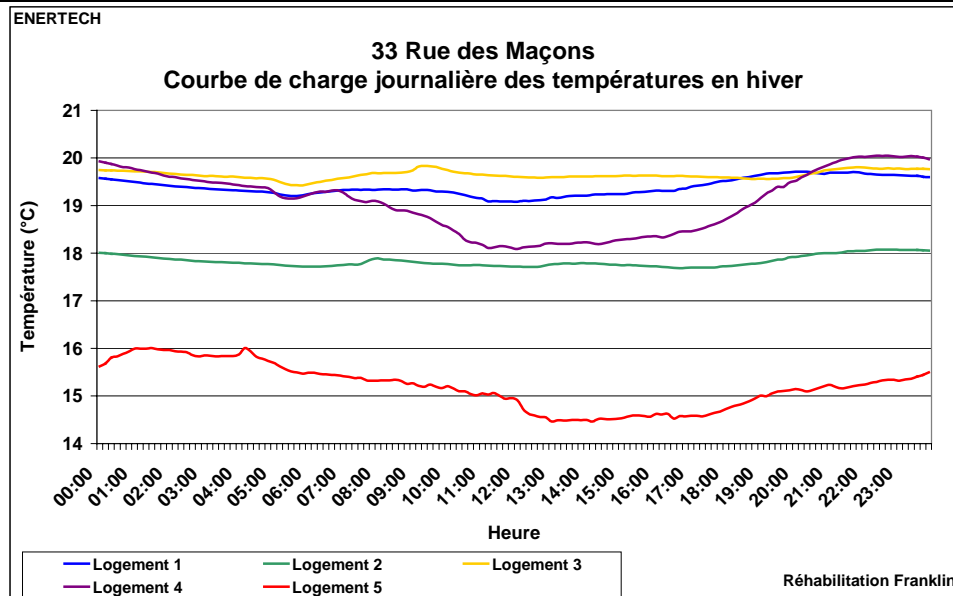


Figure 5.6 : 33 rue des Maçons - Courbe de charge journalière des températures en hiver

Si on considère que les températures inférieures à 16°C correspondent à des logements non occupés, tous les logements occupés fonctionnent avec un ralenti de nuit. L'écart de température entre les extremums quotidiens est assez variable, allant de pratiquement 0°C (logement 2 au 13, rue des Vosges) à 3°C (logements 1 et 2 du 31 Vosges).

Il est probable qu'une reprise de la régulation, à la fois sur la loi de départ de température d'eau (à notre avis trop élevée, ce qui permet à ceux qui le souhaitent de se chauffer à 24°C, ce qui est contraire à la loi), et sur le bridage des thermostats intérieurs (mais celui ci ne serait pas nécessaire si la loi d'eau ne rendait pas possible la surchauffe...) permettrait de retrouver des niveaux de température plus raisonnables et plus à même de réduire les consommations de chauffage.

V.1.3 Température intérieure fonction de la température extérieure

Les figures 5.7 à 5.9 représentent la température intérieure en fonction de la température extérieure. On observe que pour le 31 rue des Vosges et le 33 rue des Maçons, la température intérieure est sensiblement constante quelle que soit la température extérieure. En revanche pour les logements du 13 rue des Vosges, il existe une loi conduisant à ce que la température intérieure augmente légèrement en même temps que la température extérieure.

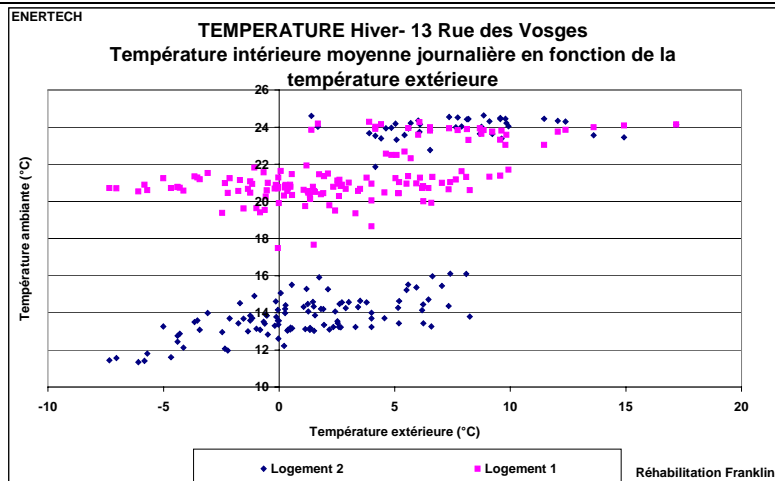


Figure 5.7 : 13 rue des Vosges - Température intérieure moyenne journalière en fonction de la température extérieure

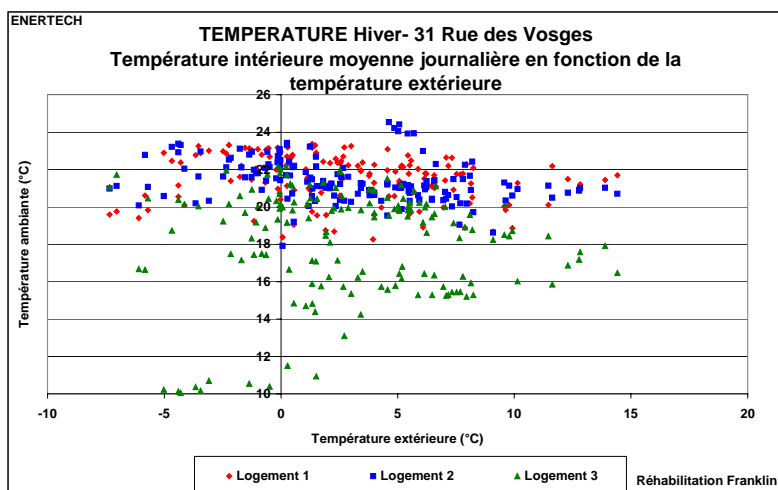


Figure 5.8 : 31 rue des Vosges - Température intérieure moyenne journalière en fonction de la température extérieure

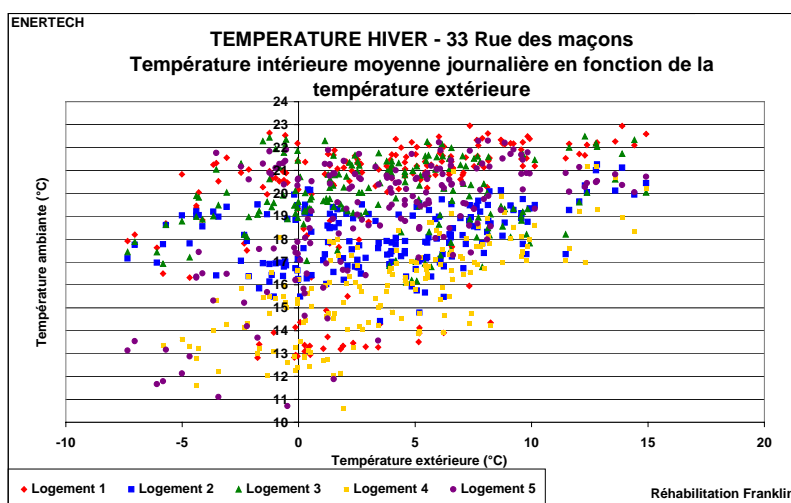


Figure 5.9 : 33 rue des Maçons - Température intérieure moyenne journalière en fonction de la température extérieure

V.2 TEMPERATURE EN ETE

V.2.1 Températures observées

On examine maintenant les températures observées en dehors de la période de chauffe.

Les figures 5.10 et suivantes représentent les courbes de fréquences cumulées des températures de chacun des logements sur l'ensemble de la période hors chauffage.

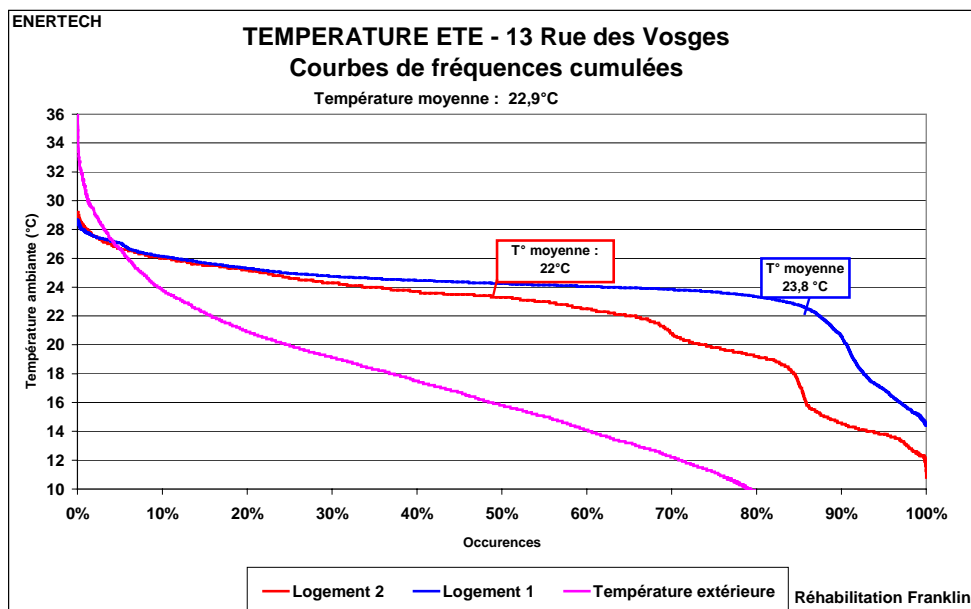


Figure 5.10 : 13 rue des Vosges - Courbes de fréquences cumulées des températures en dehors de la période de chauffe

Pour le 13 rue des Vosges, le nombre d'heures pendant lesquelles la température intérieure est supérieure à 28°C est respectivement de 52 et 27 heures pour les logements 2 et 1. Il est étonnant que le logement 2 soit le plus mauvais car il est au rez de chaussée. Ceci est vraisemblablement dû à une mauvaise gestion de l'ouverture des fenêtres en été (ouvertes la journée alors qu'elles devraient être closes). La température moyenne pendant la période hors chauffage est de 22,9°C.

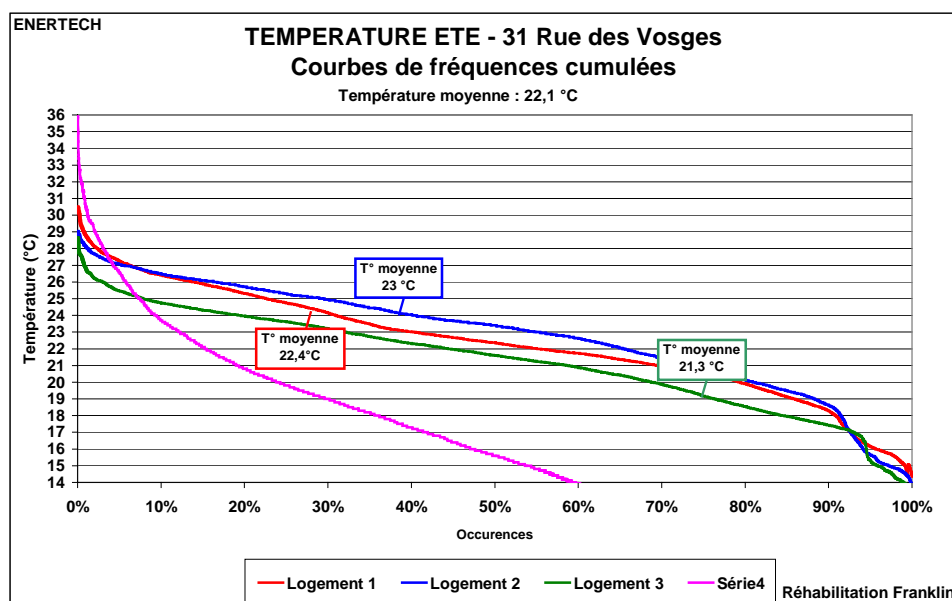


Figure 5.11 : 31 rue des Vosges - Courbes de fréquences cumulées des températures en dehors de la période de chauffe

Pour le 31 rue des Vosges, les logements 1, 2 et 3 ont dépassé respectivement de 116, 57 et 4 heures la température de 28°C durant la période juillet-août. En moyenne sur la période, la température est de 22,1°C. On remarque très logiquement que plus le logement est situé dans les étages, plus la température moyenne en été est importante. On relève aussi que dans les logements consommant beaucoup d'électricité, le confort estival se dégrade. La seconde cause de dégradation du confort est la mauvaise gestion de l'ouverture des fenêtres : elles doivent impérativement être fermées la journée (car il fait plus chaud dehors) et ouvertes la nuit (pour refroidir les structures du logement).

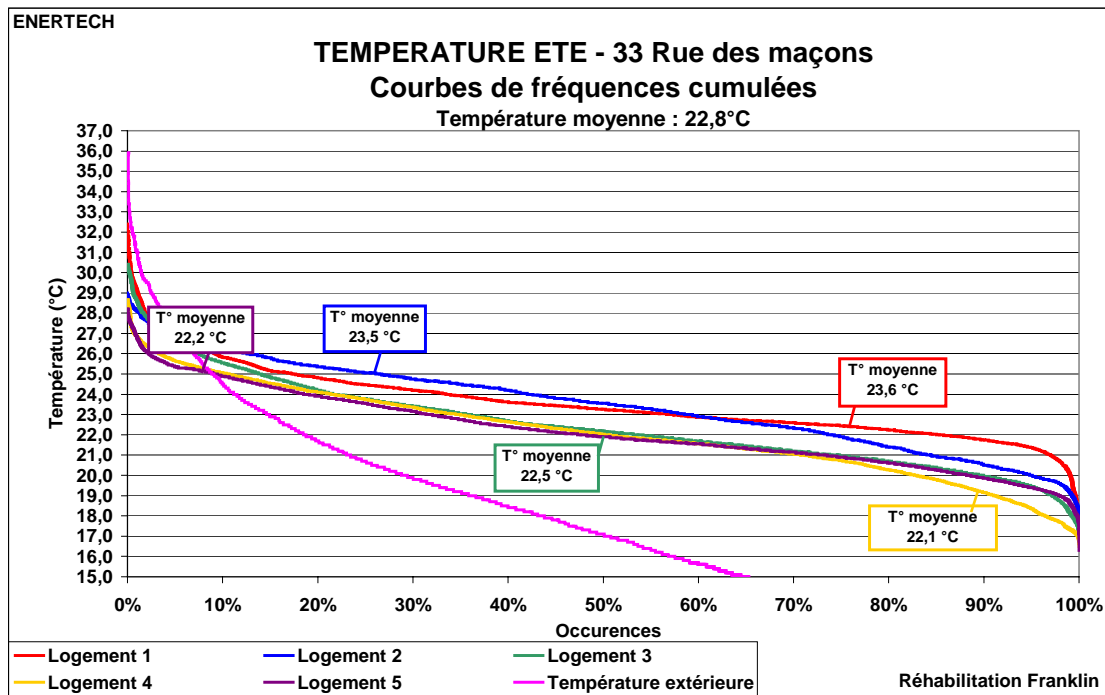


Figure 5.12 : 33 rue des Maçons - Courbes de fréquences cumulées des températures en dehors de la période de chauffage

Enfin, pour le 33 rue des Maçons, la température moyenne a été de 22,8°C en dehors de la période de chauffage et de 24,5°C entre juillet et août. La température de 28°C a été dépassée entre 1 et 85 heures selon les logements. Là encore, ce sont les logements situés à R+1 et R+2 dont le nombre d'heures est le plus important.

La figure 5.13 représente pour chaque logement le nombre d'heures pendant lesquelles la température de 28°C a été dépassée durant la période hors chauffage. **En moyenne, ce dépassement a été de 48 heures.** A noter que dans le logement 1 du 31 rue des Vosges il n'y a eu personne durant l'été, d'où le niveau très élevé des surchauffes. Si on se borne à la seule période juillet-août, le nombre d'heures passées au dessus de 28°C est partout inférieur à 60 heures. Le nombre d'heures moyen (par bâtiment) passé au dessus de 28°C est respectivement de 59, 45 et 39 pour le 31 rue des Vosges, 33 rue des Maçons, et le 13 rue des Vosges.

Conclusion : malgré un été très chaud, les températures dans ces bâtiments très isolés se sont révélées être relativement bonnes sans pour autant être excellentes. On fixe généralement une limite de 40 heures au dépassement de la température de 28°C en été. Cette limite n'a pas toujours été respectée ici. Mais on s'en écarte très peu, et il est probable qu'avec de meilleures habitudes sur la gestion des ouvertures des fenêtres il devrait être possible de retrouver rapidement des conditions de confort acceptables en été.

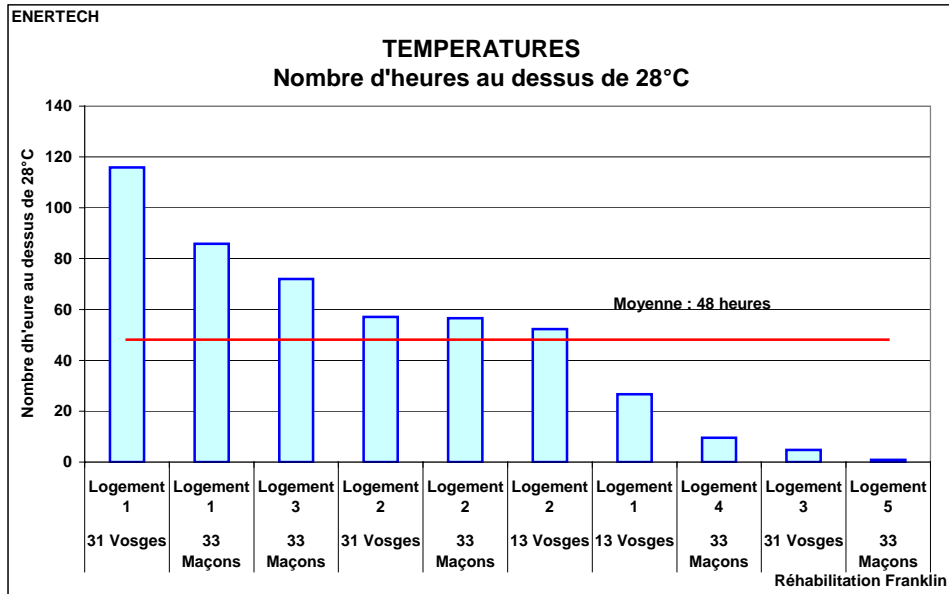


Figure 5.13 : Nombre d'heures pendant lesquelles la température intérieure est supérieure à 28°C dans l'ensemble des logements, hors saison de chauffage

L'évolution des températures intérieures durant la semaine la plus chaude de l'été (fig. 5.14) montre deux choses :

- d'abord que la température maximum est en moyenne toujours inférieures à 29°C, et ceci de manière très ponctuelle en cours d'après midi,
- il existe à l'évidence un énorme potentiel de refroidissement des logements qui n'est pas utilisé : la nuit, la température extérieure est toujours inférieure d'au moins 15°C (et même parfois 20°C) à la température maximum diurne. La température des logements décroît très peu la nuit et il devrait être possible d'améliorer considérablement cette situation par une bonne ventilation naturelle nocturne.

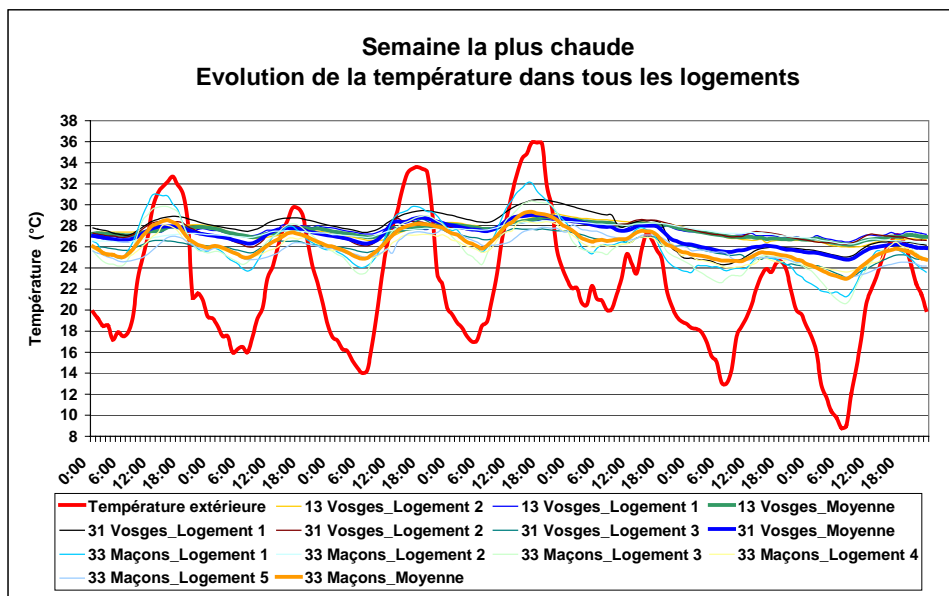


Figure 5.14 : Evolution de la température dans tous les logements au cours de la semaine la plus chaude

Partie VI : Analyse économique

Nous avons procédé à une analyse économique des bâtiments afin de déterminer combien avait coûté les opérations de rénovation, qu'est-ce qui revenait le plus cher, et comment améliorer la situation.

VI.1 METHODOLOGIE UTILISEE

VI.1.1 Objet de l'étude

Cette analyse des coûts des opérations de rénovation à Mulhouse a pour but de distinguer les travaux réalisés pour améliorer la performance énergétique des travaux d'entretien ou d'amélioration du confort sans impact énergétique.

De plus, le cahier des charges de ces opérations étant basé sur une obligation de moyens, fondée sur la Solution Technique Universelle (STU) qui est une méthode d'intervention simplifiée que nous avons proposée en 2004, nous avons distingué les coûts directement liés à ce cahier des charges et les coûts liés à la performance énergétique mais ne figurant pas dans les obligations de moyen.

VI.1.2 Liste des postes retenus et limites de prestations

La liste des postes étudiés est présentée dans le tableau ci-dessous :

Obligation de moyens (STU)	Limites de prestations
Isolation des murs - résistance thermique additionnelle de 4.3 m ² .K/W.	<u>Compris</u> : doublage placo intérieur, enduit sur isolant extérieur, isolation entre communs et logements le cas échéant. <u>Non compris</u> : peinture intérieure, échafaudage extérieur
Isolation du plancher bas - résistance thermique additionnelle de 4.3 m ² .K/W.	<u>Compris</u> : fixations <u>Non compris</u> : -
Isolation de la toiture - résistance thermique additionnelle de 7.5 m ² .K/W pour les toitures terrasse et 4.3 m ² .K/W pour les rampants.	<u>Compris</u> : faux plafond horizontal et en rampant <u>Non compris</u> : -
Mise en place de menuiseries triple vitrage sur châssis bois massif si l'isolation des murs est réalisée par l'intérieur ; double-vitrage peu émissif à lame d'argon si l'isolation des murs est extérieure.	<u>Compris</u> : dépose des menuiseries existantes <u>Non compris</u> : menuiseries des parties communes non chauffées, réfection des occultations (volets...)
Mise en place d'une ventilation double-flux avec échangeur de chaleur d'une efficacité minimale de 70%.	<u>Compris</u> : système complet (ventilateurs, échangeur, réseau commun et en logement, bouches de soufflage et de reprise), faux plafonds créés pour le réseau de soufflage. <u>Non compris</u> : -
Mise en place d'une production de chaleur performante : pompe à chaleur avec COP moyen >3, chaudière à condensation avec réseau d'eau à basse température, chaudière bois.	<u>Compris</u> : régulation, fumisterie <u>Non compris</u> : équipements de chaufferie (pompes, vase d'expansion, etc...), distribution de chauffage.
Mise en place d'une régulation performante : régulation centrale et régulation terminale non par robinets thermostatiques, mais par des systèmes à réponse rapide (type vanne à moteur électrothermique).	<u>Compris</u> : thermostats d'ambiance, corps de vanne et actionneur (vanne électrothermique ou robinet thermostatique le cas échéant), alimentation électrique et liaison filaire le cas échéant. <u>Non compris</u> : émetteurs (radiateurs, ...)

Autres travaux liés à l'énergie	Limites de prestations
Portes isolantes	<u>Compris</u> : dépose des portes existantes, seuil pour l'étanchéité à l'air <u>Non compris</u> : portes des communs non isolantes
Installation de chauffage hors STU	<u>Compris</u> : alimentation gaz de la chaufferie, équipements de chaufferie (pompes, vase d'expansion, etc...), distribution et émetteurs <u>Non compris</u> : éléments déjà comptés précédemment
Installation ECS hors solaire	<u>Compris</u> : ballon ECS, appoint (pompes, échangeur...) <u>Non compris</u> : installation solaire
Installation ECS solaire	<u>Compris</u> : capteurs et leurs supports, liaison solaire, module de transfert, ballon solaire <u>Non compris</u> : appoint
Maîtrise de la demande en électricité	Sans objet (pas de données)

Rénovation non liée à l'énergie	Exemples de prestations
Autres travaux réalisés	Travaux de peinture intérieure et extérieure (sauf isolation par l'extérieur), échafaudages, équipements sanitaires, carrelages, revêtements de sols, cloisons de distribution, portes intérieures...

La philosophie retenue pour le choix de ce qui est compté ou non en rénovation liée à l'énergie se base sur ce qui aurait été fait dans le cadre d'une rénovation sans objectif de performance énergétique.

On note que l'échafaudage n'est pas compté comme dépense liée à l'isolation extérieure. En effet cette isolation et son enduit (pris en compte) apportent un aspect de façade qui aurait nécessité, si l'on n'avait pas isolé le mur par l'extérieur, un ravalement de façade avec mise en place d'un échafaudage. En ce qui concerne la division entre la chaudière, sa régulation et sa fumisterie (typiquement le conduit ventouse d'une chaudière à condensation) et le reste des installations de chauffage, l'idée est de séparer ce qui relève du gros entretien d'une chaufferie existante (poste P3) de ce qui relève directement de l'amélioration de la performance et de la mise en adéquation de la puissance installée avec le niveau d'isolation après rénovation.

De même, les émetteurs (radiateurs) ne sont pas comptés avec la régulation terminale, car il est toujours possible de réutiliser les émetteurs existants : en effet le fait de surisoler les logements permet de diminuer les déperditions et donc d'émettre la chaleur nécessaire avec un régime de température plus bas qui est alors adapté à une chaudière à condensation par exemple. Le remplacement des émetteurs est donc une décision liée soit à la vétusté des radiateurs existants, et l'on retombe alors dans le gros entretien, soit à des considérations esthétiques ou d'aménagement intérieur, qui ne relèvent pas de la performance énergétique.

Le poste maîtrise de la demande en électricité (MDE) n'est pas pris en compte faute de données. Cependant d'autres études de coût réalisées nous ont montré que ce poste avait un impact très faible sur le coût des opérations (prise commandée pour le poste audiovisuel, fourniture de lampes basse consommations dans les logements, éclairage performant des communs...), le plus souvent inférieur à 5 € HT /m².

On note qu'il n'y a pas de poste dédié à l'étanchéité à l'air. En effet, ces opérations ont été réalisées en 2006, et il avait été décidé de se borner à réaliser une bonne étanchéité entre menuiseries et murs. Cela dit, sur les opérations que nous suivons actuellement, ce poste a un impact financier très faible (pour un impact énergétique très important !)

VI.1.3 Mode opératoire

Pour réaliser cette étude, nous avons repris les DPGF des pièces marché, dont nous avons ventilé chaque ligne vers les catégories de travaux liés à l'énergie listées ci-dessus.

Le montant des travaux non liés à l'énergie a été obtenu par différence entre le montant total des travaux et le montant des travaux liés à l'énergie.

Nous avons tiré de ces montants par postes différents indicateurs :

- ✓ Prix rapporté à la surface habitable (SHAB),
- ✓ Prix au logement,
- ✓ Eléments complémentaires permettant d'expliquer certains niveaux de prix, notamment prix des menuiseries triple vitrage rapporté au m² de menuiserie, prix de la régulation terminale par logement...

VI.2 RESULTATS DE L'ETUDE

VI.2.1 Coût de la STU

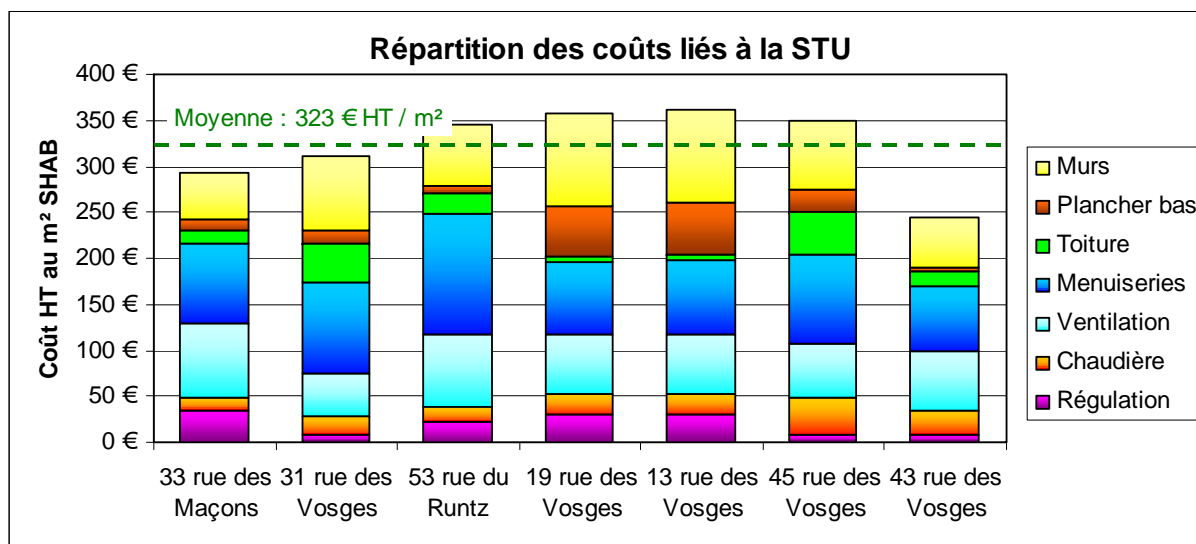
Les tableaux suivants présentent les prix constatés poste par poste. On note que certaines prestations ne répondent pas totalement aux obligations de moyens : nous les avons mises en évidence en rouge pour faciliter l'interprétation des écarts de prix.

Notations : ITI : isolation thermique par l'intérieur – ITE : isolation thermique par l'extérieur – R : résistance thermique en m².K/W – U_w : performance de la menuiserie complète (vitrage + cadre) en W/m².K – VDF : ventilation double flux

	Opérations	33 rue des Maçons	31 rue des Vosges	53 rue du Runtz	19 rue des Vosges	13 rue des Vosges	45 rue des Vosges	43 rue des Vosges
	SHAB en m ²	203.57	183.62	177.92	123.8	122.35	111.95	111.27
	Nombre de logements	5	3	3	2	2	2	2
Obligation de moyens (STU)								
Isolation des murs - résistance thermique additionnelle de 4.3 m ² .K/W.	Travaux réalisés	ITI R=4,3 + ébrasements ITI sur communs	ITI R=4,2 - ITE côté cour - ITI sur communs	ITI R=4,3 + ébrasements	ITI R=3,75 côté rue - ITE R=4,47 côté cour	ITI R=3,75 côté rue - ITE R=4,47 côté cour	ITI R=4,2 ITI sur communs	ITI LR 150mm + ébrasements
	Coût HT	10 189 €	14 749 €	11 913 €	12 447 €	12 446 €	8 378 €	6 013 €
	Coût HT au m ² SHAB	50 €	80 €	67 €	101 €	102 €	75 €	54 €
Isolation du plancher bas - résistance thermique additionnelle de 4.3 m ² .K/W.	Travaux réalisés	Plaf. susp. R=4,3 Sous chape R=2,6	Hourdis PSE R=4,7 Plaf. susp. R=4,7	Plafond suspendu R=4,3 Chape isolante	Plancher haut du RdC / sous-sol R=3,76	Plancher haut RdC R=3,75	Hourdis PSE R=4,7 Plaf. susp. R=4,7	200mm LR sur plafond suspendu RdC
	Coût HT	2 187 €	2 808 €	1 448 €	6 857 €	6 857 €	2 741 €	575 €
	Coût HT au m ² SHAB	11 €	15 €	8 €	55 €	56 €	24 €	5 €
Isolation de la toiture - résistance thermique additionnelle de 7.5 m ² .K/W pour les toitures terrasse et 4.3 m ² .K/W pour les rampants.	Travaux réalisés	R=7,5 plafond suspendu ou en combles	R=4,7 rampant et R=7,05 en comble	Plafond suspendu R=4,3	R=7,5	R=7,5	R=4,7 rampant et R=7,05 en comble	R=7,5
	Coût HT	3 039 €	7 700 €	3 813 €	630 €	630 €	5 236 €	1 796 €
	Coût HT au m ² SHAB	15 €	42 €	21 €	5 €	5 €	47 €	16 €
Menuiseries triple vitrage si ITI double-vitrage peu émissif à lame d'argon si ITE.	Travaux réalisés	Triple Uw=1,1	Triple Uw=1,1	Triple Uw=1,1	Triple Uw=1,1	Triple Uw=1,1	Triple Uw=1,1	Triple Uw=1,1
	Coût HT	17 710 €	18 054 €	23 522 €	9 957 €	9 957 €	10 958 €	7 825 €
	Coût HT au m ² SHAB	87 €	98 €	132 €	80 €	81 €	98 €	70 €
Ventilation double flux avec échangeur de chaleur d'une efficacité minimale de 70%.	Travaux réalisés	VDF	VDF	VDF	VDF	VDF	VDF	VDF
	Coût HT	16 405 €	8 572 €	13 972 €	7 840 €	7 840 €	6 442 €	7 118 €
	Coût HT au m ² SHAB	81 €	47 €	79 €	63 €	64 €	58 €	64 €

Produit chaleur performante (pompe à chaleur avec COP moyen >3, chaudière à condensation avec réseau d'eau à basse température, chaudière bois).	Travaux réalisés	Chaudière Gaz à condensation 15 kW	Chaudière Gaz à condensation 35 kW *	Chaudière Gaz à condensation 15 kW	Chaudière Gaz à condensation 15 kW	Chaudière Gaz à condensation 15 kW	Chaudière Gaz à condensation 35 kW *	Chaudière Gaz à condensation 24 kW
	Coût HT	2 910 €	3 855 €	2 910 €	2 910 €	2 910 €	4 486 €	2 910 €
	Coût HT au m² SHAB	14 €	21 €	16 €	24 €	24 €	40 €	26 €
Régulation centrale et régulation terminale par des systèmes à réponse rapide	Travaux réalisés	1 thermostat et 1 vanne électro-thermique par pièce	Robinets thermostatiques + 1 vanne par logement	1 thermostat et 1 vanne électro-thermique par pièce	1 thermostat et 1 vanne électro-thermique par pièce	1 thermostat et 1 vanne électro-thermique par pièce	Robinets thermostatiques + 1 vanne par logement	Robinets thermostatiques
	Coût HT	7 020 €	1 455 €	3 900 €	3 635 €	3 635 €	970 €	998 €
	Coût HT au m² SHAB	34 €	8 €	22 €	29 €	30 €	9 €	9 €
Total STU	Coût HT	59 460 €	57 193 €	61 477 €	44 276 €	44 275 €	39 211 €	27 235 €
	Coût HT au m² SHAB	292 €	311 €	346 €	358 €	362 €	350 €	245 €
	Coût HT au logement	11 892 €	19 064 €	20 492 €	22 138 €	22 138 €	19 606 €	13 618 €

* Chaudière installée au 31 rue des Vosges et au 45 rue des Vosges : la chaudière installée nous semble surdimensionnée, une moins value aurait été possible.

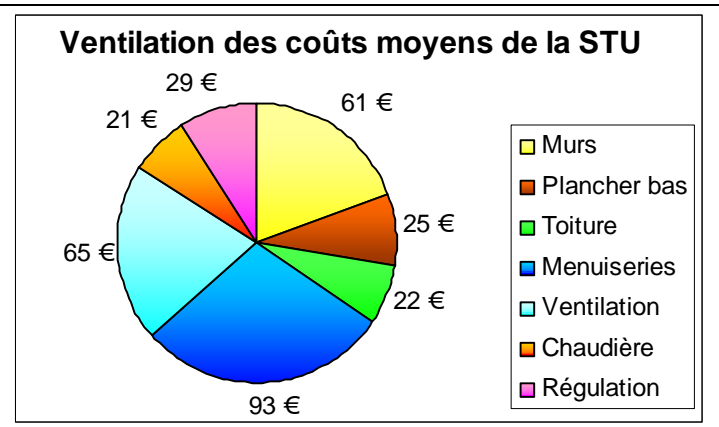


N.B. : tous les prix sont en euros courants

Le coût des travaux concernant les obligations de moyens pour la rénovation énergétique (STU) se situent entre 245 et 362 € H.T./ m², pour une moyenne de 323 €/m² SHAB.

Les prix moyens par poste sont les suivants :

Obligation de moyens (STU)	Moyenne des 7 opérations	Moyenne des coût respectant la STU
Isolation des murs	75 €/ m ² SHAB	61 €/ m ² SHAB
Isolation du plancher bas	25 €/ m ² SHAB	25 €/ m ² SHAB
Isolation de la toiture	22 €/ m ² SHAB	22 €/ m ² SHAB
Menuiseries triple vitrage	93 €/ m ² SHAB	93 €/ m ² SHAB
Ventilation double flux	65 €/ m ² SHAB	65 €/ m ² SHAB
Chaudière performante	24 €/ m ² SHAB	21 €/ m ² SHAB
Régulation performante	20 €/ m ² SHAB	29 €/ m ² SHAB
Total STU	323 €/ m² SHAB	315 €/ m² SHAB



On constate pour l'ensemble des opérations que le coût le plus important est consacré aux menuiseries triple vitrage. Il s'agit pourtant de triples vitrages « à la française », c'est à dire de triple vitrage sur un cadre bois classique (et non les cadres en bois contrecollé ou isolés qui composent les menuiseries passives atteignant $U_w=0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Il s'agit en effet d'une des premières opérations mettant en œuvre ce type de menuiseries, qui reflète une période d'apprentissage et de structuration du marché. Le coût des menuiseries de ce type est amené à diminuer au fil du temps, même si cette diminution tarde à se produire (voir la partie VI.3.1).

Le poste suivant est l'isolation des murs, avec une disparité assez nette entre les projets ayant recours à l'isolation par l'extérieur (94 €/m² SHAB en moyenne des 3 projets concernés) et les projets intégralement en isolation par l'intérieur (61 €/ m² SHAB en moyenne des 4 projets concernés). On note que les projets mettant en œuvre une isolation par l'extérieur partielle ont été pénalisée par ce surcoût sans bénéficier de la moins value possible du passage en double vitrage si toute l'isolation des murs était traitée par l'extérieur. C'est pourquoi nous avons retenu comme coût de référence de la STU la moyenne des opération sans isolation par l'extérieur.

La ventilation double flux est le troisième poste par son importance. On note que ce prix est plutôt élevé notamment à cause de l'échelle de ces opérations (de 2 à 5 logements). On verra en effet au § VI.3.2 que le prix moyen au logement de la ventilation double flux diminue quand la taille de l'opération augmente.

VI.2.2 Coût des autres travaux liés à l'énergie

Le tableau suivant détaille les travaux réalisés pour l'amélioration de la performance énergétique hors STU :

	Opération	33 rue des Maçons	31 rue des Vosges	53 rue du Runtz	19 rue des Vosges	13 rue des Vosges	45 rue des Vosges	43 rue des Vosges
	SHAB en m²	203.57	183.62	177.92	123.8	122.35	111.95	111.27
	Nombre de logements	5	3	3	2	2	2	2
Coût lié à l'énergie hors STU								
Portes isolantes		3 219 €	4 348 €	3 873 €	2 800 €	2 800 €	4 505 €	3 125 €
Installation de chauffage hors STU		21 052 €	15 777 €	10 294 €	10 424 €	10 424 €	11 486 €	11 957 €
Installation ECS hors solaire		9 809 €	2 632 €	7 331 €	6 160 €	6 160 €	5 107 €	5 486 €
Installation ECS solaire		9 270 €	8 298 €	9 222 €	6 690 €	6 690 €	6 278 €	5 915 €
Maîtrise de la demande en électricité		NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Total	Coût HT total	43 350 €	31 055 €	30 720 €	26 074 €	26 074 €	27 376 €	26 483 €
	Coût HT au m² SHAB	213 €	169 €	173 €	211 €	213 €	245 €	238 €
	Coût HT au logement	8 670 €	10 352 €	10 240 €	13 037 €	13 037 €	13 688 €	13 241 €

VI.2.3 Coût des travaux non liés à l'énergie

Le coût total des travaux ne concernant par l'amélioration de la performance énergétique est présenté dans le tableau suivant :

	Opération	33 rue des Maçons	31 rue des Vosges	53 rue du Runtz	19 rue des Vosges	13 rue des Vosges	45 rue des Vosges	43 rue des Vosges
	SHAB en m²	203.57	183.62	177.92	123.8	122.35	111.95	111.27
	Nombre de logements	5	3	3	2	2	2	2
Coût non lié à l'énergie								
Total	Coût HT	156 531 €	213 489 €	172 194 €	108 695 €	109 070 €	153 820 €	127 168 €
	Coût HT au logement	31 306 €	71 163 €	57 398 €	54 348 €	54 535 €	76 910 €	63 584 €
	Coût HT au m² SHAB	769 €	1 163 €	968 €	878 €	891 €	1 374 €	1 143 €
Coût total de l'opération	Coût HT	259 341 €	301 737 €	264 391 €	179 045 €	179 419 €	220 407 €	180 886 €

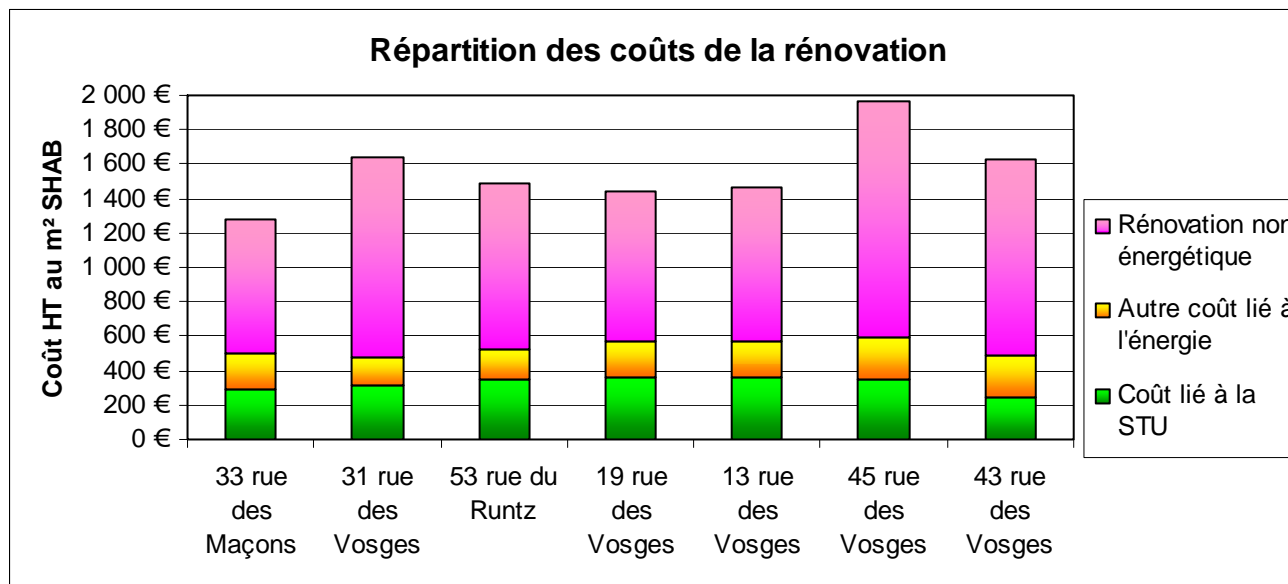


Figure 6.1 : Graphique de la répartition des coûts totaux des opérations de rénovation

La STU représente entre 15 et 25% du coût total de la rénovation. Les travaux liés à l'énergie représentent entre 30 et 40% du coût total. Ces ratios n'ont guère de signification car ils dépendent de la nature des travaux complémentaires. A Mulhouse, les travaux complémentaires ont été importants puisqu'il s'agissait de rénovation très lourdes.

VI.3 ENSEIGNEMENTS ET PERSPECTIVES

VI.3.1 Menuiseries triple vitrage

Nous avons vu que les menuiseries triple vitrage constituent le coût le plus important de la STU. Il faut rappeler que l'on ne parle pas ici de menuiseries passives à cadre isolant, mais de triple vitrage « à la française » sur cadre bois massif sans rupteur de ponts thermiques.

Les niveaux de prix au m² de menuiserie sont assez élevés, avec **473 €/m²** tableau :

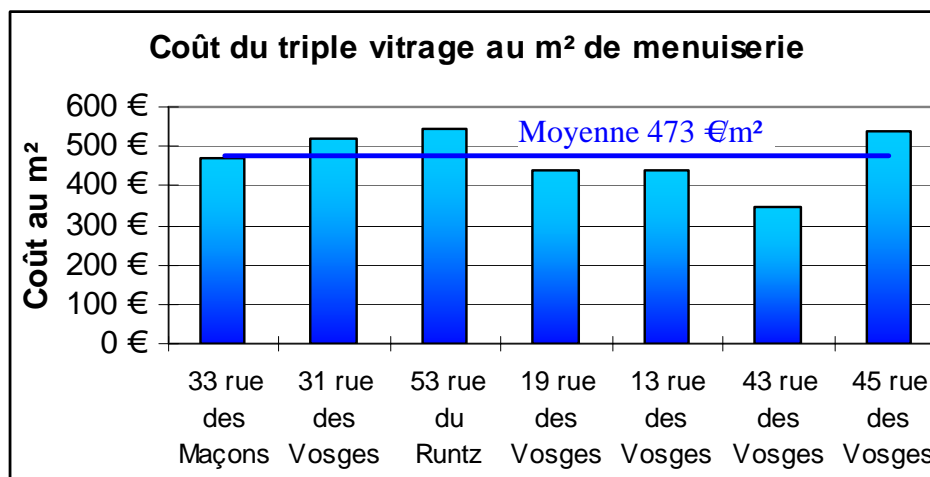


Figure 6.2 : Prix des menuiseries triple vitrage cadre bois massif au m² de menuiserie

Ce niveau de prix et l'impact qu'il a sur le coût global de la rénovation énergétique nous incite à rechercher des solutions pour atteindre le même niveau de performance sans triple vitrage. Le niveau de prix pratiqué actuellement risque donc de « tuer dans l'œuf » le développement du marché français. Il n'est pas légitime, et partant de là pas acceptable. **On se passera dorénavant de triple vitrage si les prix restent à ce niveau illégitime....**

Dans un marché réellement ouvert, on devrait observer une diminution du prix du triple vitrage avec la généralisation de son utilisation. Mais l'évolution actuelle n'est pas encourageante :

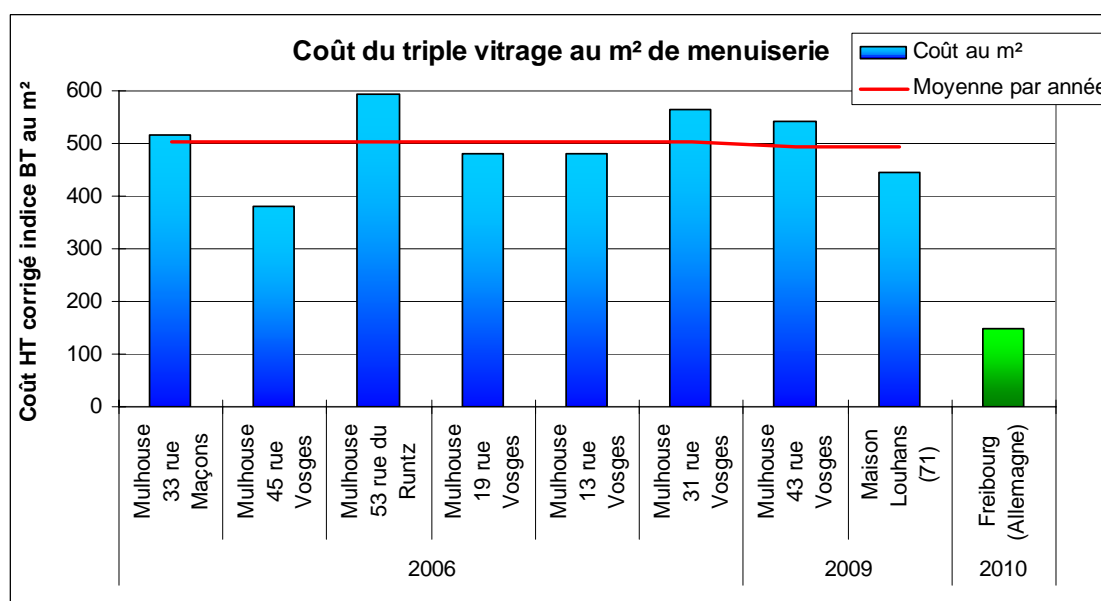


Figure 6.3 : Evolution des prix (corrigés de l'indice BT nov 2009) du triple vitrage sur bois massif à Mulhouse et pour une opération en Bourgogne - Comparaison avec le marché allemand (PVC)

On constate un décalage très important entre les prix pratiqués en France et les prix les plus compétitifs en Allemagne (triple vitrage sur cadre PVC). Nous avons contacté le fournisseur en question, et il se déclare prêt à venir travailler en Alsace pour une opération de taille suffisamment importante. Ceci doit constituer un avertissement pour les menuisiers français : avec le développement de la demande en France, les constructeurs européens vont être intéressés par le marché français. S'ils n'adaptent pas leur niveau de prix, les menuisiers français auront à faire face à une rude concurrence.

Enseignements à en tirer :

- Alerter la filière de la menuiserie triple vitrage que le niveau de prix actuel du marché français est surévalué de manière dangereuse et qu'il ne pourra pas soutenir la concurrence européenne.
- La filière française risque de tuer dans l'œuf le marché du triple vitrage en maintenant un prix trop élevé.
- Affiner la STU pour développer les possibilités de variantes permettant de se passer de triple vitrage à performance égale (traitement des ponts thermiques, travail sur l'étanchéité à l'air...)

VI.3.2 Ventilation double flux

La ventilation double flux performante arrive en deuxième par l'importance du coût dans la rénovation énergétique.

Il est intéressant de noter que le prix constaté au logement décroît avec la taille de l'opération :

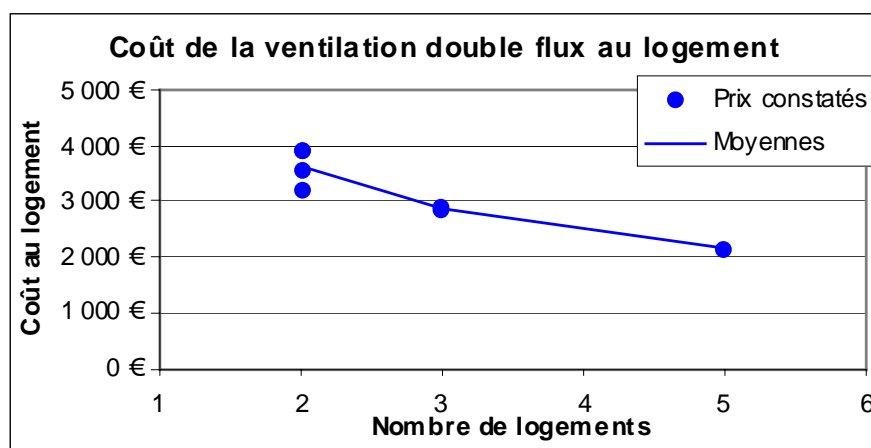


Figure 6.4 : Coût de la ventilation double flux rapporté au nombre de logements

NB : pour des opérations plus importantes, le coût global au logement de la VMC double flux collective peut augmenter de nouveau, notamment à cause du coût des carottages de dalles.

Ce coût nous semble tout à fait justifié par le double impératif d'assurer d'une part une qualité de l'air intérieur au logement minimale, que ne permet pas la ventilation simple flux hygroréglable, et d'autre part de récupérer les calories sur l'air extrait pour atteindre le niveau de performance fixé (facteur 4 sur le secteur du bâtiment).

Enseignements à en tirer :

- Le principe de la ventilation double flux est à maintenir dans la STU.
- Des pistes d'optimisation du coût sont à rechercher, notamment par la ventilation double flux décentralisée.

VI.3.3 Régulation terminale performante

Sur l'ensemble des opérations suivies à Mulhouse, plusieurs types de régulation terminale ont été mises en place. Le tableau suivant propose un comparatif technique et économique des trois solutions testées :

Type de régulation	Schéma	Précision de la régulation	Prix moyen constaté
Un thermostat et une vanne électrothermique par pièce		Dépassement moyen de consigne : 0,1 à 0,5°C selon la nature du thermostat	29 €HT / m ² SHAB 1585 €HT par logement
Robinetts thermostatiques + une vanne électrothermique par logement		Dépassement moyen de consigne : à déterminer par mesure. Ecart max de T° entre les pièces : le même que pour une chaudière à gaz en logement individuel avec thermostat M/A dans le séjour et robinets thermostatiques dans les pièces.	8 €HT / m ² SHAB 485 €HT par logement (le coût moyen dans l'échantillon est < à celui de la solution suivante (pourtant plus simple))
Robinetts thermostatiques		Dépassement moyen de consigne : de 2 à 4°C selon l'importance de la bande de réglage	8 €/ m ² SHAB 499 €HT par logement

Enseignements à en tirer :

- La mesure de l'homogénéité des températures dans un logement équipé de ventilation double flux a montré des écarts faibles entre les pièces. On peut donc envisager que la régulation se fasse logement par logement avec un thermostat par logement actionnant une vanne électrothermique située à l'entrée du logement. Les robinets thermostatiques sont conservés pour permettre à l'utilisateur de baisser la consigne (par exemple dans les chambres). Dans le bâtiment neuf ils sont nécessaires pour répondre à la réglementation qui demande une régulation terminale par pièce. Dans la rénovation, on peut même envisager de ne mettre en place que des robinets simple réglage. Il restera à évaluer les performances de ce système (celui avec vanne s/thermostat + robinets thermostatiques) qui revient à reposer sur les robinets thermostatiques, système peu précis et peu efficace s'il en est.
- Attention, cette analyse n'est pas du tout valable en ventilation simple flux, où les écarts de températures entre les pièces est plus important. C'est un argument de plus pour conserver le principe de la ventilation double flux dans la STU.
- La modification proposée de la STU permettrait une économie importante (21 €/m² ou 1100 €/logement).

VI.3.4 Production de chaleur performante

Les opérations suivies à Mulhouse ont toutes mis en œuvre des chaudières Gaz à condensation collectives. Les coûts sont assez hétérogènes : de 582 € par logement à 2243 € par logement. Comme pour la ventilation double flux, et de façon assez logique, le coût au logement décroît quand la taille de l'opération augmente :

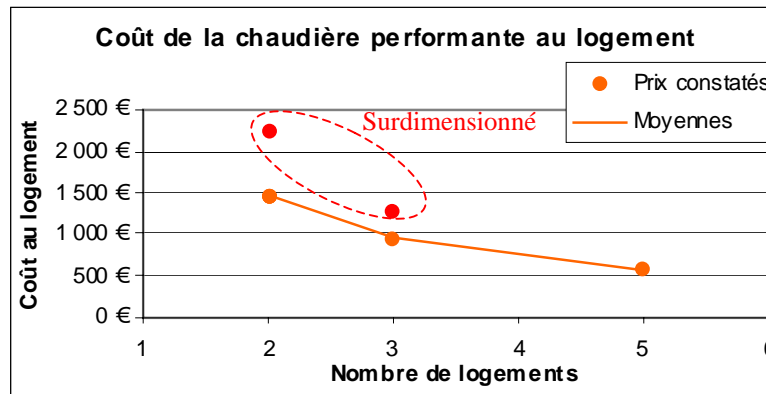


Figure 6.5 : Coût au logement des chaudières à condensation – moyenne sur les chaudières non excessivement surdimensionnées

On note que les opérations où la chaudière nous semble surdimensionnée présentent un coût au logement nettement plus élevé que les autres. On a vu au § II.5 tous les inconvénients qu'il y avait à surdimensionner les générateurs de chaleur et les équipements qui l'entouraient.... On confirme ici le rôle pénalisant de ce surdimensionnement d'un point de vue économique.

Enseignements à en tirer :

- Eviter à tout prix le surdimensionnement des générateurs. Réaliser le calcul des déperditions sans surpuissance.

VI.3.5 Installation solaire

Bien que non comprise dans les obligations de moyens de la STU, les installations d'ECS solaire sont courantes dans les rénovations énergétiques.

Les niveaux de prix observés sont assez hétérogènes, comme le montre le graphique ci-dessous :

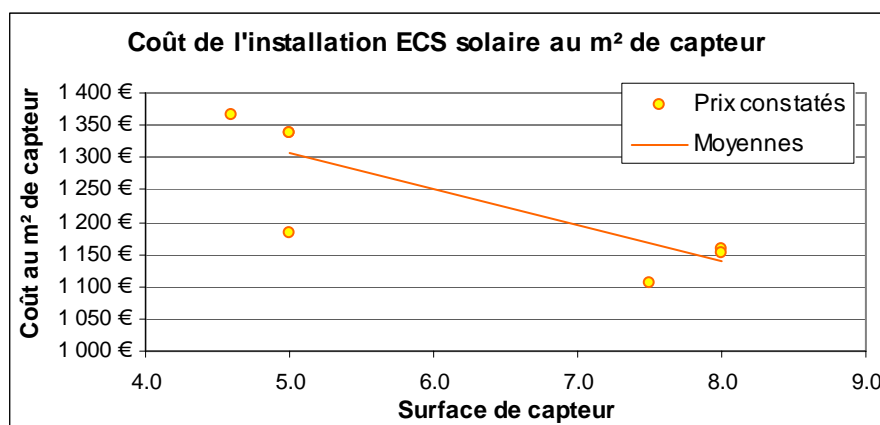


Figure 6.6 : Coût des installations solaire au m² de capteur en fonction de la surface de capteur

Mais ces prix sont beaucoup trop élevés par comparaison à ce qui se fait ailleurs en France où les prix sont en général inférieurs à 1000 €/m². On observe donc que certains installateurs pratiquent des prix plus élevés sans réelle justification technique. Et de surcroît on a vu que les installations ne fonctionnaient pas correctement dès la première année.... On peut soupçonner ce phénomène d'être lié aux subventions sur les installations solaires qui rendent acceptables par les clients ces niveaux de prix.

Enseignements à en tirer :

- Alerter les installateurs de systèmes solaires : les prix pratiqués notamment sur les opérations de petite taille nous semblent exagérés. Attention à ne pas tuer dans l'œuf le marché du solaire thermique en France.
- Alors que les prix du solaire thermique augmentent, les prix du solaire photovoltaïque diminuent en permanence. On pourrait presque dire de manière un peu provocante qu'il sera bientôt pertinent de générer l'ECS par des ballons électriques décentralisés alimentés en direct par des photopiles...

VI.3.6 Perspectives d'évolution des prix

Les opérations de rénovation de Mulhouse ont été les premières réalisations à ce niveau de performance en France.

Elles ont été suivies d'autres opérations, pour lesquelles nous avons appliqué la même méthodologie d'études de coûts. En ayant soin de ramener tous les prix à la même date (ici Nov 2009), on observe que les prix diminuent d'année en année. Ceci montre que les opérations de Mulhouse ont été des opérations pilotes, qui ont payé un certain prix **d'apprentissage** qui ne se reproduira pas sur les rénovations en cours et futures.

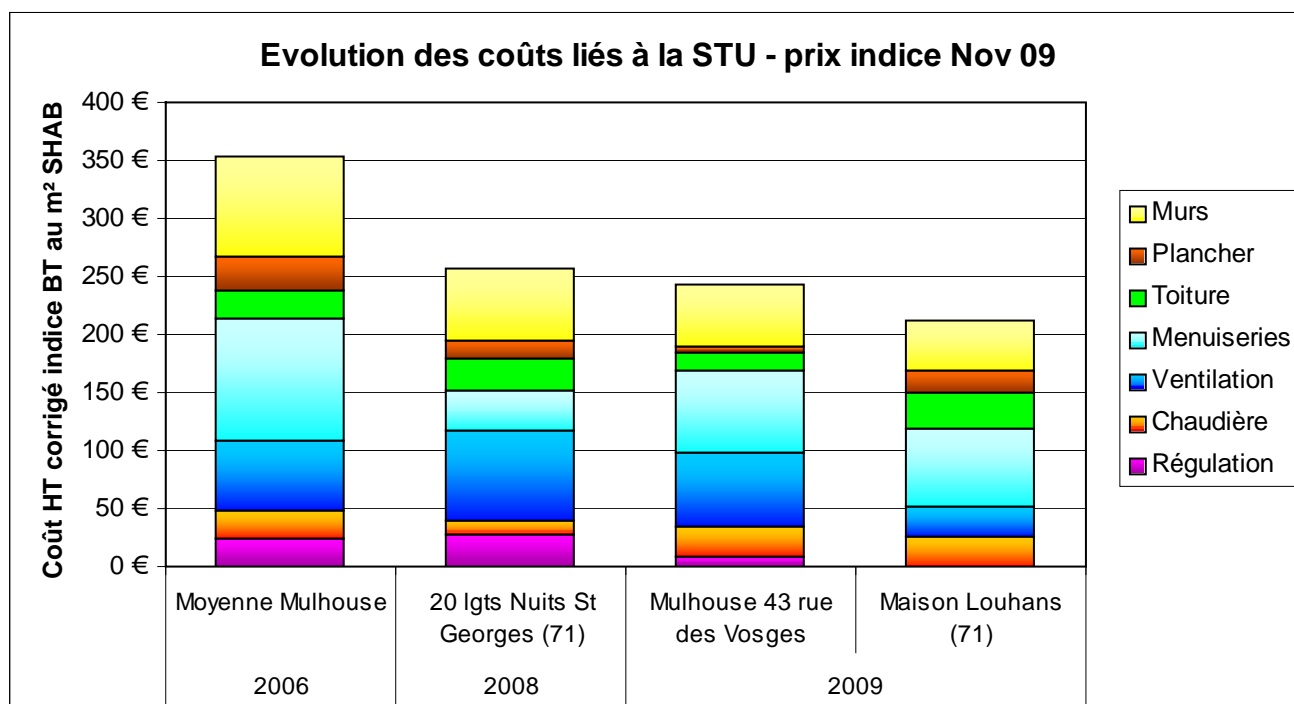


Figure 6.7 : Evolution, entre 2006 et 2009, des prix au m² SHAB (corrigé de l'indice BT nov 2009) de la STU à Mulhouse et en Bourgogne

Description sommaire des opérations de Bourgogne citées ci-dessus :

Opération	Nuits St Georges	Maison à Louhans
SHAB en m ²	1471 m ²	116 m ²
Nombre de logements	20	1
R murs ext	ITE PSE graphité 150mm R=4,69	ITI R=6,5
R pl. bas	Laine / PSE R=4,3 Flocage des retombées de poutres	R=5 sous dalle
R toiture	Polyuréthane R=7,5	R=7,5
Vitrages	Double vitrage Uw=1,6 classé A4	Triple vitrage Uw=1,1 classé A4
Ventilation	Ventilation double flux collective avec échangeurs individuels	Ventilation double flux
Chauffage	Chaudière Gaz à Condensation modulante 116 kW	PAC géothermique => nous avons compté le prix d'une chaudière Gaz à condensation pour permettre la comparaison
Emission	Radiateurs	Radiateurs très basse température
Régulation terminale	1 thermostat et 1 vanne électrothermique par pièce	1 thermostat et 1 vanne électrothermique par pièce
ECS	Solaire (non compté dans la STU) appoint Gaz	Par la génération de chauffage

Ces résultats nous semblent tout à fait encourageants. Après la période actuelle d'apprentissage, le prix de la STU devrait se situer sous le niveau des 200 €HT / m² SHAB et tendre vers 180 €HT /m² SHAB, voire moins, avec les optimisation économiques proposées ■

Partie VII : Synthèse - Conclusion

La rénovation du quartier Franklin à Mulhouse est la première opération de rénovation à très basse consommation de France. Elle a été imaginée en 2004 et lancée en 2005, c'est-à-dire à un moment où personne dans notre pays parlait de rénover les bâtiments à des niveaux de consommation deux fois inférieurs à ceux exigés par la réglementation thermique des bâtiments neufs. L'objectif visé était d'atteindre les « 50 kWh/m²/an ». Il faut donc saluer la clairvoyance de ceux qui sont à l'origine de cette opération exemplaire.

Cette rénovation a également été l'occasion d'appliquer pour la première fois la « Solution Technique Universelle » qui est une méthode d'intervention simplifiée que nous avons imaginée en 2004 pour faciliter la rénovation des bâtiments à très basse consommation sans être obligé de procéder à des calculs longs, complexes et coûteux. Cette méthode repose sur une obligation de moyens à mettre en oeuvre des dispositions propres aux différentes parois et aux équipements techniques d'un bâtiment, avec l'objectif bien sûr d'atteindre la performance énergétique visée. Elle a le grand mérite de simplifier considérablement la tâche du maître d'oeuvre, et surtout de garantir aux maîtres d'ouvrage des résultats qui ne s'écarteront pas beaucoup de l'objectif assigné, en tout cas beaucoup moins que si on laisse à chaque maître d'oeuvre l'initiative des dispositions à mettre en place (le calcul des très basses consommations nécessite obligatoirement la simulation dynamique, ce que peu de bureaux d'études savent encore faire de manière courante).

L'opération de rénovation du quartier Franklin a été rendue possible financièrement grâce à la mécanique des défiscalisations Malraux qui n'existent malheureusement plus aujourd'hui, ce qui pose aujourd'hui le problème de la reproduction de ce type d'opération.

La procédure mise en oeuvre par l'aménageur a permis de former trois équipes d'architectes qui ont bien travaillé sur les différents projets de rénovation. Chacun s'est investi minutieusement dans les détails nécessaires à la mise en oeuvre de projets d'une nature très nouvelle, et c'est un vrai sujet de satisfaction. En revanche cette phase de conception a mis en évidence la très grande faiblesse des bureaux d'études dont l'un d'entre eux ne s'était même pas aperçu qu'il travaillait sur un bâtiment à très basse consommation. Ce peu d'intérêt des bureaux d'études pour la conception et la rénovation des bâtiments à très basse consommation est un problème récurrent. Il serait temps que la profession se tourne vers ce sujet d'avenir car sans elle, l'équipe de maîtrise d'oeuvre et l'architecte connaîtront de grandes difficultés à atteindre les objectifs ambitieux qui sont désormais assignés de plus en plus par les maîtres d'ouvrage.

Enfin il faut relever que les chantiers n'ont pas posé de problème particulier. Ils se sont déroulés comme des chantiers ordinaires. À aucun moment nous n'avions introduit de ruptures technologiques pour parvenir au résultat, si bien que, malgré les épaisseurs d'isolant peu habituelles, l'ensemble des techniques utilisées était connu des entreprises qui sont intervenues. Un chantier de rénovation à très basse consommation n'est donc pas plus complexe que n'importe quelle autre opération.

L'évaluation des performances de ces rénovations a commencé par le test à la porte soufflante qui a démontré sans aucune ambiguïté que l'étanchéité à l'air des enveloppes était de très mauvaise qualité. Mais c'était un choix fait en 2005, à une époque où les techniques nécessaires pour rendre une enveloppe étanche n'étaient pas encore bien maîtrisées en France. Nous avons donc décidé de borner notre action à

l'étanchéité de la jonction menuiserie/mur. Que le résultat du test à la porte soufflante soit mauvais n'est donc pas étonnant. En revanche il a permis à chacun de prendre conscience que sans une bonne étanchéité à l'air de l'enveloppe il serait très difficile d'atteindre les objectifs énergétiques fixés. La leçon a donc été retenue pour la suite.

La qualité thermique de l'enveloppe se mesure à l'énergie utile fournie par la chaudière, c'est-à-dire au moyen des compteurs de chaleur placés immédiatement après celle-ci. Et cette consommation est de bonne qualité puisqu'en incluant l'ensemble des bâtiments suivis, même au moyen du relevé d'index, elle s'élève à 65,8 kWh/m²_{shab}/an. Si on exclut le bâtiment le plus consommateur dont les données ne sont pas très fiables, cette consommation est de 54,5 kWh/m²_{shab}/an. On doit considérer ces résultats comme excellents. Mais lorsqu'on examine l'énergie primaire nécessaire pour fournir cette énergie utile, on s'aperçoit qu'il y a une dégradation très forte de la performance liée à un rendement de mauvaise qualité de la génération de chaleur. En moyenne la consommation d'énergie primaire pour le chauffage s'élève à 84 kWh/m²_{shab}/an et, en éliminant le bâtiment douteux, à 71,5 kWh/m²_{shab}/an. Pour un objectif fixé à 50 kWh/m²_{shab}/an cela peut paraître un peu décevant. Mais il faut au contraire voir ici la preuve qu'une opération de rénovation sera performante à condition que les installations techniques soient du même niveau de performance et de qualité que l'enveloppe. Et notamment que la génération de chaleur et les équipements qui l'entourent ne soient jamais surdimensionnés, ce qui n'a pas été le cas, malgré nos recommandations, sur les différentes opérations du quartier Franklin. Il faudra accepter définitivement l'idée que, plus les bâtiments ont peu de besoins, plus le rendement de génération aura tendance à se dégrader et donc plus il sera nécessaire de ne pas surdimensionner la chaudière. Or c'est une constante chez tous les bureaux d'études de mettre en œuvre des puissances supérieures de 50 à 300 % à ce qui serait strictement nécessaire. Chacun doit comprendre qu'en procédant ainsi, on détruit en très grande partie les résultats potentiellement acquis par le renforcement des performances thermiques de l'enveloppe.

A priori, on est donc en droit d'être un peu déçu par les résultats bruts de cette opération de rénovation qui visait à atteindre une consommation de chauffage de 50 kWh/m²_{shab}/an mais qui n'arrivent finalement que vers 70 ou 80 kWh/m²_{shab}/an. Et en réalité, cette déception n'a pas lieu d'être. En effet l'analyse des raisons de ce dépassement révèle qu'il y a trois causes principales :

- d'abord l'inefficacité de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe qui a pénalisé le projet de 16 kWh/m²_{shab}/an. On sait maintenant avec certitude que lors des prochaines rénovations et il suffira de travailler sur l'étanchéité à l'air pour voir ipso facto la consommation régresser.

- En moyenne les températures pendant l'hiver ont largement dépassé 20°C dans les bâtiments. Ceci permet d'expliquer à nouveau 11 kWh/m²_{shab}/an. Rappelons que c'est un article du code de la construction et de l'habitation qui impose une température moyenne inférieure à 19°C dans les logements. C'est donc la loi. Et, *a priori*, une loi est faite pour être respectée. Sinon il faut la supprimer.

- La consommation d'électricité dans les logements a été beaucoup plus faible que celle observée en moyenne dans les logements français. Par voie de conséquence il a manqué 12 kWh/m²_{shab}/an d'apports gratuits qu'il a bien fallu compenser par le chauffage.

Ceci montre que l'objectif poursuivi par ces opérations de rénovation a en réalité été atteint. Mais pour différentes raisons, dont certaines sont parfaitement réversibles, la performance réelle a été un peu dégradée. Ceci nous montre notamment le rôle important du comportement des usagers dans des bâtiments à très faibles besoins.

L'eau chaude sanitaire a été un vrai sujet de satisfaction puisque la quantité d'énergie primaire nécessaire a été ramenée à 21,4 kWh/m²_{shab}/an alors que la moyenne nationale est de 38. Et l'analyse a parfaitement démontré que cette performance a été atteinte pratiquement exclusivement grâce à la présence des capteurs solaires, et pas au moyen des limiteurs de débit qui n'ont d'ailleurs probablement pas été mis en place dans ces opérations, en tout cas personne ne l'a vérifié. Ceci permet d'ailleurs de penser qu'on dispose-t-on d'une marge supplémentaire d'action en recourant à ces petits mécanismes à la fois peu chers et très efficaces à condition d'être correctement choisis, et surtout d'être posés au nez des robinets !

En revanche, la très forte consommation d'électricité des services généraux pose de nombreuses questions. Certes ces opérations étaient plus complexes que les opérations habituelles dans la mesure où elles mettaient en oeuvre une ventilation double flux d'une part et un chauffe-eau solaire d'autre part. Ces équipements accroissent évidemment la consommation des services généraux. Mais il est probable qu'en réalité, des dysfonctionnements importants ont dû exister, soit à cause d'un fonctionnement permanent de pompes ou de ventilateurs, soit à cause de l'absence de la variation de débit, soit encore à cause de résistances chauffantes qui sont restées malencontreusement en fonctionnement pendant une grande partie de l'année. Il y a là une source d'amélioration qu'il va falloir impérativement mettre en oeuvre. Mais cet incident nous montre également le soin qu'il faudra apporter à l'avenir au pilotage correct de tous les auxiliaires de chauffage, ventilation et production d'eau chaude sanitaire. Nous observons de manière récurrente que ces équipements sont souvent négligés en ce sens que chacun considère leur fonctionnement comme banal et ne nécessitant aucune attention particulière. C'est une erreur grave. Il faut au contraire attacher un soin tout particulier à définir les régimes de fonctionnement de ces auxiliaires, à préciser les périodes pendant lesquelles ils doivent être à l'arrêt, et à optimiser à tout instant leur fonctionnement. Ceci nous renvoie tout à la fois vers les bureaux d'études et vers les entreprises de maintenance. Les bureaux d'études doivent en effet préciser avec beaucoup plus de soin les modes de fonctionnement des auxiliaires. Les descriptions qu'on peut lire aujourd'hui dans les CCTP sont très sommaires, voire inexistantes, et en réalité c'est l'entreprise qui improvise sur le chantier et définit comme elle le peut, ou comme elle l'imagine, les modes de fonctionnement des auxiliaires. Mais elle n'a pas pour autant conscience du rôle de ceux-ci et du niveau de qualité qu'ils devraient respecter. Il n'est certes pas du ressort de l'entreprise de définir le fonctionnement des auxiliaires, mais en revanche il est de son ressort de les faire fonctionner correctement une fois que les définitions ont été précisées. Or il faut reconnaître que ce n'est pas souvent le cas, ce qui signifie qu'elles doivent aussi, de leur côté, améliorer la manière dont elles pilotent les installations en relation avec le cahier des charges qui leur a été fourni.

Enfin l'analyse économique qui a été faite sur le coût des différentes opérations montre que, comme on l'avait prévu, l'opération de Mulhouse apparaît comme le point de départ d'une courbe d'apprentissage des savoir-faire et des techniques. En conséquence son coût est élevé : **315 €HT/m²_{shab}**. Il est certain que si ce prix était un prix de marché en équilibre, cela pourrait faire craindre pour la suite du grand programme de rénovation nationale. Mais il n'en est rien. Les opérations qui ont suivi celles de Mulhouse ont montré qu'on pouvait déjà atteindre des coûts de rénovation de l'ordre de **200 €HT/m²_{shab}**. Ceci montre que l'analyse faite initialement est juste : **le coût de la rénovation à basse consommation sera situé demain entre 180 et 200 €HT/m²_{shab}**. Mais surtout il apparaît d'ores et déjà des secteurs d'amélioration importante qu'il va falloir rapidement expérimenter sur d'autres opérations. Le triple vitrage s'imposait au regard de toutes les simulations dynamiques faites depuis plusieurs années. Mais les menuisiers et/ou les entreprises qui le mettent en oeuvre semblent en avoir décidé autrement en imposant des prix parfaitement illégitimes. Si ces prix ne sont pas modifiés dans un futur proche, on abandonnera le triple vitrage comme solution de référence dans la rénovation thermique et on privilégiera plutôt l'amélioration de l'étanchéité à l'air des enveloppes capables de fournir une amélioration des performances au moins aussi importante et pour un coût beaucoup plus faible.

D'autres améliorations seront probablement apportées à l'émission de chaleur et aux systèmes régulateurs car dans les bâtiments très isolés, le transfert de chaleur se fait très difficilement de l'intérieur vers l'extérieur, mais il se fait très aisément d'une pièce à l'autre. Cette observation justifie de simplifier l'émission de chaleur en limitant à un, peut-être deux, le nombre d'émetteurs présents dans un logement. De la même manière les observations conduites jusqu'à présent laissent penser qu'il est illusoire dans ce type de bâtiments de pouvoir faire des régulations réellement différenciées pièce par pièce, et qu'il serait dès lors possible de n'avoir plus qu'un régulateur placé au centre du logement pour agir sur le seul émetteur encore en place. Ces propositions peuvent choquer, mais elles nous paraissent justifiées au regard de toutes les expérimentations que nous avons conduites à ce jour dans des bâtiments très performants, qu'ils soient rénovés ou neufs. Leur intérêt serait de générer d'importantes moins-values consécutives aux efforts consentis sur la qualité de l'enveloppe des bâtiments. En d'autres termes, les surinvestissements qui ont été faits légitimement pour réduire les consommations de chauffage vont également induire des moins-values qui n'étaient pas imaginées au départ mais qui sont la conséquence

d'un mode de fonctionnement différent des bâtiments d'un nouveau type. C'est la raison pour laquelle nous pensons que le coût de la rénovation pourrait donc baisser encore sensiblement.

Bien que le sujet n'entre pas dans le champ de la présente étude, il est nécessaire d'évoquer la question du financement des travaux de rénovation thermique. Jusqu'à présent la tendance générale observée consiste à financer ces travaux sur des durées relativement courtes de l'ordre de 10 ans, comme s'il s'agissait de travaux tout à fait ordinaires. En réalité la rénovation thermique permet à un propriétaire une forte revalorisation de son patrimoine. Il suffit de voir ce qui se passe en Suisse, pays d'avant-garde sur ces sujets, et où les bâtiments thermiquement rénovés à basse consommation se vendent au moins 10 % plus chers que les bâtiments ayant par ailleurs les mêmes caractéristiques. Il s'ensuit qu'on devrait considérer ces travaux de rénovation thermique comme un investissement lourd portant sur la valorisation du patrimoine, et qui devrait donc être amorti sur une durée d'au moins 20 ans. Si on veut bien raisonner sur des durées de 20 ans, on s'aperçoit que les annuités de remboursement d'un emprunt à 4 ou 5 % sont compensées dès la première année par l'économie d'énergie induite par les travaux de rénovation. Ceci est vrai dès que le baril de pétrole dépasse 70 \$ et pour des travaux de l'ordre de 200 € HT/m²_{shab}. Cette observation permet de penser que l'aide de l'État pourrait ne pas être nécessaire dans ce programme de rénovation nationale à condition bien sûr que les banques acceptent à nouveau de jouer leur rôle et s'engagent sur ce marché-là. Il nous semble que toute solution fondée sur des temps de retour plus courts, de l'ordre de 10 ans, n'est pas réaliste et ne permettra pas au marché de décoller.

Pour terminer sur cette opération du quartier Franklin nous voudrions faire quelques propositions pour aller plus loin sur les opérations qui ont fait l'objet d'un suivi afin de préciser notre compréhension des phénomènes et d'améliorer tout simplement la performance en apportant certaines modifications soit aux équipements soit au comportement :

A - Il faut d'abord **se donner les moyens, par une petite campagne de mesure, d'affiner les éléments qui sont à la base de l'analyse** figurant dans ce rapport. Pour cela il faudrait confirmer la dégradation des rendements de génération que nous avons constatée lorsque les besoins des logements sont très faibles. Il faut caractériser les raisons de cette dégradation, identifier les remèdes et sensibiliser les bureaux d'études.

B - Il faudra aussi travailler avec les usagers afin de **modifier leur comportement de manière durable**. Il n'est guère possible d'accepter, en hiver, que chaque matin quelqu'un parte en laissant grande ouverte la fenêtre de son logement pour ne la refermer que le soir en rentrant du travail. Cette pratique, observée à Mulhouse, ruine assurément les meilleurs projets ! Elle doit être expliquée et combattue. Un travail devra aussi être fait pour limiter les températures intérieures. A ce titre, le bridage des thermostats d'ambiance paraît inévitable.

C - L'étanchéité à l'air des enveloppes doit devenir une priorité sur toutes les prochaines opérations. Il faut se fixer des objectifs ambitieux qui seront caractérisés par un test à la porte soufflante afin d'obtenir une valeur de $n_{50} \leq 1$ vol/h.

D - Les causes de la surconsommation des services généraux doivent être analysées très en détail. Pour cela une campagne de mesures complémentaire devrait être menée en veillant à ce que chaque usage des services généraux puisse faire l'objet d'un suivi, ce qui n'était pas prévu dans la campagne qui a été faite. À la suite de cette campagne, il faudra apporter des remèdes aux dysfonctionnements des services généraux qui auront été identifiés.

E - Au-delà de cette opération du quartier Franklin, nous avons poursuivi nos travaux en 2009 au moyen de très nombreuses simulations dynamiques et avons mis au point des « Solutions Techniques de Référence » (STR) plus adaptées aux exigences du Grenelle de l'Environnement sur la rénovation, et qui permettent, toujours sur la base d'obligations de moyens, de choisir des stratégies de rénovation s'ouvrant à d'autres paramètres comme le degré de qualité d'étanchéité à l'air des enveloppes. Elles se substituent désormais à la Solution Technique Universelle.

La rénovation du quartier Franklin à Mulhouse est une opération qui a permis de montrer que la rénovation à très basse consommation d'énergie ne nécessitait aucune rupture technologique, qu'elle était même relativement simple à mettre en oeuvre, que son coût devrait pouvoir être très rapidement maîtrisé et qu'enfin la grande ambition du Grenelle de l'environnement de réduire de 38 % d'ici 2020 la consommation des bâtiments est parfaitement possible d'un point de vue technique. Les questions restant à régler concernent le financement de ce programme sur des bases réalistes, et surtout, l'abandon de la politique d'incitation à rénover au profit d'une politique d'obligations à rénover sans laquelle nous ne pourrions jamais atteindre les résultats escomptés d'ici 2020. Or il en va simplement de la survie de la planète. Certes, rendre obligatoire la rénovation n'est probablement pas très populaire, mais ce serait une marque de courage et surtout de réalisme ■

Partie VIII : Annexe récapitulative

TABLEAU RECAPITULATIF DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

	13 Vosges	31 Vosges	33 Maçons	53 Runtz	37 Runtz	19 Vosges	45 Vosges
Surface habitable	122	184	201	178	188	124	111
Nombre de logement	2	3	5	3	3	2	2
Nombre de personne (total par bâtiment)	4	5	9	7	7	4	4
Système de régulation chauffage	Thermostats+ vannes électrothermiques	Thermostat central + robinets thermostatiques dans les différentes pièces	Thermostats+ vannes électrothermiques				
Marque référence ventilation	Systemair VR700EV	Lemmen's REC HR1	Systemair VR700EV	Systemair VR700EV	Systemair VR700EV	Systemair VR700EV	Lemmen's REC HR1
Consommation chauffage (besoins) (kWh/an/m²)	26,4	79,6	58,8	121,2	67,0	41,6	
Consommation ECS (besoins) (kWh./an/m²)	12,6	12,0	20,4	20,9	10,9	5,2	
Consommation ECS solaire (besoins) (kWh/an/m²)	Problème de comptage	10,0	20,7	14,3	Problème de comptage	Problème de comptage	
Taux de couverture moyen (%)		45%	50%	41%			
Puissance chaudière (KW)	15	35	15	15	?	15	35
Consommation gaz (kWh/an/m²)	72,5	102,2	102,0	148,2	Pas de relève compteur gaz Ou de compteur de chaleur		
Rendement de génération Hiver/Eté	54 / 53	90 / 81	79 / 70	96 / 92			
Taux de charge annuel de la chaudière (%)		12%	20%				
Consommation électrique services généraux (kWh/an/m²) (kWh/an/log)	22,6	8,9	28,9	15,8	18,1	18,9	11,1
	1381,0	544,7	1164,2	939,0	1134,7	1168,5	615,0
Consommation globale des services généraux (hors logements) (kWh/m²/an)	140,2	128,9	188,8	195,7			
Consommation électrique logements (kWh/an/m²) (kWh/an/log)	28,5	21,8	25,5				
	1286,5	1233,0	942,2				
Température moyenne (janvier/février)	16,8	20,8	18,2				
Température moyenne (juillet Août)	25,6	25,2	24,5				
Nombre d'heures au dessus de 28°C en juillet août	39,0	54,9	32,9				