



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

AUDIT ÉNERGÉTIQUE D'UN BÂTIMENT DE
BUREAUX : PROPOSITION DE STRATÉGIES DE
RÉNOVATION

Réalisé par

Julien Belligoi

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade
d'Ingénieur Civil des Constructions

Promoteur : Dr Ir P. André

Jury : Prof. Dr Ir J-M. Hauglustaine, Prof. Dr Ir V. Lemort,
Ir S. Bertagnolio, Ir B. Fabry et P. Hancart (Igretec)

Remerciements

Je remercie en premier lieu Monsieur Philippe André pour m'avoir permis de collaborer sur ce projet européen et de m'avoir suivi pendant ces mois de travail.

Je tiens ensuite à remercier Stéphane Bertagnolio et Bertrand Fabry pour leur aide précieuse et leurs conseils avisés, leur disponibilité et le suivi de ce travail avec beaucoup d'intérêts.

Je remercie également les autres membres du jury, les Professeurs Jean-Marie Hauglustaine et Vincent Lemort et Philippe Hancart d'Igretec pour le temps qu'ils accorderont à la lecture de mon travail de fin d'études.

Mes remerciements s'adressent aussi à la société Infravision sprl basée à Remicourt pour le matériel et le personnel mis à disposition afin de réaliser une thermographie du bâtiment.

Je tiens à remercier la section des 2^e Master Ingénieur Civil des Constructions et plus particulièrement ceux de l'option « Architecture et Ingénierie du bâtiment » pour les quelques années passées ensemble, la bonne ambiance et l'entraide.

Finalement, un tout grand merci à mes parents, mes amis, ma famille, et toutes les personnes que j'oublie pour leur soutien lors de ce travail.

RÉSUMÉ

Ce travail d'audit énergétique est réalisé dans le cadre du projet européen lancé en 2007, HarmonAC, qui a pour objectif de mettre en place des procédures d'inspection efficaces pour des systèmes de conditionnement d'air utilisés dans les bâtiments du secteur tertiaire.

Il s'agit d'auditer un bâtiment de bureaux de taille moyenne. Le but premier de ce audit est de calibrer le mieux possible le modèle par rapport à la réalité (et donc aux consommations réelles du bâtiment) avec le programme SimAudit, développé par S. Bertagnolio.

La calibration étant une partie assez délicate à réaliser, la première étape est de déterminer les nombreux paramètres caractérisant le bâtiment, le système HVAC (production de chaud et de froid, ventilation) et l'occupation du bâtiment. Une fois cette étape réalisée, il est donc possible de calibrer le modèle en faisant varier divers paramètres pour approcher au mieux la réalité.

Dès que la calibration a un niveau de précision dans les tolérances fixées, la deuxième partie de l'audit peut commencer. Il s'agit de proposer des stratégies de rénovation afin de réduire les coûts énergétiques et d'améliorer la performance énergétique du bâtiment. Différents cas seront envisagés comme le remplacement de chaudières classiques par des chaudières à condensation. Les économies d'énergie seront mises en évidence dans les différents cas et seront comparées entre-elles.

En conclusion, ce travail permettra de mettre en évidence les économies d'énergies pouvant être envisagée et réalisées par la société possédant le bâtiment afin de réduire les énergies consommées par ce bâtiment.

ABSTRACT

This energy audit work is carried out in the framework of the European project launched in 2007, HarmonAC, which has for aim to implement effective inspection procedures for air conditioning systems used in the service sector.

This work consists to audit a medium size office building. The primary purpose of this audit is to calibrate in the best possible way the model to stick to reality (and to the actual consumptions of the building) with SimAudit, a program developed by S. Bertagnolio.

The calibration is a rather difficult approach to achieve and the first step is to determine all the parameters that characterize the building, the HVAC system (production of heating and cooling, ventilation) and the occupation of the building. Once this step is completed, it is possible to calibrate the model by varying various parameters to approach the reality as well as possible.

Once the calibration has an accuracy as good as possible, the second part of the audit can begin. It is to propose renovation strategies to reduce energy costs and improve building energy performance. Different cases will be considered as the replacement of classical boilers by condensing boilers. The energy savings will be highlighted in these cases and compared to each others.

In conclusion, this work will highlight the energy savings that can be considered and implemented by the company owning the building in order to reduce the energy consumptions of the building.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	11
1.1. Contexte au sein de l'Union Européenne.....	11
1.2. Contexte en Région Wallonne.....	15
2. OBJECTIF DU TRAVAIL	19
2.1. Objectif du travail	19
2.2. Projet HarmonAC.....	19
3. MÉTHODOLOGIE	21
3.1. Présentation du bâtiment	21
3.2. Analyse détaillée des mesures effectuées	21
3.3. Modélisation et paramétrage du bâtiment et paramétrage de SimAudit	21
3.4. Simulations, calibration, résultats et améliorations en vue d'une rénovation	21
4. PRÉSENTATION DU BÂTIMENT	22
4.1. Description générale	22
4.2. Présentation du système HVAC.....	25
4.2.1. Production de chaleur	25
4.2.2. Production de froid.....	26
4.2.3. Ventilation	27
5. CONSOMMATIONS RÉELLES DU BÂTIMENT.....	33
5.1. Données météorologiques	33
5.2. Relevés de mesures.....	34
5.3. Consommation électrique	35
5.3.1. Consommation totale annuelle	35
5.3.2. Données importantes résultantes des mesures effectuées	37
5.4. Consommation de gaz naturel	41
5.5. Interaction entre consommations de gaz naturel et d'électricité	43
6. MODÉLISATION ET PARAMÉTRAGE EN VUE DE LA CALIBRATION AVEC SIMAUDIT.....	44
6.1. Présentation de SimAudit.....	44
6.2. Modélisation du bâtiment.....	44
6.2.1. Orientation du bâtiment.....	44
6.2.2. Caractérisation de l'enveloppe et des murs composant le bâtiment	45
6.2.3. Division multi-zonale	50
6.2.4. Fonctionnement et occupation du bâtiment	53

6.2.5.	Gains internes	54
6.2.6.	Système HVAC.....	54
7.	CALIBRATION DU MODÈLE AVEC SIMAUDIT	57
7.1.	Pourquoi effectuer une calibration ?	57
7.2.	Méthodologie	57
7.3.	Résultats des simulations	58
7.3.1.	Consommation électrique	58
7.3.2.	Consommation de gaz naturel.....	60
7.3.3.	Erreurs du modèle	60
8.	RÉNOVATION ET AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT	63
8.1.	Introduction.....	63
8.2.	Cas 1 : Utilisation de vitrages et de châssis de fenêtre performants.....	63
8.2.1.	Introduction	63
8.2.2.	Impact sur la consommation électrique	64
8.2.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	65
8.2.4.	Retour sur investissement	65
8.3.	Cas 2 : Remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation	66
8.3.1.	Introduction	66
8.3.2.	Impact sur la consommation électrique	66
8.3.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	67
8.3.4.	Retour sur investissement	67
8.4.	Cas 3 : Nouveaux murs opaques avec un coefficient de transmission thermique de 0,4 W/m ² K..	68
8.4.1.	Introduction	68
8.4.2.	Impact sur la consommation électrique	68
8.4.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	69
8.5.	Cas 4 : Utilisation rationnelle de la ventilation	69
8.5.1.	Introduction	69
8.5.2.	Impact sur la consommation électrique	69
8.5.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	70
8.6.	Cas 5 : Remplacement du chiller par un chiller plus performant.....	71
8.6.1.	Introduction	71
8.6.2.	Impact sur la consommation électrique	72
8.6.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	72
8.7.	Cas 6 : Variation de la température de pulsion.....	72

8.7.1.	Introduction	72
8.7.2.	Impact sur la consommation électrique	73
8.7.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	74
8.8.	Cas 7 : Utilisation de lampes à basses consommations et à haut rendement.....	74
8.8.1.	Introduction	74
8.8.2.	Impact sur la consommation électrique	75
8.8.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	75
8.8.4.	Équilibre des coûts.....	76
8.9.	Cas 8 : Modification de la température ambiante lorsque le bâtiment est inoccupé pour la production de chaud	76
8.9.1.	Introduction	76
8.9.2.	Impact sur la consommation électrique	76
8.9.3.	Impact sur la consommation de gaz naturel	77
8.10.	Conclusion	78
8.10.1.	Consommations énergétiques.....	78
8.10.2.	Émissions CO ₂	79
9.	CONCLUSIONS	81
10.	BIBLIOGRAPHIE	83
11.	ANNEXES	85
11.1.	Annexe A.....	85
11.2.	Annexe B.....	86
11.3.	Annexe C.....	87
11.4.	Annexe D	88
11.4.1.	Introduction	88
11.4.2.	Matériel utilisé	88
11.4.3.	Extérieur.....	89
11.4.4.	Intérieur	90
11.5.	Annexe E	91
11.6.	Annexe F	92
11.7.	Annexe G	93
11.7.1.	Consommation électrique	93
11.7.2.	Consommation de gaz naturel.....	94
11.8.	Annexe H	95
11.9.	Annexe I.....	96
11.10.	Annexe J.....	102

11.11. Annexe K	108
11.12. Annexe L	109

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : AUGMENTATION DES PRIX DE L'ÉNERGIE EN 2010 EN POURCENTAGE (ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES, 1999, MODIFIÉ)	13
FIGURE 2 : EVOLUTION DU PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ EN BELGIQUE ENTRE 2002 ET 2007 (ESSENCE, 2008)	14
FIGURE 3 : EVOLUTION DU PRIX DU GAZ NATUREL EN BELGIQUE ENTRE 2002 ET 2007 (ESSENCE, 2008)	15
FIGURE 4 : BÂTIMENT À AUDITER À CHARLEROI	22
FIGURE 5 : VUES DE FACE ET DE PROFIL DU BÂTIMENT (APARECIDA SILVA ET AL., 2008)	23
FIGURE 6 : DIMENSIONS DU BÂTIMENT (APARECIDA SILVA ET AL., 2008)	23
FIGURE 7 : VUES GÉNÉRALES DU BÂTIMENT (APARECIDA SILVA ET AL., 2008)	24
FIGURE 8 : CHAUDIÈRES CLASSIQUES DE 318 kW (APARECIDA SILVA ET AL., 2008)	25
FIGURE 9 : LOI DE TEMPÉRATURE DES CHAUDIÈRES	26
FIGURE 10 : COMPRESSEUR DU CHILLER	27
FIGURE 11 : UNITÉ DE TRAITEMENT D'AIR - AHU2 (APARECIDA SILVA ET AL., 2008, MODIFIÉ)	28
FIGURE 12 : HUMIDIFICATEUR ADIABATIQUE	29
FIGURE 13 : UNITÉ TERMINALE VAV (APARECIDA SILVA ET AL., 2008)	30
FIGURE 14 : LOCALISATION DES BATTERIES DE RÉCHAUFFE, DES UNITÉS TERMINALES VAV ET DES THERMOSTATS (DULIEU, 2010) ..	32
FIGURE 15 : PROXIMITÉ ENTRE MONS ET CHARLEROI	33
FIGURE 16 : PRÉSENTATION DU SYSTÈME HVAC ET DES ENDROITS DE MESURES DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE	35
FIGURE 17 : CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES MENSUELLE ET MOYENNE ANNUELLE MESURÉES	36
FIGURE 18 : PISSION DU GROUPE FRIGORIFIQUE SUR UNE SEMAINE DU MOIS D'AOÛT 2009	37
FIGURE 19 : PISSIONS DES VENTILATEURS DE PULSION ET D'EXTRACTION POUR LES MOIS D'AOÛT ET DE DÉCEMBRE DE L'ANNÉE 2009	38
FIGURE 20 : CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DE L'ÉCLAIRAGE ET DE L'APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE POUR LE MOIS DE SEPTEMBRE 2009 ..	39
FIGURE 21 : CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DU LUNDI 7 SEPTEMBRE	40
FIGURE 22 : CONSOMMATION MENSUELLE DE GAZ NATUREL POUR LES 4 ÉTAGES DE L'OCCUPANT 2	42
FIGURE 23 : INTERACTION ENTRE CONSOMMATIONS DE GAZ NATUREL ET D'ÉLECTRICITÉ	43
FIGURE 24 : ORIENTATION DU BÂTIMENT	45
FIGURE 25 : DIFFÉRENTS TYPES DE MUR (DULIEU, 2010, MODIFIÉ)	46
FIGURE 26 : MURS EXTÉRIEURS COMPOSÉS DE PANNEAUX PRÉFABRIQUÉS EN BÉTON ARCHITECTONIQUE (FEBE, 2010)	47
FIGURE 27 : FENÊTRE DU BÂTIMENT À CHARLEROI	49
FIGURE 28 : DOUBLE VITRAGE DES FENÊTRES DU BÂTIMENT	50
FIGURE 29 : DIVISION DE L'ÉTAGE 4 EN 5 ZONES (DULIEU, 2010, MODIFIÉ)	52
FIGURE 30 : FONCTIONNEMENT DU BÂTIMENT POUR UN JOUR DE LA SEMAINE	53
FIGURE 31 : PROFIL DE VENTILATION DU BÂTIMENT	54
FIGURE 32 : LOI DE TEMPÉRATURE DE PULSION	55
FIGURE 33 : CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES MESURÉE (BÂTONNETS BLEUS) ET SIMULÉE (BÂTONNETS ROUGES)	58
FIGURE 34 : RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE MESURÉE DU MOIS D'AOÛT EN FONCTION DE L'UTILISATION	59
FIGURE 35 : RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE MESURÉE DU MOIS DE DÉCEMBRE EN FONCTION DE L'UTILISATION ..	59
FIGURE 36 : CONSOMMATIONS DE GAZ NATUREL MESURÉE (BÂTONNETS BLEUS) ET SIMULÉE (BÂTONNETS ROUGES)	60
FIGURE 37 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE AVEC LE REMPLACEMENT DES FENÊTRES	64
FIGURE 38 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL AVEC LE REMPLACEMENT DES FENÊTRES	65
FIGURE 39 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE AVEC LE REMPLACEMENT DES CHAUDIÈRES	66
FIGURE 40 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL AVEC LE REMPLACEMENT DES CHAUDIÈRES	67
FIGURE 41 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE AVEC L'UTILISATION DE MURS PLUS PERFORMANTS	68
FIGURE 42 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL AVEC L'UTILISATION DE MURS PLUS PERFORMANTS	69
FIGURE 43 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN UTILISANT RATIONNELLEMENT LA VENTILATION	70
FIGURE 44 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL EN UTILISANT RATIONNELLEMENT LA VENTILATION	71
FIGURE 45 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE AVEC L'UTILISATION D'UN CHILLER PLUS PERFORMANT	72
FIGURE 46 : MODIFICATION DE LA TEMPÉRATURE DE PULSION DE L'AIR AVANT PASSAGE DANS LES BATTERIES DE RÉCHAUFFE	73
FIGURE 47 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN MODIFIANT LA TEMPÉRATURE DE PULSION DE L'AIR	73
FIGURE 48 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL EN MODIFIANT LA TEMPÉRATURE DE PULSION DE L'AIR	74
FIGURE 49 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN UTILISANT DES LAMPES À BASSE CONSOMMATION	75
FIGURE 50 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL EN UTILISANT DES LAMPES À BASSE CONSOMMATION	75
FIGURE 51 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN MODIFIANT LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE AMBIANTE	77

FIGURE 52 : IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL EN MODIFIANT LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE AMBIANTE.....	77
FIGURE 53 : JUSTIFICATION DE LA LOI DE TEMPÉRATURE POUR L'EAU CHAUDE (APARECIDA SILVA ET AL., 2008).....	85
FIGURE 54 : CAMÉRA FLIR THERMACAM PM 695 UTILISÉE POUR LA THERMOGRAPHIE	88
FIGURE 55 : THERMOGRAMME D'UNE PARTIE DES ÉTAGES 6 ET 7 DE LA FAÇADE SUD-OUEST	89
FIGURE 56 : THERMOGRAMME D'UNE PARTIE DES ÉTAGES 4 ET 5 DE LA FAÇADE NORD-OUEST	89
FIGURE 57 : THERMOGRAMME D'UN MUR ET D'UNE FENÊTRE INTÉRIEURS DE L'ÉTAGE 4	90
FIGURE 58 : COEFFICIENTS EER POUR LES CONDENSEURS À AIR EN FONCTION DE LA PUISSEANCE DU CHILLER (BERTAGNOLIO & STABAT, 2009)	91
FIGURE 59 : CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES PAR MÈTRE CARRÉ SUR LES 12 MOIS CONSIDÉRÉS	93
FIGURE 60 : CONSOMMATIONS DE GAZ NATUREL PAR MÈTRE CARRÉ SUR LES 12 MOIS CONSIDÉRÉS.....	94
FIGURE 61 : CONCENTRATION EN CO ₂ DANS L'AIR DES LOCAUX (ANDRÉ & FRANCK, 2009).	108
 TABLEAU 1 : ENERGIES PRIMAIRE ET CONSOMMÉE AU NIVEAU EUROPÉEN EN 2006 (BRÜLL, 2009)	11
TABLEAU 2 : ESTIMATIONS DU POTENTIEL D'ÉCONOMIES D'ÉNERGIE DE L'UE-27 (BRÜLL, 2009)	12
TABLEAU 3 : ENERGIES PRIMAIRE ET CONSOMMÉE EN RÉGION WALLONNE EN 2006 (BRÜLL, 2009, MODIFIÉ)	16
TABLEAU 4 : ESTIMATION DE LA PART DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LA CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE DE LA RÉGION WALLONNE (BRÜLL, 2009)	17
TABLEAU 5 : CARACTÉRISTIQUES DU GROUPE DE FROID.....	26
TABLEAU 6 : CARACTÉRISTIQUES DES GP ET GE	29
TABLEAU 7 : NOMBRE D'UNITÉS TERMINALES VAV ET DE BATTERIES DE RÉCHAUFFE (APARECIDA SILVA ET AL., 2008).....	30
TABLEAU 8 : LÉGENDE POUR LA FIGURE 14	31
TABLEAU 9 : COMPARAISON DES TEMPÉRATURES MOYENNES À CHARLEROI ET MONS.....	34
TABLEAU 10 : CONSOMMATION MENSUELLE ÉLECTRIQUE POUR L'ÉTAGE 6	39
TABLEAU 11 : PUISSEANCE TOTALE MENSUELLE PAR UNITÉ DE SURFACE.....	41
TABLEAU 12 : OCCUPATION DU BÂTIMENT.....	42
TABLEAU 13 : ORIENTATION DU BÂTIMENT	45
TABLEAU 14 : DIFFÉRENTS MURS COMPOSANT CHAQUE ÉTAGE	45
TABLEAU 15 : CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS MURS (ENERGIE PLUS, 2010)	48
TABLEAU 16 : COMPOSANTS D'UNE FENÊTRE.....	50
TABLEAU 17 : CARACTÉRISTIQUES DES ZONES (SURFACES CLIMATISÉE, DES MURS ADJACENTS ET DES MURS INTÉRIEURS).....	51
TABLEAU 18 : CARACTÉRISTIQUES DES ZONES (SURFACES DES MURS EXTÉRIEURS ET DES FENÊTRES).....	51
TABLEAU 19 : ERREURS DE LA CALIBRATION RÉALISÉE	61
TABLEAU 20 : ERREURS DE LA CALIBRATION SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE EN FONCTION DES PÉRIODES DE L'ANNÉE.....	62
TABLEAU 21 : RÉCAPITULATION DES DIFFÉRENTS GAINS ÉNERGÉTIQUES MOYENS POSSIBLES EN FONCTION DES AMÉLIORATIONS/RÉNOVATIONS	78
TABLEAU 22 : GAINS EN ÉMISSIONS DE CO ₂ POUVANT ÊTRE ENVISAGÉS	80
TABLEAU 23 : CONSOMMATIONS ÉLECTRIQUES MESURÉE ET SIMULÉE	86
TABLEAU 24 : CONSOMMATIONS DE GAZ NATUREL MESURÉE ET SIMULÉE	87
TABLEAU 25 : PARAMÈTRES PRINCIPAUX UTILISÉS LORS DE LA CALIBRATION	92
TABLEAU 26 : DIFFÉRENTES ECOS ENVISAGÉES	95
TABLEAU 27 : INTERVALLES D'ÉCONOMIES D'ÉNERGIES EN FONCTION DES DIFFÉRENTS CAS DE RÉNOVATION.....	110

1. INTRODUCTION

Avant d'entrer directement dans le vif du sujet, il est important d'introduire la situation au sein de l'Union Européenne et de la Région Wallonne afin d'avoir une idée globale du « pourquoi » du projet étudié.

1.1. CONTEXTE AU SEIN DE L'UNION EUROPÉENNE

Face au réchauffement climatique et à l'augmentation importante des gaz à effet de serre, la Communauté Internationale reconnaît, en 1992, l'importance du risque présenté par le changement climatique. Les gouvernements de certains pays s'engagent alors à prendre des mesures dont « l'objectif ultime est de stabiliser les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ».

Le premier pas en ce sens est le Protocole de Kyoto (négocié en 1997) qui engage 38 pays industrialisés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2% d'ici 2012 par rapport aux émissions de 1990.

L'approbation du Protocole de Kyoto par l'Union Européenne en 2002 impose à cette dernière de réduire, au cours de la période 2008-2012, ses émissions de gaz à effet de serre de 8% par rapport aux niveaux de 1990. Par ailleurs, l'objectif assigné à la Belgique est une réduction de 7,5% (Brüll, 2009).

Le tableau 1 reprend les grandes données du bilan énergétique européen pour l'année 2006 :

Tableau 1 : Energies primaire et consommée au niveau européen en 2006 (Brüll, 2009)

Énergie dans l'UE-27 en 2006	Mtep ¹	%	%
Énergie primaire	1825	100	
Pertes – Transformations	648	35	
Énergie finale consommée	1177		100
Industrie	323		27
Transports	370		31
Autres (tertiaire, logements,...)	484		42

¹ Mégatonne d'équivalent pétrole. Une tonne d'équivalent pétrole (tep) est l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole : 1 tep = 41,868 GJ (Brüll, 2009).

Les 1825 Mtep que l'Union européenne a consommés en 2006 en énergie primaire représentent 15,5 % de l'énergie primaire mondiale (la part de l'UE dans la population mondiale était de 7,5% en 2006). L'UE est, en fait, la troisième grande consommatrice d'énergie derrière les Etats-Unis (avec 19,8 %) et la Chine (avec 16 %).

L'un des prochains grands objectifs de l'Union Européenne est de réduire la consommation d'énergie de 20 % par rapport à la consommation énergétique prévue en 2020 grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique (Brüll, 2009). En effet, la consommation d'énergie dans les secteurs tertiaire et résidentiel, entre autre, représente plus de 40% de l'énergie consommée en 2006. Il apparait donc important d'agir rapidement dans ces domaines afin de réduire au maximum l'énergie consommée.

Le potentiel technique² des économies d'énergie au sein de l'UE-27 s'élèverait à plus de 20 % de la consommation d'énergie d'ici 2020 (voir tableau 2).

Tableau 2 : Estimations du potentiel d'économies d'énergie de l'UE-27 (Brüll, 2009)

Secteur	Énergie consommée en 2020 [Mtep]	Potentiel d'économies d'énergie en 2020 [Mtep]	Potentiel d'économies d'énergie en 2020 par rapport aux projections pour 2020 [%]
Énergie primaire	1968		
Pertes	621		
Énergie finale consommée	1347		
Industrie	367	70	19
Transports	439	88	20
Autres (tertiaire, logements,...)	541	162	30

Le plus gros potentiel d'économies d'énergie, avec un bon rapport coût-efficacité, se situe dans le secteur des logements et du tertiaire (30 % d'économies d'énergies possibles d'ici 2020). Notons que les secteurs de l'industrie et des transports ont également un rôle à jouer avec des possibilités de réduction respectivement de 19% et 20% de l'énergie. L'amélioration de l'efficacité énergétique constitue un élément essentiel pour répondre plus facilement aux objectifs contraignants de la directive SER (Sources d'énergie renouvelable). En effet, la

² Le **potentiel technique** est défini comme la quantité d'énergie qui peut être économisée, par rapport à la situation du scénario de référence en 2020, au moyen des mesures (généralement technologiques) actuellement disponibles, sans limite de coût.

réalisation d'économies d'énergie est une méthode efficace afin d'augmenter la part en pourcentage d'énergie produite à partir de sources renouvelables (Brüll, 2009).

C'est dans cette optique qu'une directive sur la performance énergétique des bâtiments voit le jour le 16 décembre 2002 : la Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil. Pour ce faire, les États membres de l'UE doivent appliquer des exigences minimales en matière de performance énergétique pour les bâtiments neufs et existants, veiller à la certification de la performance énergétique des bâtiments et imposer l'inspection régulière des chaudières et des systèmes de climatisation dans les bâtiments (Europa, 2007).

Les dispositions de la Directive 2002/91/CE concernent non seulement le secteur résidentiel et le secteur tertiaire (bureaux, bâtiments publics, etc.) mais également les autres types de bâtiments (pour autant qu'ils soient chauffés). Néanmoins, certains bâtiments sont exclus du champ d'application des dispositions relatives à la certification, par exemple les bâtiments historiques, les sites industriels, etc. Elle vise tous les aspects de l'efficacité énergétique des bâtiments en vue d'établir une approche réellement intégrée (Europa, 2007; Région Wallonne, 2009).

Une autre raison importante visant à favoriser une réduction de la consommation énergétique est le prix des énergies. L'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) a prédit, en 1999, une forte augmentation des prix de l'énergie en 2010 (voir Figure 1).

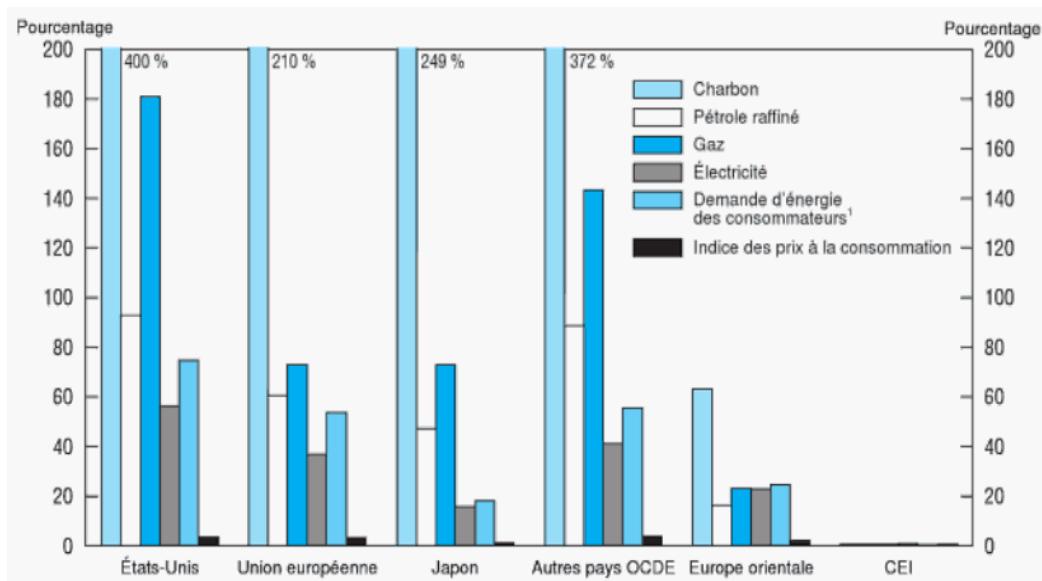


Figure 1 : Augmentation des prix de l'énergie en 2010 en pourcentage (Organisation de Coopération et de Développement Economiques, 1999, modifié)

Sur la Figure 1, il en résulte que, dans les pays membres³ de l'OCDE, le prix du charbon serait majoré de 200 à 400 pour cent. Le prix des autres sources d'énergie augmenterait également : le prix moyen à la consommation des services fournis par le secteur de l'énergie s'élèverait de plus de 50 pour cent (Organisation de Coopération et de Développement Economiques, 1999).

Si l'on se focalise uniquement sur la Belgique, il est intéressant de voir l'évolution des prix pour certaines sources d'énergie telles que l'électricité et le gaz naturel.

Pour l'électricité (voir Figure 2), les prix augmentent pour tous types de consommateurs mais ce sont les plus gros consommateurs (courbe orange) qui ont subi la plus forte augmentation. En effet, en 2007, ils payaient environ 80% de plus qu'en 2002 alors que les plus petits consommateurs (courbe bleue) ont été confrontés à une hausse de 10 à 15%, mais connaissaient déjà en 2002 un niveau de prix sensiblement plus élevé.

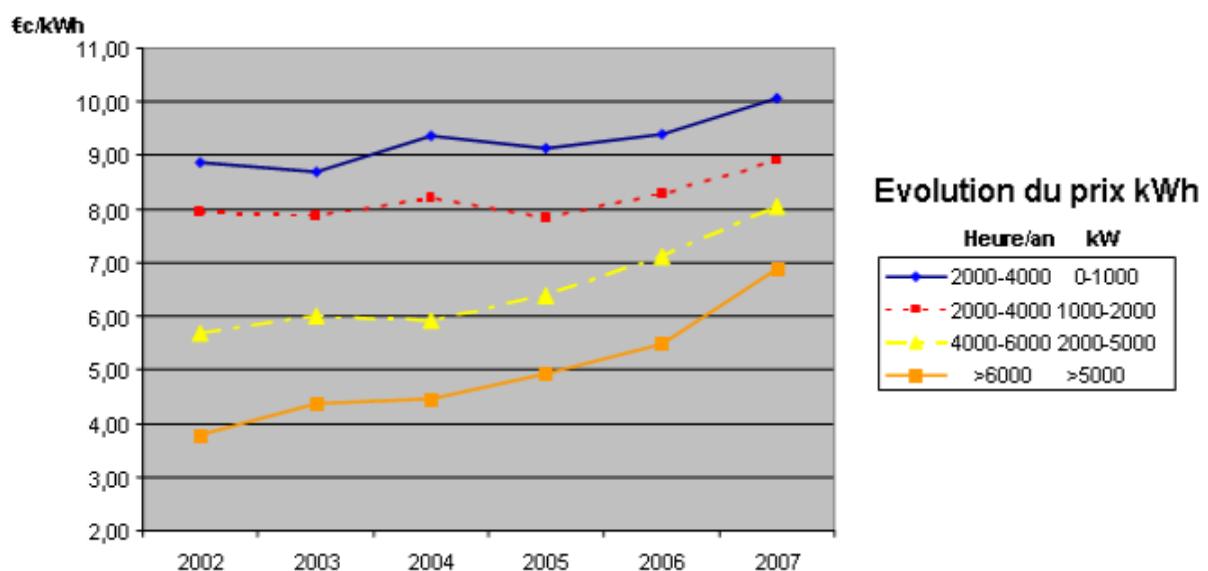


Figure 2 : Evolution du prix de l'électricité en Belgique entre 2002 et 2007 (Essenscia, 2008)

En ce qui concerne l'évolution du prix du gaz naturel (voir Figure 3), les mêmes conclusions peuvent être tirées. Ici également, la période 2002-2007 a connu une hausse permanente des prix (y compris les coûts de transport et de distribution ainsi que les redevances, mais hors TVA) pour toutes les catégories de consommateurs. De plus, les consommateurs de gaz à haute pression (les plus gros consommateurs) ont été confrontés à des hausses encore plus fortes que celles enregistrées au niveau de l'électricité. Ils payaient en 2007 86% de plus pour leur gaz naturel qu'en 2002. Pour les consommateurs de gaz à moyenne pression, les prix ont augmenté de 71%. Pour ceux à basse pression, l'augmentation se chiffrait à 70 - 74% entre 2002 et 2007 (Essenscia, 2008).

³ Pour information, les pays membres de l'OCDE sont notamment la Belgique, la France, l'Allemagne, l'Italie... (Organisation de Coopération et de Développement Economiques, 2010).

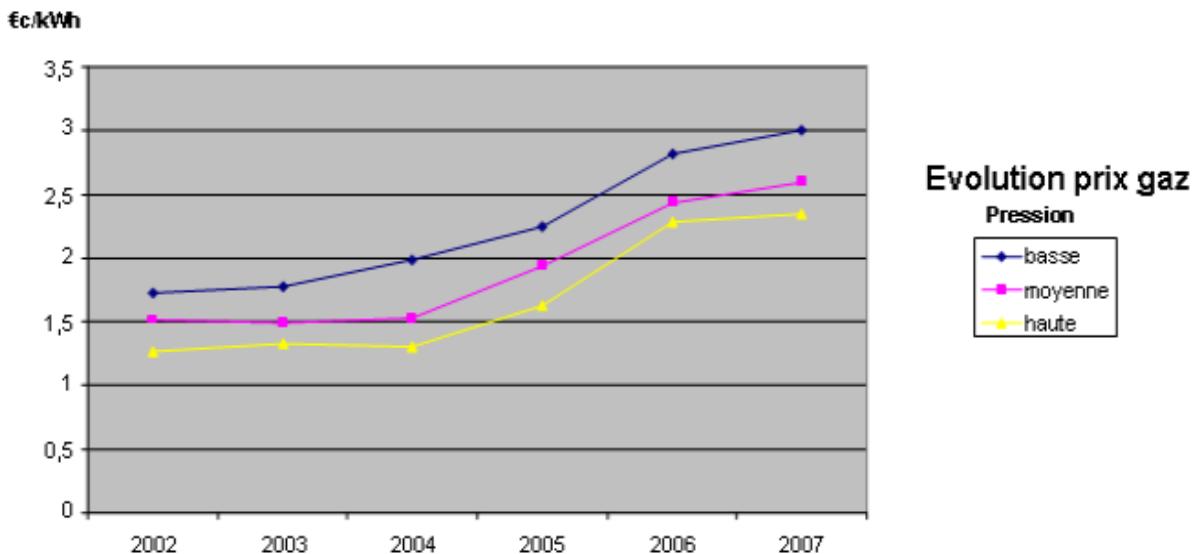


Figure 3 : Evolution du prix de du gaz naturel en Belgique entre 2002 et 2007 (Essenscia, 2008)

1.2. CONTEXTE EN RÉGION WALLONNE

En Région wallonne, près de 45% des logements datent d'avant 1945 et 70% sont antérieurs à 1970. Ces logements ont été construits avant le premier choc pétrolier (c'est-à-dire en 1973), alors que peu de personnes se souciaient des déperditions thermiques de l'enveloppe des bâtiments et du rendement des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Cela explique en partie la consommation finale d'énergie par habitant du secteur domestique et assimilé qui se situait 23% au-dessus de la moyenne européenne en 2003. Il y a donc là un énorme potentiel d'économie d'énergie à réaliser (Région Wallonne, 2006).

Pour répondre à la directive européenne 2002/91/CE, les trois régions et l'Etat fédéral ont mis en place la PAE (Procédure d'avis énergétique) qui permet d'attribuer un label de qualité énergétique pour chaque élément analysé et établir une liste de mesures correctives. A terme, les régions devront diminuer les consommations énergétiques de l'ensemble du parc immobilier par une politique active de gestion énergétique :

- Connaître ses consommations et les suivre dans le temps ;
- Gérer rigoureusement ses installations ;
- Identifier les améliorations par des audits énergétiques ;
- Réaliser des investissements d'amélioration de la performance énergétique de ses équipements et de ses bâtiments (Province de Liège, 2009).

En 2006, la consommation énergétique finale consommée en Wallonie (voir tableau 3) s'élevait à environ 12,4 Mtep, soit approximativement 34% de la consommation belge :

Tableau 3 : Energies primaire et consommée en Région Wallonne en 2006 (Brüll, 2009, modifié)

Énergie dans en Région Wallonne en 2006	Mtep	%	%
Énergie primaire	18,2	100	
Pertes	5,8	33	
Énergie finale consommée	12,4		100
Industrie	5,4		44
Transports	3		24
Autres (tertiaire, logements,...)	4		32

Du tableau 3, il en résulte qu'une grande part de l'énergie est consommée par le domaine de l'industrie. Cette observation est à mettre entre parenthèses dans les années à venir. En effet, la crise économique a plongé le monde dans un véritable chaos et bon nombre de grandes entreprises ont dû fermer (provisoirement ou pas) certains de leurs sites. C'est en effet le cas en Wallonie : la fermeture de cokeries, de hauts fourneaux (notamment à Seraing et Ougrée) et de sites dans la sidérurgie wallonne... Ces fermetures, bien que très regrettable au niveau des salariés, peuvent favoriser la diminution des gaz à effet de serre et du CO₂ rejetés dans l'air et donc contribuer à atteindre les objectifs fixés pour 2012 et 2020.

Même si l'objectif de la Région wallonne au niveau des SER n'est pas encore fixé pour 2020, il ne paraît pas déraisonnable de penser qu'il ne sera pas totalement différent de l'objectif belge de 13% en 2020. L'évolution possible des énergies renouvelables en Région wallonne est résumée dans le tableau 4 (Brüll, 2009).

Tableau 4 : Estimation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie de la Région Wallonne (Brüll, 2009)

Part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en Wallonie				
Consommation finale d'énergie	2006		Objectif 2020	
	Mtep	%	Mtep	%
	12,4	100	13,2-15,6	100
Par secteur				
Électricité	0,1	0,8	0,68 – 0,72	4,3 – 5,4
Chauffage et refroidissement	0,47	3,7	0,64 – 0,84	4,1 – 6,3
Transports	0	0	0,31	2 – 2,3
Total SER	0,57	4,5	1,63-1,87	10,4-14
Par type d'énergie				
Biomasse	0,53	4,2	1,08 – 1,26	6,9 – 9,5
Éolien	0,01	0,1	0,42 – 0,44	2,7 – 3,3
Hydro	0,2	0,2	0,04 – 0,05	0,2 – 0,4
Solaire PV	0	0	0,01	0
Solaire thermique	0	0	0,04	0,3
Géothermie	0	0	0,04 – 0,07	0,3 – 0,5
Total SER	0,57	4,5	1,63-1,87	10,4 – 14

De 4,5 % en 2006, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en Région wallonne pourrait s'élever entre 10,4 et 14 % d'ici 2020. En tenant compte de ces estimations, la Région wallonne aurait donc la possibilité de réaliser l'objectif de 13% de SER en 2020 sans avoir recours à des mécanismes de flexibilité (via des permis et des quotas d'émission). Cette pénétration accrue des SER sera principalement due aux secteurs de la biomasse (bois-énergie et biocarburants) et de l'éolien.

Dans les grandes lignes, la politique en matière d'économies d'énergie en Wallonie s'articulera *probablement* d'ici 2020 selon les axes majeurs suivants :

- Secteur tertiaire et résidentiel : transposition et renforcement de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (décret PEB), incitation aux mesures d'isolation et d'éclairage efficace, sensibilisation, nouvelles réglementations au niveau des consommations d'énergie des bâtiments (bâtiment « basse énergie »), développer le rôle d'exemple du secteur public,...

- Secteur des transports : promotion des véhicules performants au niveau énergétique, transports multimodal, meilleur aménagement du territoire,...
- Secteur industriel : renouvellement des accords de branche, meilleure intégration des SER et de la cogénération dans le secteur industriel,... (Brüll, 2009)

2. OBJECTIF DU TRAVAIL

2.1. OBJECTIF DU TRAVAIL

Pour rentrer complètement dans le vif du sujet, ce travail de fin d'études (TFE) est réalisé dans le cadre d'une étude de cas du projet HarmonAC (voir 2.2. Projet HarmonAC). Un bâtiment de bureaux de la région de Charleroi est à l'étude depuis fin 2007. Une campagne de mesure a été entamée début 2008 et est toujours en cours.

L'objectif de ce TFE est de compléter le pré-audit déjà réalisé par :

- Une analyse approfondie des données disponibles (sur l'installation HVAC du bâtiment, sur la structure d'un étage...) ;
- Une analyse des résultats de la campagne de mesure ;
- Une modélisation du bâtiment et du système grâce aux outils de simulation développés à l'Université de Liège ;
- La calibration des modèles développés grâce aux mesures disponibles ;
- Évaluation et comparaison de variantes.

L'outil de simulation qui sera utilisé est SimAudit. Il sera présenté plus loin dans ce travail. Il s'agira, dans un premier temps, d'utiliser le programme SimAudit afin de calibrer le modèle sur la réalité et, ensuite, d'apporter des stratégies de rénovation afin de mettre en évidence les économies d'énergie qui pourront être observées afin d'améliorer la performance énergétique du bâtiment.

2.2. PROJET HARMONAC

Le projet HarmonAC est un projet européen lancé en 2007 et a pour objectif de mettre en place des procédures d'inspection efficaces pour des systèmes de conditionnement d'air utilisés dans les bâtiments du secteur tertiaire et dont la puissance dépasse 12 kW (entrant dans le cadre de la nouvelle législation européenne sur la performance énergétique des bâtiments). Afin d'en garantir la validité et la facilité d'utilisation, elles seront testées sur un grand nombre de bâtiments existants et feront l'objet de modélisations (André, 2007).

Ces procédures seront ensuite mises à la disposition des principaux acteurs du secteur pour lesquels les formations indispensables seront prévues. Des informations et des conseils fiables sur les économies d'énergie pouvant être réalisées en adaptant, réparant ou modifiant judicieusement ces systèmes, doivent pouvoir être obtenus grâce à des inspections ciblées (Surveillance de l'environnement, 2010).

Les deux objectifs principaux sont de :

- Promouvoir la pratique de l'audit des installations de conditionnement d'air en vue d'en réduire la consommation énergétique ;
- Fournir à l'auditeur les outils (méthodes de calcul et de mesure) qui lui sont nécessaires à partir de novembre 2010 (Lebrun, 2010; Harmonac, 2010).

Outre l'Université de Liège pour la Belgique, ce projet HarmonAC est réalisé en collaboration avec la Grande-Bretagne (dont l'Université de Cardiff est le responsable du projet), l'Autriche, la France, la Grèce, l'Italie, le Portugal et la Slovénie. La durée du projet HarmonAC s'étend de septembre 2007 à août 2010.

3. MÉTHODOLOGIE

Avant de commencer à traiter ce travail, il est bon d'énoncer et d'analyser brièvement les différents points qui vont y être abordés.

3.1. PRÉSENTATION DU BÂTIMENT

La première étape consiste à analyser en détail le bâtiment. Elle comprend donc une étude assez complète du bâtiment dans son ensemble et plus particulièrement de son système HVAC en vue d'en faciliter la modélisation ultérieure dans l'outil de simulation SimAudit.

Il est important de noter qu'une description du bâtiment qui comprend notamment la définition des parois et des fenêtres ne sera pas traitée dans cette section mais plutôt dans le chapitre 6 : Modélisation et paramétrage en vue de la calibration avec SimAudit.

3.2. ANALYSE DÉTAILLÉE DES MESURES EFFECTUÉES

Ce paragraphe fait référence à la campagne de mesures effectuée par l'Université de Liège dans le bâtiment. Ces mesures donnent la consommation électrique toutes les dix minutes mais également les températures de pulsion ou d'extraction, entre autres, des unités de traitement d'air. Il faudra donc effectuer une étude très précise et poussée de ces données afin d'en retirer des informations importantes en vue d'effectuer une calibration correcte et précise.

3.3. MODÉLISATION ET PARAMÉTRAGE DU BÂTIMENT ET PARAMÉTRAGE DE SIMAUDIT

Il est important de définir les paramètres les plus importants, mais également toutes les hypothèses formulées, avec une certaine justesse en vue de la calibration. Il faut donc créer un modèle se rapprochant le plus possible du bâtiment réel.

3.4. SIMULATIONS, CALIBRATION, RÉSULTATS ET AMÉLIORATIONS EN VUE D'UNE RÉNOVATION

Suite aux simulations effectuées, un modèle pourra être calibré sur le fonctionnement réel du bâtiment. Grâce à ce modèle, des améliorations pourront donc être apportées en faisant varier certains points comme par exemple le remplacement de la chaudière par une autre plus performante ou encore le remplacement des vitrages peu performants énergétiquement parlant par des vitrages à faible émissivité.

4. PRÉSENTATION DU BÂTIMENT

4.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE

Le bâtiment à auditer se situe à Charleroi, sur le Boulevard Mayence (voir Figure 4). Des vues plus générales du bâtiment en entier sont reportées sur la Figure 7.



Figure 4 : Bâtiment à auditer à Charleroi

Il s'agit d'un bâtiment de bureaux de taille moyenne construit dans les années 80. Le bâtiment accueille deux occupants (une entreprise de service, rebaptisée « Occupant 1 » et une entreprise d'organisme public, renommé « Occupant 2 »). Il se compose de 9 étages avec des places de parking en sous-sol (32 places au niveau 0, 45 au niveau -1 et 49 au niveau -2) et dont la superficie climatisée du bâtiment dans son ensemble représente approximativement 7220m².

Le building est constitué de deux parties : un bloc avant (« front block », voir Figure 4) et un bloc arrière (« back bloc »). Des vues de face et de profil de ce bâtiment sont données ci-dessous (voir Figure 5) :

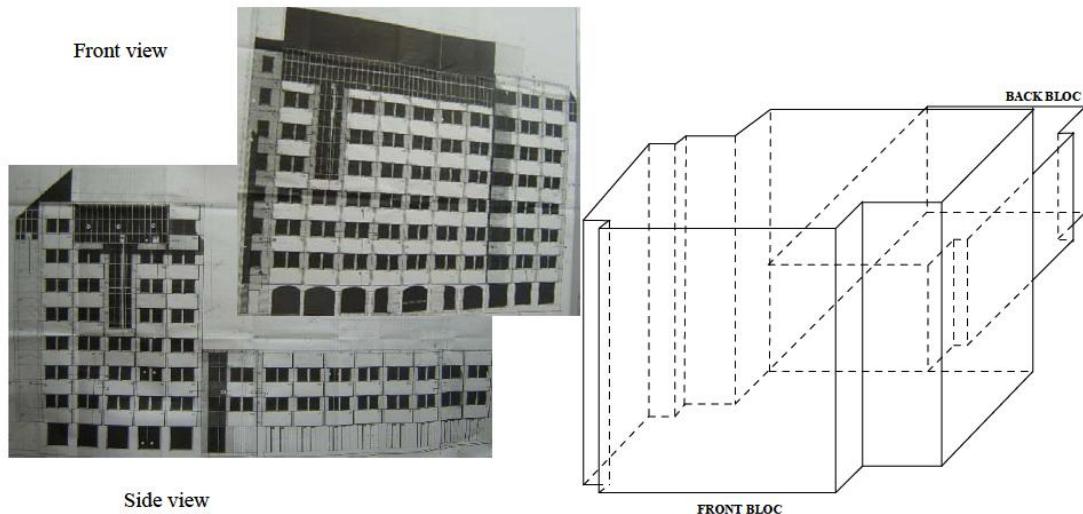


Figure 5 : Vues de face et de profil du bâtiment (Aparecida Silva *et al.*, 2008)

Afin d'avoir une idée sur les dimensions de l'enveloppe du bâtiment, celles-ci sont reprises à la Figure 6 :

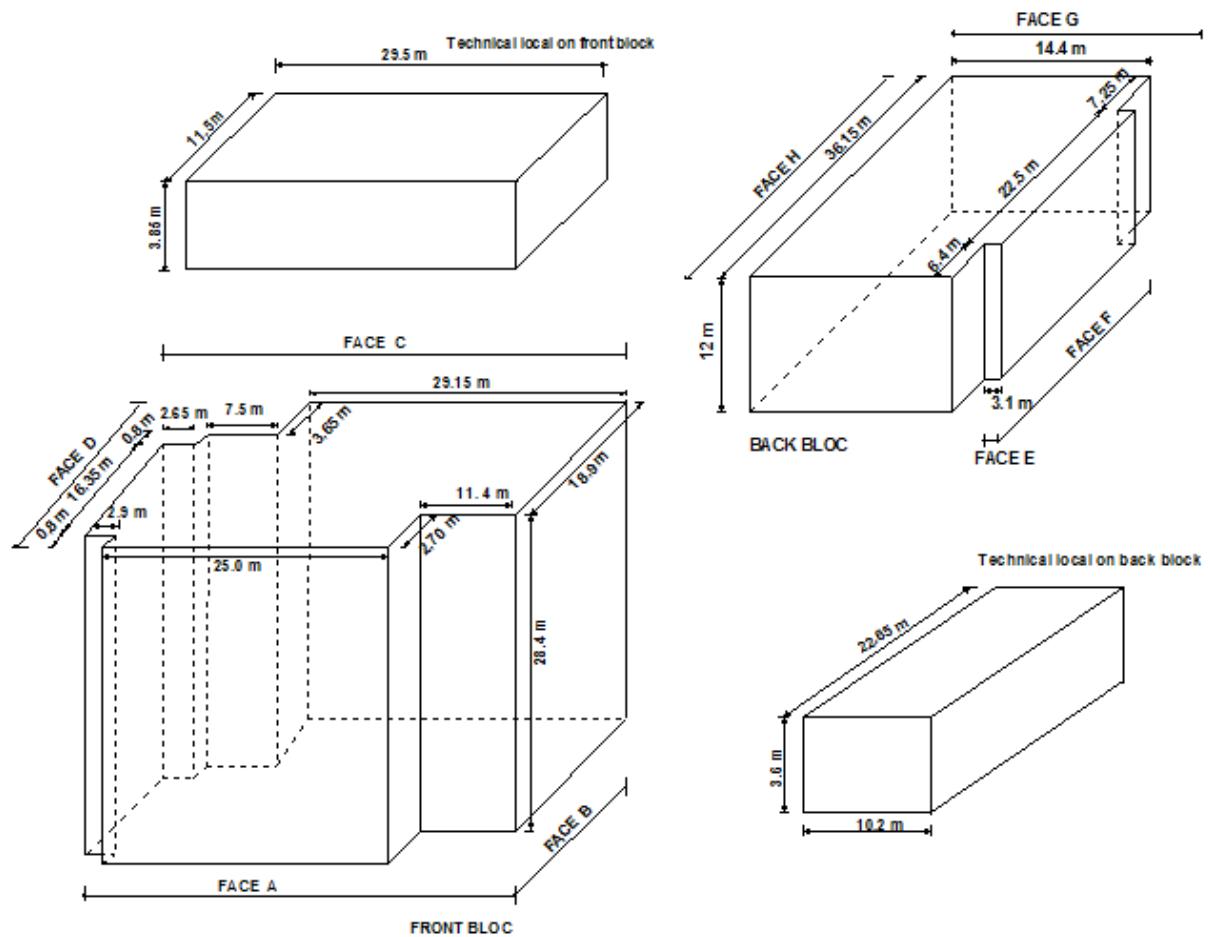


Figure 6 : Dimensions du bâtiment (Aparecida Silva *et al.*, 2008)

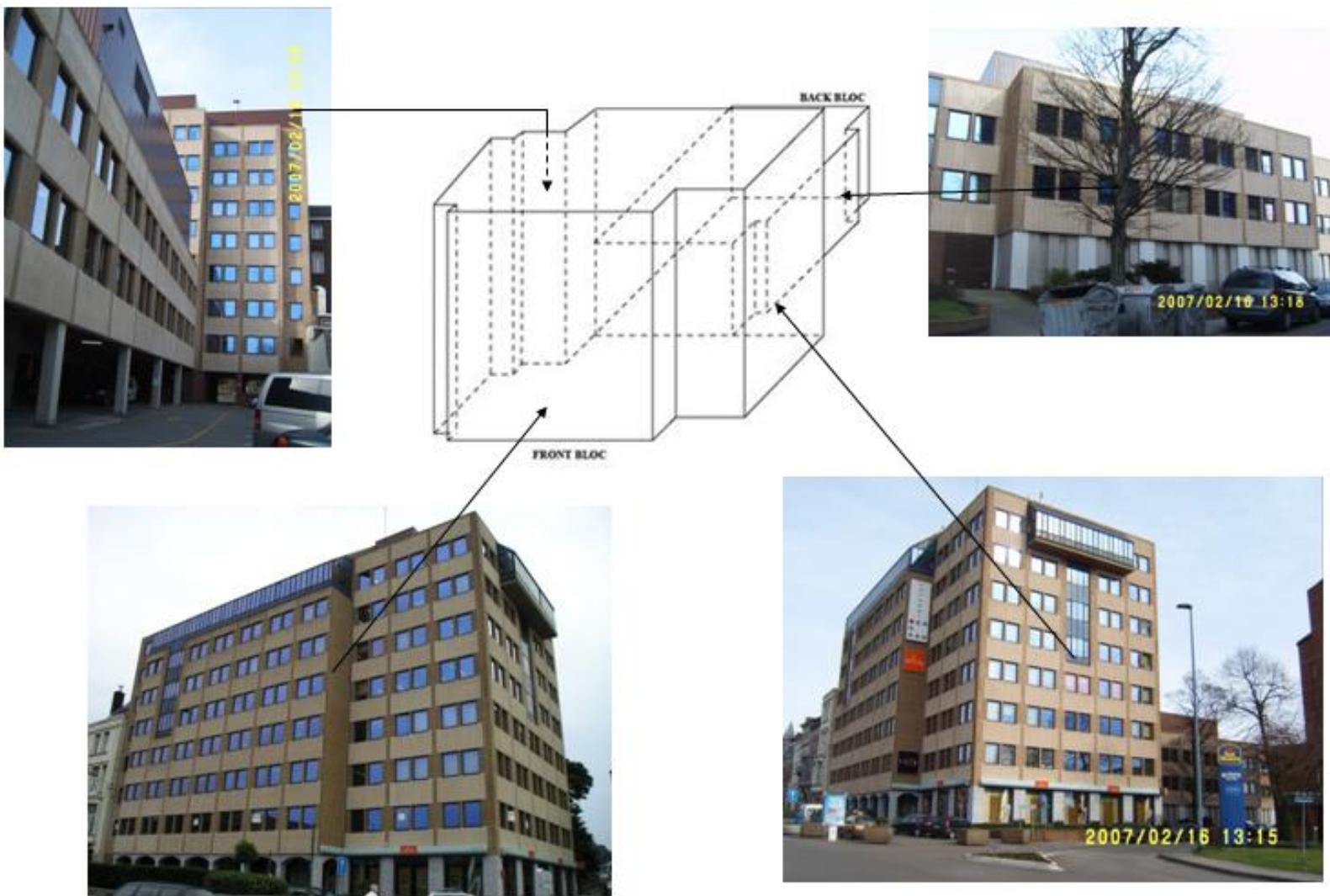


Figure 7 : Vues générales du bâtiment (Aparecida Silva et al., 2008)

L'objectif de ce travail est d'auditer les 4 étages appartenant à l'Occupant 2 (soit les étages de 4 à 7). Ces 4 étages font partie du « front block ».

4.2. PRÉSENTATION DU SYSTÈME HVAC

Il est à présent important de donner une description assez détaillée du système HVAC, permettant l'approvisionnement en chaud et en froid du building afin de voir quels types d'équipements sont présents dans cet édifice mais également d'en faciliter sa modélisation ultérieure dans SimAudit.

Comme le montre la Figure 6, deux locaux techniques existent dans le bâtiment. Le premier se situe à l'étage 3 dans le « back bloc » et le deuxième occupe l'entièreté de l'étage 8. C'est dans ce dernier que se concentrent les équipements HVAC pour les 4 étages de l'Occupant 2.

4.2.1. PRODUCTION DE CHALEUR

La production de chaleur du bâtiment se fait au moyen de 3 chaudières classiques Ygnis dont la puissance unitaire vaut 318 kW (voir Figure 8). Ces chaudières sont alimentées en gaz naturel.



Figure 8 : Chaudières classiques de 318 kW (Aparecida Silva *et al.*, 2008)

Les chaudières servent à alimenter la batterie chaude des groupes de ventilation et les batteries de réchauffe mais également à produire de l'eau chaude pour l'ensemble du bâtiment. La température de consigne de l'eau en sortie de chaudière est régulée en fonction de la température extérieure (voir Figure 9). La loi de température est la suivante :

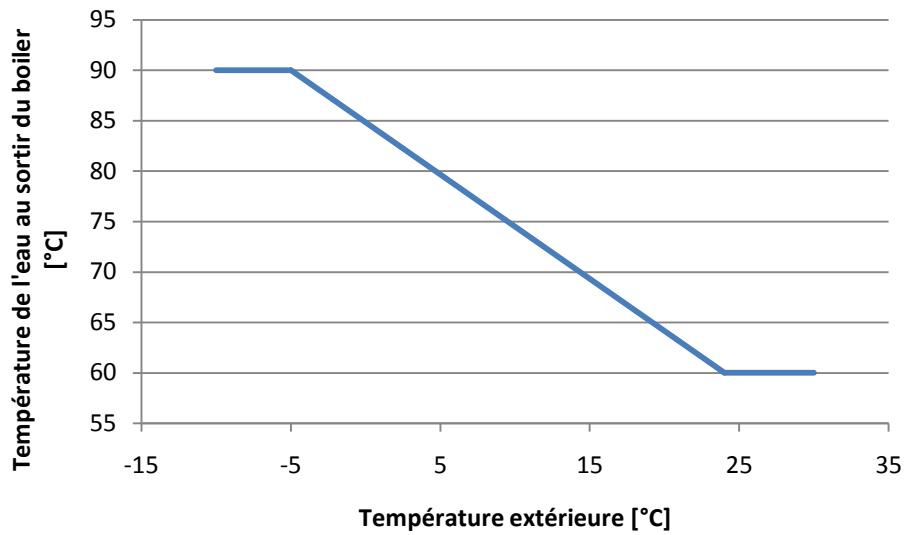


Figure 9 : Loi de température des chaudières

Comme le montre la Figure 9, la consigne pour une température extérieure inférieure à -5°C donne une sortie d'eau chaude des chaudières de 90°C et la consigne pour une température extérieure supérieure à 24°C donne une sortie d'eau des chaudières de 60°C. Entre ces deux états, la loi est de type linéaire et a été déterminée expérimentalement (voir « 11.1. Annexe A »).

4.2.2. PRODUCTION DE FROID

La machine frigorifique se compose de 2 chillers ayant deux compresseurs BITZER Type 6G40 (voir Figure 10). Les caractéristiques de ceux-ci sont données dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques du groupe de froid

Débit [m ³ /h]	126,8
Puissance du moteur [kW]	30
Intensité du courant [A]	75
Disjoncteur [mA]	83

Les chillers alimentent la batterie froide des groupes de ventilation mais également l'eau froide des 4 étages de l'Occupant 2. Peu d'informations ont pu être trouvées. Parmi celles-ci, la puissance nominale totale des chillers est de 245 kW, les compresseurs sont de type « à vis » et il s'agit d'un condenseur à air. Il est important de noter que les deux occupants ont chacun leur groupe de froid.



Figure 10 : Compresseur du chiller

4.2.3. VENTILATION

Unités de traitement d'air

La ventilation du bâtiment se fait au moyen d'unités de traitement d'air (AHU : « Air Handling Unit »). En effet, la pulsion et l'extraction de l'air dans les 4 étages appartenant à l'Occupant 2 qui se font via 3 AHUs fournissent approximativement un total de 32000 m³/h. La répartition de ces 3 groupes de pulsion (GP) et d'extraction (GE) entre les différents étages est la suivante :

- Les groupes de pulsion (GP2) et d'extraction (GE2) sont utilisés pour les étages 4, 5, 6 et 7;
- Les groupes de pulsion (GP3) et d'extraction (GE3) sont utilisés pour les 2 salles de réunions se trouvant à l'étage 7;
- Les groupes de pulsion (GP4) et d'extraction (GE4) sont utilisés pour les bureaux de la direction se trouvant également à l'étage 7.

Sur la Figure 11 est représentée l'unité de traitement d'air comprenant les GP2 et GE2 (AHU2). Le premier élément constitutif est le groupe d'extraction [1] (GE2). Ce groupe se constitue d'un ventilateur permettant d'extraire l'air « vicié » des bureaux.

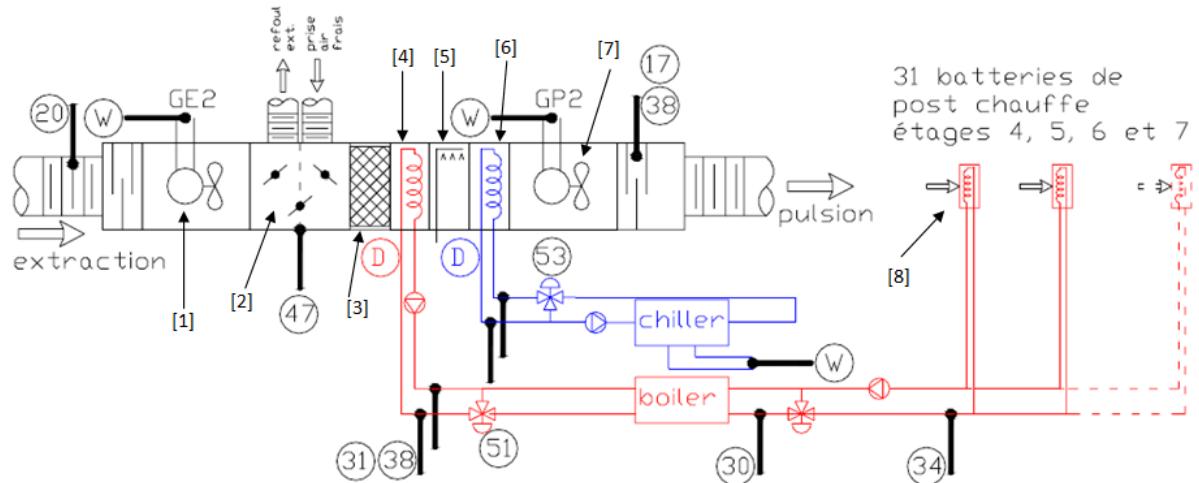


Figure 11 : Unité de traitement d'air - AHU2 (Aparecida Silva et al., 2008, modifié)

Un économiseur [2] est ensuite placé juste après l'extraction d'air des bureaux. Dès lors, une partie de cet air est refoulé vers l'extérieur et l'autre partie est destinée à être mélangée avec de l'air frais pour être ensuite traitée et renvoyée dans les bureaux. Cette opération représente déjà une économie d'énergie. En effet, l'air extrait des bureaux est à la température de consigne des bureaux et le mélange entre cet air et l'air extérieur permet d'avoir une température supérieure ou inférieure, suivant la température extérieure, à celle qu'aurait le même volume d'air frais.

Ce mélange d'air frais et d'air extrait passe dans un filtre [3] afin d'éliminer entre autre les poussières, les bactéries et les pollens.

Une fois filtré, l'air réellement traité passe par des batteries d'échange. Celles-ci ne sont en fait que des échangeurs entre l'air et de l'eau chaude (on parle alors de batterie chaude) ou froide (on parle alors de batterie froide). Ces batteries vont pouvoir réchauffer l'air et/ou le refroidir. Sur la Figure 11, la batterie chaude [4] est alimentée par la chaudière alors que la batterie froide [6] est, elle, alimentée par le chiller.

Entre les deux batteries d'échange, un humidificateur [5] est placé. Celui-ci a pour fonction de réaliser une augmentation de l'humidité de l'air. Dans le cas de ce bâtiment, il s'agit d'une humidification adiabatique. Cette dernière consiste en l'évaporation directe de l'eau dans l'air sans apport d'énergie extérieure : l'eau est finement pulvérisée pour maximiser la superficie de contact avec l'air et, est absorbée.

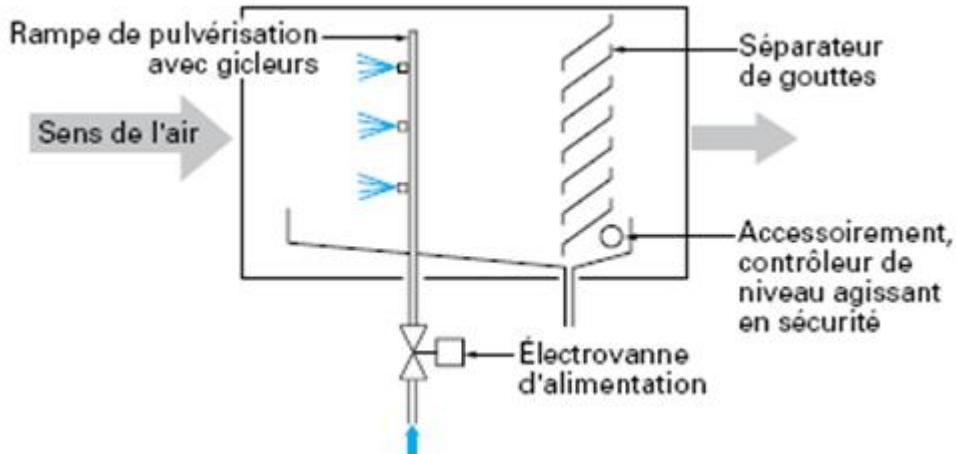


Figure 12 : Humidificateur adiabatique

La Figure 12 montre un humidificateur adiabatique avec une pulvérisation à eau perdue (la totalité de l'eau n'étant pas évaporée, une partie va redescendre par gravité et ne pourra plus être récupérée).

L'avant-dernier composant de l'unité de traitement d'air est bien évidemment le groupe de pulsion [7] (GP2). Celui-ci est composé d'un ventilateur permettant d'insuffler l'air traité dans les locaux.

Les caractéristiques (valeurs estimées) des GP et GE sont reprises dans le Tableau 6 :

Tableau 6 : Caractéristiques des GP et GE

Paramètres	Ventilateur	
	Pulsion	Extraction
Débit [m ³ /h]	30 000	30 000
dP _{externe} [Pa]	700	700
dP _{interne} [Pa]	600	0
Total dP [Pa]	1300	700
Rendement [-]	0,6	0,6
Puissance [kW]	18	10

Le dernier élément constitutif de l'unité de traitement d'air est la batterie de réchauffe [8]. Celle-ci, alimentée en chaud par la chaudière, est destinée à réchauffer l'air avant de l'insuffler dans les locaux.

Unités terminales

La ventilation du bâtiment est de type « VAV », c'est-à-dire une ventilation à volume d'air variable (il sera expliqué ultérieurement pourquoi il est correct de considérer, lors de la modélisation, la ventilation comme un système à volume d'air constant).

Chaque pièce présente au moins une unité terminale VAV afin de fournir l'air traité au local. Ces unités sont installées dans le faux plafond (voir Figure 13) en aval des batteries de réchauffe.



Figure 13 : Unité terminale VAV (Aparecida Silva et al., 2008)

Le nombre d'unités terminales VAV et de batteries de réchauffe est repris dans le Tableau 7 et est donnée pour chaque étage :

Tableau 7 : Nombre d'unités terminales VAV et de batteries de réchauffe (Aparecida Silva et al., 2008)

Étage	Nombre de batteries de réchauffe	Nombre d'unités terminales VAV
4	11	22
5	8	21
6	8	21
7	8	12

La Figure 14 montre l'emplacement des batteries de réchauffe et des unités terminales VAV pour l'étage 4. Afin de voir un peu plus clair sur cette figure, voici une légende :

Tableau 8 : Légende pour la Figure 14

	Batterie de réchauffe
	Unité terminale VAV
	Thermostat

Il peut y avoir de 1 à 5 unités terminales VAV pour une batterie de réchauffe. Pour son propre confort, l'utilisateur peut modifier la température ambiante de l'air de +- 3°C autour du point de consigne, qui est de 21°C, grâce aux thermostats présents dans les bureaux.

Climsplit

Un système climatiseur de type Split est présent à l'étage 6. Il s'agit d'un local qui est climatisé en permanence. Ce système ne sera pas modélisé dans SimAudit mais sa consommation électrique sera rajoutée à celle qui sera donnée par le programme de simulation. Ce système ne sert qu'à refroidir certains locaux spécifiques et il est donc intéressant de décentraliser la production de froid.

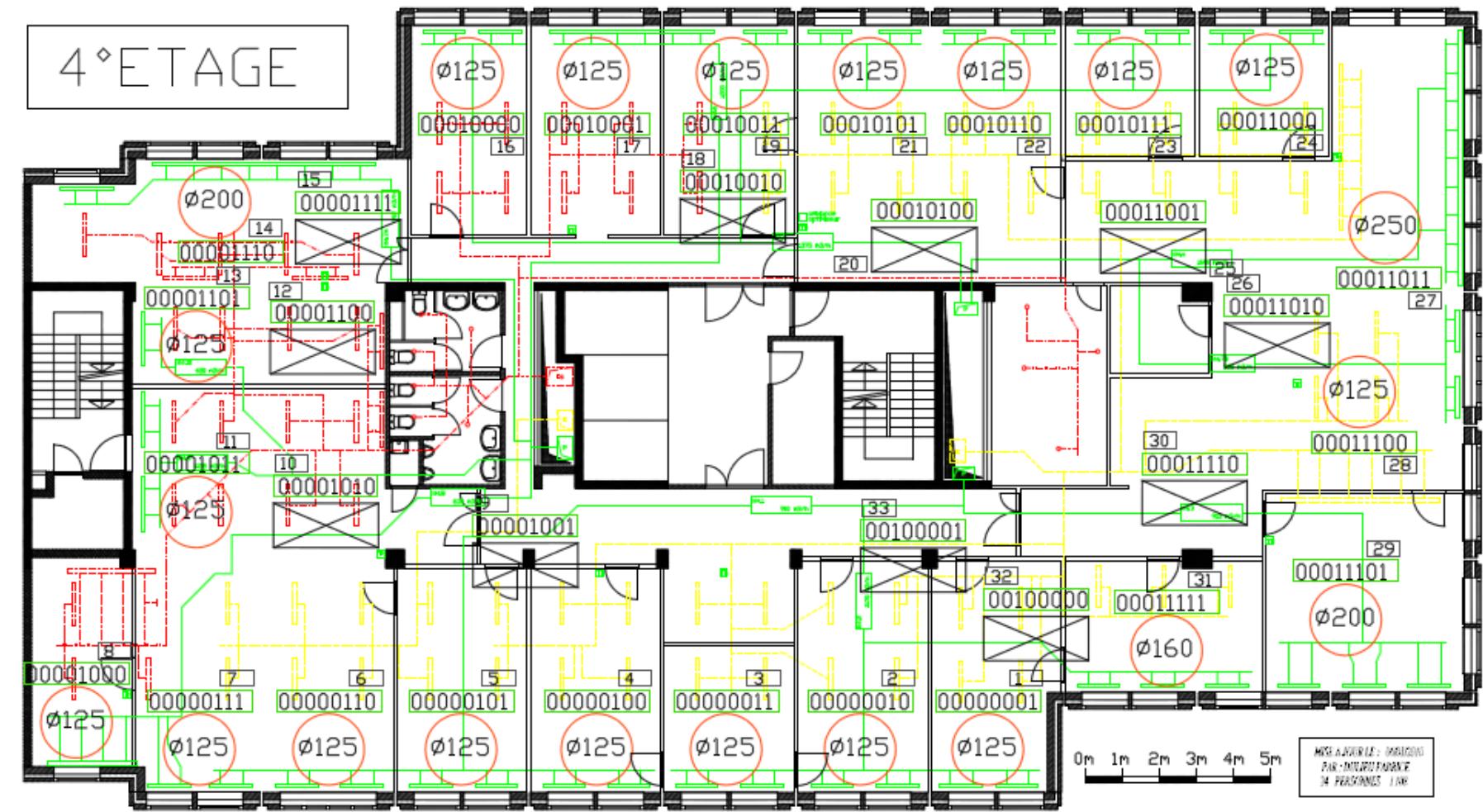


Figure 14 : Localisation des batteries de réchauffe, des unités terminales VAV et des thermostats (Dulieu, 2010)

5. CONSOMMATIONS RÉELLES DU BÂTIMENT

5.1. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Il est important de d'utiliser des données météorologiques adéquates pour effectuer la simulation et d'obtenir une calibration assez précise. Dans ce sens, les données utilisées sont celles récoltées à Mons puisqu'on ne dispose pas des données météo heure par heure à Charleroi. Ces données ont été traitées et amicalement fournies par Jérôme Fransquet, étudiant en 2^e Master Ingénieur Civil en électromécanique à l'Université de Liège.



Figure 15 : Proximité entre Mons et Charleroi

L'utilisation de ces données se justifie par le fait que les villes de Mons et de Charleroi sont voisines (voir Figure 15) et qu'utiliser les données de Mons constitue une bonne approximation, comme le montrent les moyennes de températures extérieures mois par mois à Charleroi et à Mons (voir Tableau 9) :

Tableau 9 : Comparaison des températures moyennes à Charleroi et Mons

Année	Mois	Températures moyennes [°C]	
		Mons	Charleroi
2009	Mai	14,0	13,96
	Juin	16,1	16,34
	Juillet	18,2	18,49
	Août	18,4	18,51
	Septembre	15,1	15,29
	Octobre	10,8	10,89
	Novembre	9,4	9,5
	Décembre	2,8	2,72
2010	Janvier	0,0	-0,09
	Février	2,6	2,56
	Mars	6,4	6,55
	Avril	9,7	9,65
	Moyenne	10,3	10,36

En effet, les températures moyennes mensuelles sont presque identiques et il est donc possible d'utiliser les données de Mons. Les simulations et la calibration se feront donc sur les 8 derniers mois de l'année 2009 et les 4 premiers de 2010. Ce choix se justifie pour deux raisons : d'une part, les données électriques mesurées dans le bâtiment ne sont fiables qu'à partir de mai 2009 et, d'autre part, il est préférable d'effectuer la calibration sur 12 mois.

5.2. RELEVÉS DE MESURES

Afin d'avoir un contrôle assez précis de la consommation électrique et, entre autre, la température des locaux ou la température de pulsion des ventilateurs (GP2) des unités de traitement d'air, l'Université de Liège, et plus particulièrement la DSGE (« Département de Science et de Gestion de l'Environnement »), a installé divers équipements tels des compteurs, des capteurs ou encore des sondes à différents endroits (voir Figure 16). Il s'agit donc d'effectuer un monitoring de la consommation énergétique du bâtiment. Ces mesures ont été recueillies et traitées par Bertrand Fabry, Ingénieur Civil au département DSGE.

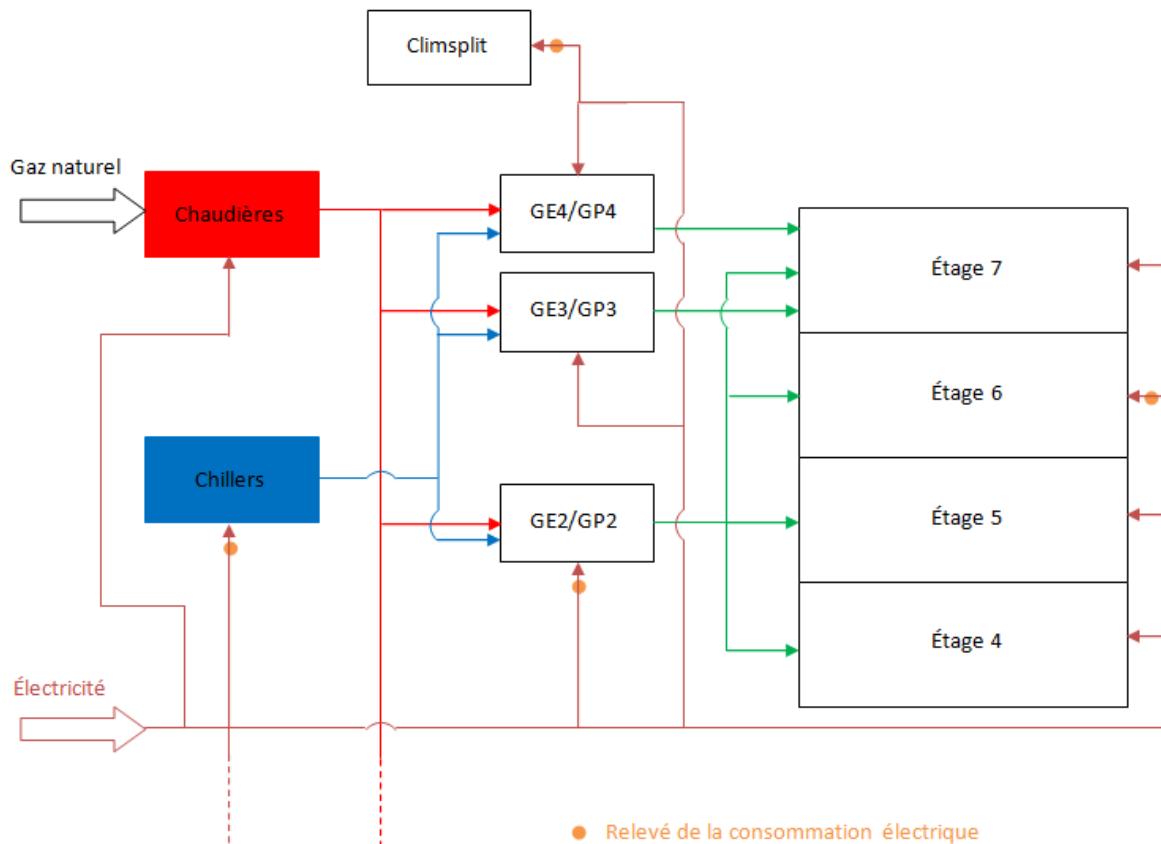


Figure 16 : Représentation du système HVAC et des endroits de mesures de la consommation électrique

5.3. CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

5.3.1. CONSOMMATION TOTALE ANNUELLE

La consommation électrique totale mesurée de l'Occupant 2 pour les mois repris dans le Tableau 9 est de 570214 kWh. Celle-ci comprend les consommations des 4 étages de l'Occupant 2, c'est-à-dire l'éclairage et le matériel informatique (entre autre : ordinateur, écran d'ordinateur, imprimante, photocopieuse...), mais également celle des chaudières, du chiller, du climsplit et des groupes de pulsion et d'extraction.

Une remarque concerne la consommation des groupes de pulsion et d'extraction. Le relevé de la consommation électrique des groupes de pulsion/extraction n'est effectué que sur les GP2/GE2 et ne prend pas en compte les deux autres groupes. Or, dans SimAudit, ces 3 groupes de pulsion/extraction sont considérés comme un seul système. Pour résoudre ce manque de mesures, une hypothèse réaliste est de considérer que la consommation électrique des GP2/GE2 est majorée de 15% pour ne former qu'un groupe de pulsion/extraction.

Cette consommation totale peut être exprimée en une consommation mensuelle⁴ (voir Figure 17).

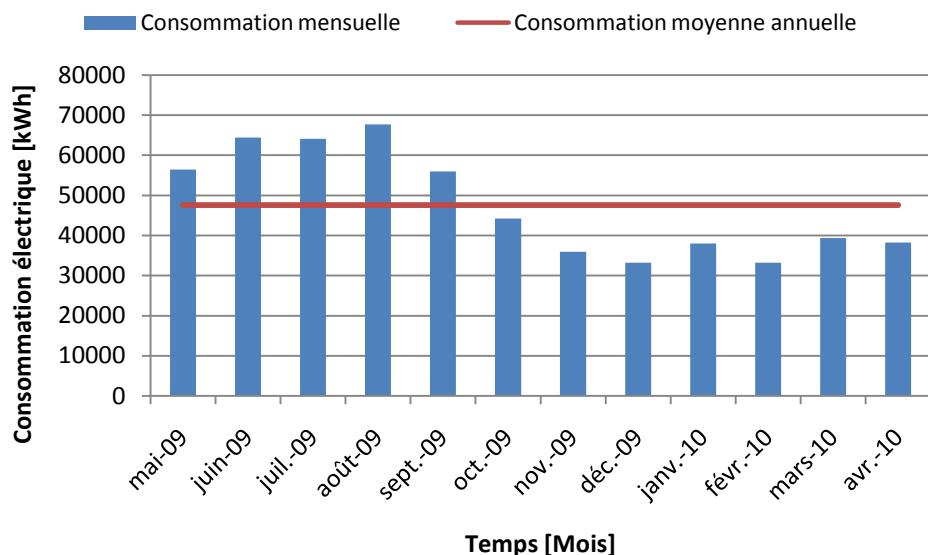


Figure 17 : Consommations électriques mensuelle et moyenne annuelle mesurées

Il est à noter que ces valeurs ont été mesurées par l'Université de Liège. Étant donné que des mesures de consommation mensuelle sont à disposition, la calibration sera réalisée en comparant ces valeurs mesurées aux valeurs fournies lors des simulations. En effet, il est important de comparer des choses comparables puisque les consommations électriques mesurées sont une somme de consommations des GP2, GE2, climsplit, de l'éclairage et de l'appareillage électrique et du chiller.

La consommation électrique en été est importante. Ceci est dû au fait que le groupe de froid fonctionne presque en permanence.

⁴ Les valeurs de ces consommations sont reprises dans la partie « 11.2. Annexe B ».

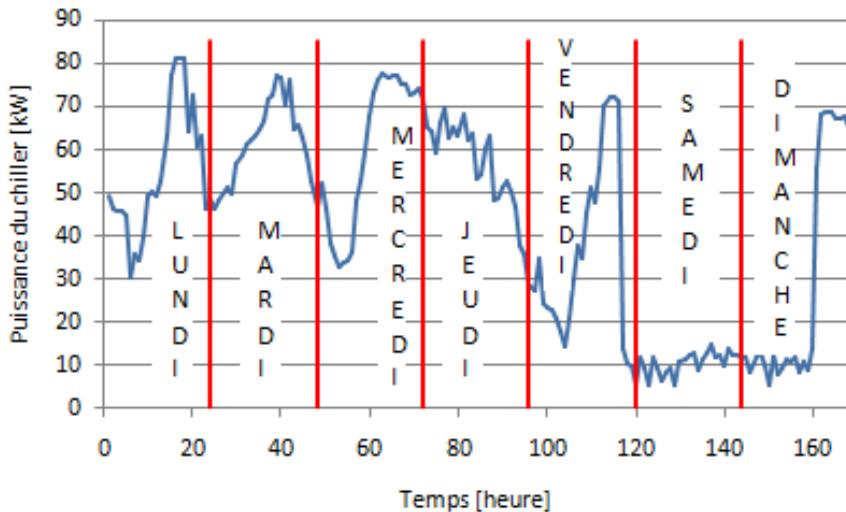


Figure 18 : Puissance du groupe frigorifique sur une semaine du mois d'août 2009

En effet, comme le montre la Figure 18, le groupe frigorifique fonctionne quasi en continu à partir du dimanche 16h jusqu'au vendredi 20h et ce, jour et nuit alors qu'en hiver, ce groupe ne fonctionne pas.

5.3.2. DONNÉES IMPORTANTES RÉSULTANTES DES MESURES EFFECTUÉES

Grâce aux mesures électriques effectuées, des informations supplémentaires peuvent être déduites.

Système « CAV »

L'une des premières informations qui résulte de ces mesures concerne le système de ventilation du bâtiment. Le système installé à l'origine est un système VAV. Cependant, la Figure 19, qui représente la puissance des ventilateurs de pulsion et d'extraction au cours des mois d'août et de décembre⁵, montre que le système de ventilation s'apparente plus à un système « CAV », soit à débit d'air constant. En effet, la puissance est constante au cours du temps, excepté les weekends, moment où les groupes de pulsion/extraction ne fonctionnent pas. Il ne sera dès lors pas faux de considérer dans la simulation le système de ventilation comme un « CAV ».

De plus, la puissance des ventilateurs de pulsion et d'extraction ont été estimées respectivement à 18kW et 10kW. Or de la Figure 19, il en ressort également que ces puissances valent en réalité respectivement approximativement 12kW et 6kW. Cela signifie que les ventilateurs tournent à deux tiers de leur puissance nominale.

⁵ Il en est de même pour les autres mois de l'année. Les deux mois présentés ci-dessous ont été choisis pour montrer qu'il n'y a pas de différences de puissance de pulsion/extraction entre un mois froid et humide et un mois chaud et moins humide.

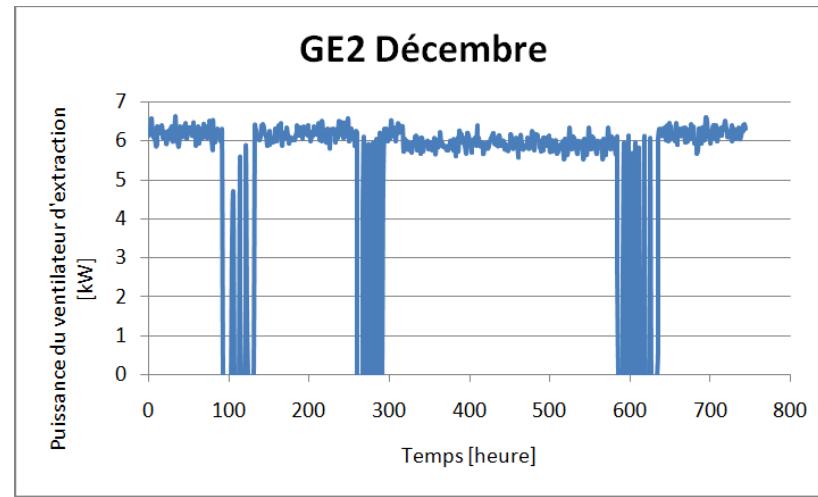
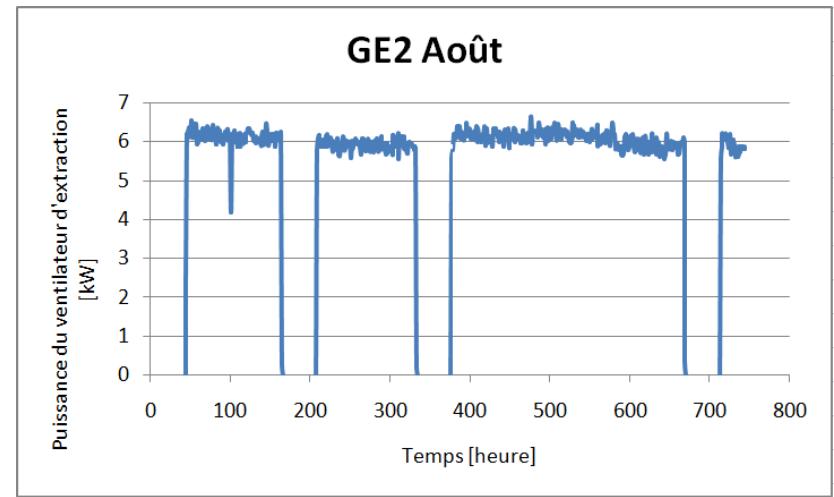
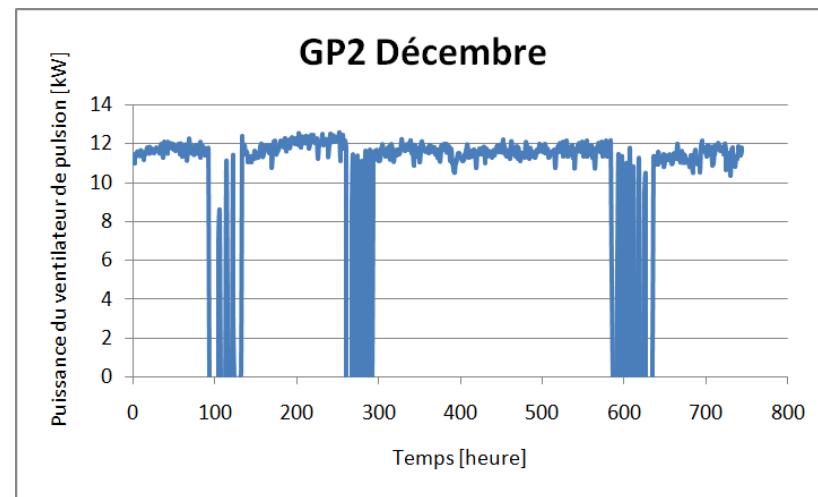
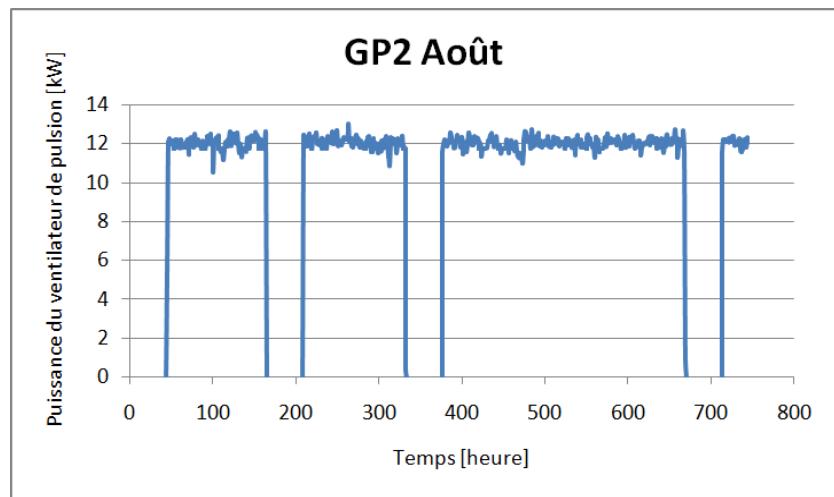


Figure 19 : Puissances des ventilateurs de pulsion et d'extraction pour les mois d'août et de décembre de l'année 2009

Consommation électrique de l'éclairage et des appareils informatiques

Un compteur électrique a été placé sur l'armoire électrique générale de l'étage 6 comme représenté sur la Figure 16. Ce compteur donne, heure par heure, la consommation de l'éclairage, des ordinateurs, et autres appareils électriques telles les imprimantes et photocopieuses.

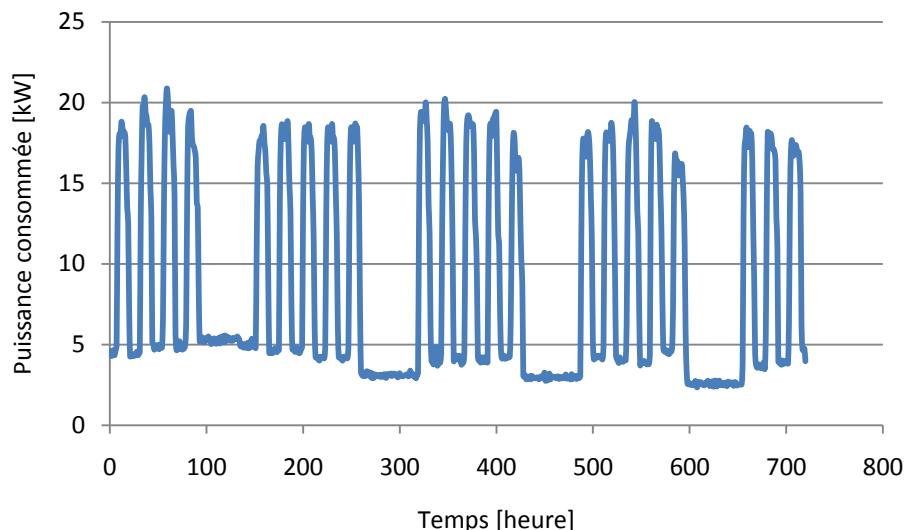


Figure 20 : Consommation électrique de l'éclairage et de l'appareillage électrique pour le mois de septembre 2009

La Figure 20 exprime la puissance consommée par heure par l'étage 6. La consommation mensuelle d'électricité de cet étage vaut 6203,5 kWh. Pour les autres mois de l'année, ces consommations sont reprises dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Consommation mensuelle électrique pour l'étage 6

Mois	Consommation électrique [kWh]	Mois	Consommation électrique [kWh]
Mai 09	5995,62	Novembre 09	4906,32
Juin 09	5894,49	Décembre 09	4388,33
Juillet 09	4975,72	Janvier 10	5271,56
Août 09	5463,83	Février 10	4715,45
Septembre 09	6203,54	Mars 10	5195,69
Octobre 09	5300,94	Avril 10	4234,14

De plus, en reportant sur un graphique la consommation d'électricité d'un jour du mois de septembre (voir Figure 21), il est possible de voir à partir de quelle heure l'électricité est réellement consommée.

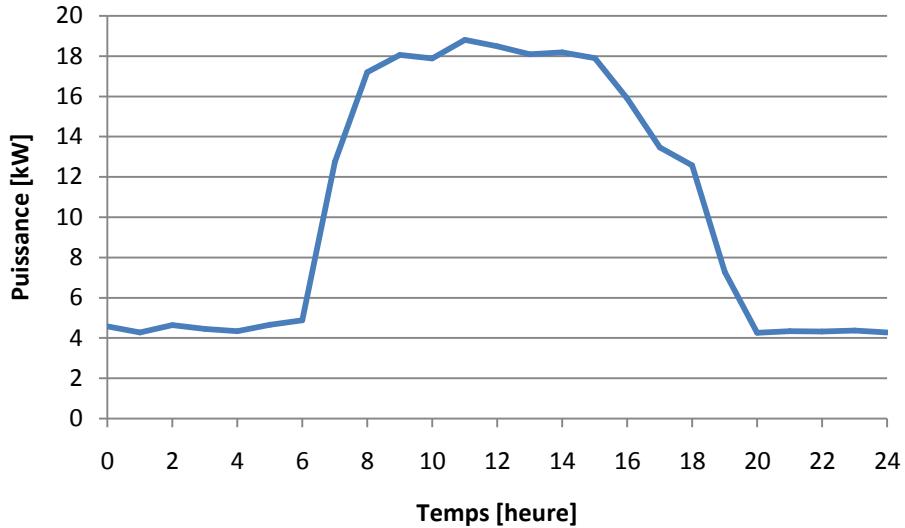


Figure 21 : Consommation électrique du lundi 7 septembre

Il apparaît, sur la Figure 21, que l'exploitation de l'électricité est nominale de 8h à 17h et est de 25% de 20h à 6h ainsi que pendant les weekends. Par contre, entre 6h et 8h, elle croît progressivement et décroît progressivement entre 17h et 20h. Dès lors, les hypothèses suivantes seront formulées :

- Entre 6h et 7h (resp. 7h et 8h), l'exploitation de l'électricité sera de 25% (resp. 50%);
- Entre 17h et 19h (resp. 19h et 20h), l'exploitation de l'électricité sera de 50% (resp. 25%).

Par exemple, le mois de septembre compte 30 jours dont 22 ouvrables et 8 non ouvrables (samedi et dimanche). Dès lors, le nombre d'heures total de fonctionnement vaut :

$$22 \cdot 9 \cdot 1 + 22 \cdot 10 \cdot 0,25 + 22 \cdot 3 \cdot 0,5 + 8 \cdot 0,25 \cdot 24 = 345h$$

Connaissant ainsi la consommation électrique et la période d'utilisation d'un étage, il est possible de déterminer la puissance totale par unité de surface. Celle-ci se détermine de la manière suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Puissance totale mensuelle par unité de surface } \left[\frac{W}{m^2} \right] \\ &= \frac{\text{Consommation électrique mensuelle } [Wh]}{\text{Superficie } [m^2] \cdot \text{nombre d'heure } [h]} \end{aligned}$$

Pour revenir à l'exemple du mois de septembre, ce paramètre vaut donc :

$$\text{Puissance totale mensuelle par unité de surface} \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{6203,53 [kWh] \cdot 1000}{622,7[m^2] \cdot 356[h]} \cong 28$$

Il est à noter que la superficie prise ici est la superficie climatisée. En effet, il n'y a pas d'appareils électriques (ordinateur, écran...) dans les cages d'escaliers ni dans l'espace réservé aux ascenseurs et encore moins dans la zone 5 (voir Figure 29), endroit représentant les couloirs de l'étage. Dès lors, cela revient à surestimer légèrement cette valeur.

En effectuant le même raisonnement pour les autres mois, la puissance totale mensuelle par unité de surface est reprise dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Puissance totale mensuelle par unité de surface

Mois	Puissance mensuelle par surface [W/m ²]	Mois	Puissance mensuelle par surface [W/m ²]
Mai 09	≈ 28	Novembre 09	≈ 24
Juin 09	≈ 27	Décembre 09	≈ 22
Juillet 09	≈ 22	Janvier 10	≈ 24
Août 09	≈ 25	Février 10	≈ 24
Septembre 09	≈ 28	Mars 10	≈ 23
Octobre 09	≈ 24	Avril 10	≈ 21

Ne connaissant pas la répartition de la consommation électrique entre l'éclairage et les appareils électriques, l'hypothèse suivante sera formulée : nous considérerons que la moitié de cette puissance totale par unité de surface vient de l'éclairage et que l'autre moitié provient des appareils électriques.

5.4. CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Contrairement à la consommation électrique, aucun compteur n'a été installé par l'Université de Liège dans le but de mesurer les volumes de gaz consommés par les chaudières. Seules les factures provenant du fournisseur de gaz sont disponibles. Cependant, les factures correspondent à l'ensemble du bâtiment et non uniquement aux 4 étages concernés. Pour résoudre ce problème, il suffit de multiplier la consommation de gaz par la superficie occupée par les 4 étages dans le bâtiment, soit au prorata des surfaces (voir Tableau 12).

Tableau 12 : Occupation du bâtiment

Entreprise	Occupation du bâtiment [%]
Occupant 1	56,17
Occupant 2	43,83

Un autre problème à considérer est que le fournisseur de gaz donne la consommation en kWh PCS. Or SimAudit sort la consommation du bâtiment en kWh PCI. Pour ce faire, tout sera ramené en kWh PCI et il faut alors multiplier la facture par :

$$\frac{PCS}{PCI} \cong 1,11$$

Au final, la consommation de gaz naturel des 4 étages de l'Occupant 2 est représentée sur la Figure 22.

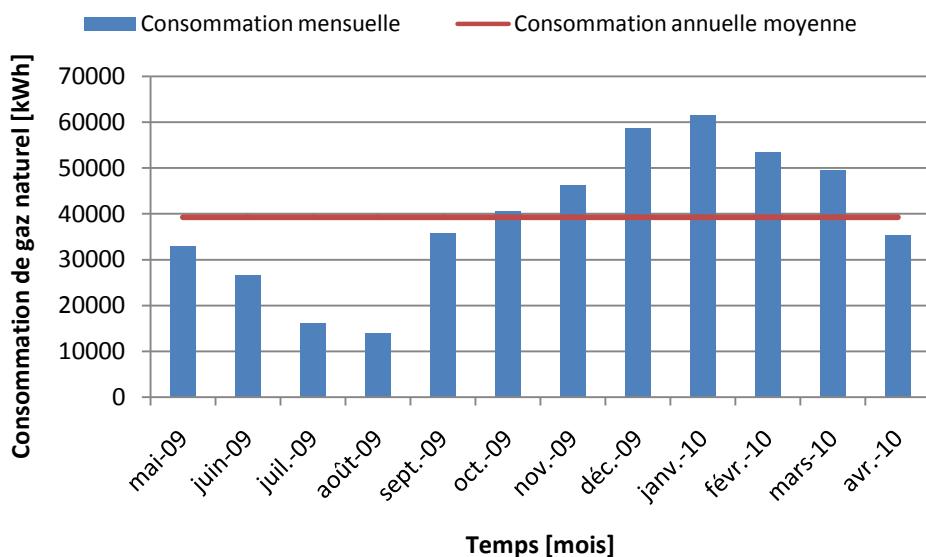


Figure 22 : Consommation mensuelle de gaz naturel pour les 4 étages de l'Occupant 2

La consommation moyenne des 12 mois est de 39240 kWh et les consommations mensuelles sont reprises dans la partie « 11.3. Annexe C ».

Comme attendu, la consommation de gaz naturel est beaucoup plus importante en hiver qu'en été, au moment où les températures extérieures sont proches de 0°C au lieu de 20°C.

Une anomalie concerne le mois de septembre. En effet, la température moyenne extérieure de ce mois est de 15,1°C (contre 18,4°C en août et 10,8°C en octobre) et la consommation de gaz est importante et vaut plus de 2,5 fois celle du mois d'août et est presqu'égale à celle du moins d'octobre. Cette augmentation de consommation de gaz naturel vient dû fait qu'à ce moment-là,

la grippe A étant présente sur une grande partie du globe, la ventilation se faisait en renouvelant intégralement tout l'air avec de l'air frais. Il s'agit, en d'autres mots, d'une consigne anticontamination qui a entraîné un renouvellement intégral de l'air.

5.5. INTERACTION ENTRE CONSOMMATIONS DE GAZ NATUREL ET D'ÉLECTRICITÉ

Il peut être intéressant de mettre en parallèle les deux consommations d'énergie (voir Figure 23).

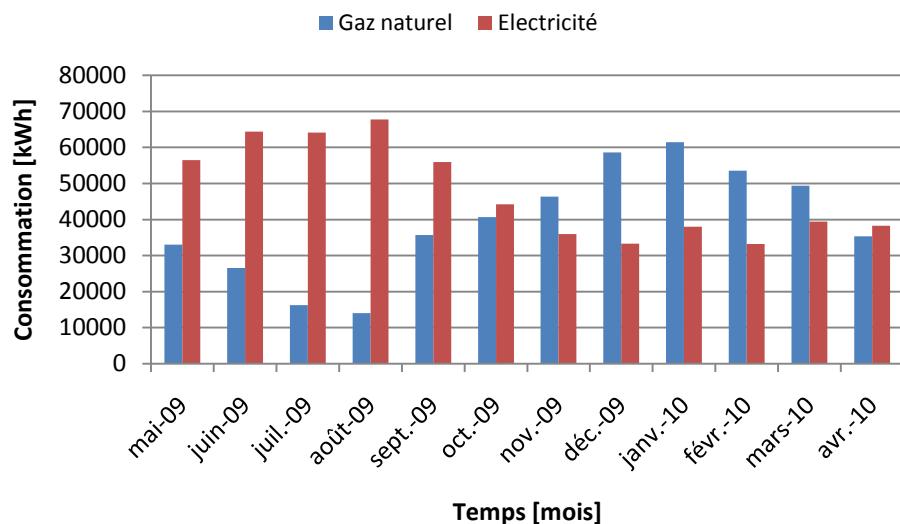


Figure 23 : Interaction entre consommations de gaz naturel et d'électricité

Ce graphique montre bien le fonctionnement du bâtiment. En été, là où les températures extérieures sont élevées, la consommation de gaz naturel est faible alors que la consommation électrique est importante. Ceci est dû au fait que le chiller fonctionne presque tout le temps afin de refroidir les locaux. En hiver, la situation inverse se produit. Afin d'avoir une température de confort suffisante, les chaudières fonctionnent quasi en continu.

6. MODÉLISATION ET PARAMÉTRAGE EN VUE DE LA CALIBRATION AVEC SIMAUDIT

6.1. PRÉSENTATION DE SIMAUDIT

Ce programme a été conçu et développé par Stéphane Bertagnolio, Ingénieur Civil et doctorant⁶ en Thermodynamique à l'Université de Liège.

Cet outil aide l'auditeur durant les phases d'inspection et d'audit détaillé. L'outil de simulation offre une option « multi-zone » à l'utilisateur et de 1 à 6 zones peuvent être considérées (voir plus si nécessaire). Chaque zone créée peut être couplée à un système de climatisation réaliste, représentant le système actuel. L'objectif de cet outil est de réaliser une étude assez détaillée des performances du bâtiment et d'identifier les principaux postes de consommation (Bertagnolio *et al.*, 2009).

6.2. MODÉLISATION DU BÂTIMENT

Avant de commencer la simulation avec SimAudit, il est nécessaire de définir les différentes zones du bâtiment ainsi que les caractéristiques du système HVAC et de fonctionnement pour ce bâtiment.

Dans ce cas-ci, il est important de préciser que la modélisation et la simulation s'effectueront sur un seul des 4 étages que compte l'Occupant 2. En effet, la répartition et la division de ces 4 étages étant sensiblement les mêmes, l'hypothèse formulée ci-dessus est valable et constitue une bonne approximation. Il faudra alors multiplier par 4 les consommations électrique et d'énergie afin de comparer avec les factures réelles. L'étage de référence est l'étage 4.

6.2.1. ORIENTATION DU BÂTIMENT

La première étape consiste à déterminer l'orientation du bâtiment par rapport aux points cardinaux. Cela sera très utile par la suite pour déterminer notamment la superficie des murs extérieurs et des fenêtres par rapport à ces points cardinaux.

En utilisant Google Earth et en y disposant une croix représentant les différentes directions (voir Figure 24), on obtient aisément les directions préférentielles des 4 façades du bâtiment :

⁶ Sujet de la thèse de S. Bertagnolio : « *Development, use and calibration of equation-based simulation tools to support energy audit of commercial buildings.* »

Tableau 13 : Orientation du bâtiment

Nord-Ouest
Sud-Ouest
Sud-Est
Nord-Est

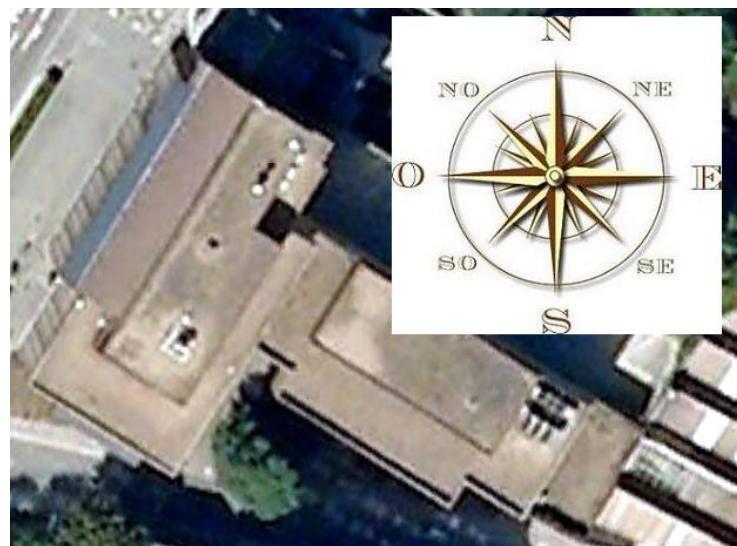


Figure 24 : Orientation du bâtiment

6.2.2. CARACTÉRISATION DE L'ENVELOPPE ET DES MURS COMPOSANT LE BÂTIMENT

Types de murs

Même si très peu d'informations sont disponibles, il apparaît évident d'essayer de définir la composition des différents murs en essayant d'être le plus juste et le plus correct avec ce qui existe réellement. Pour ce faire, il faut distinguer tous les types de murs. On en recense 5 par étage :

Tableau 14 : Différents murs composant chaque étage

Mur extérieur
Mur intérieur
Mur porteur
Mur des sanitaires
Plancher/Plafond

Ces différents murs sont représentés à la Figure 25 à l'exception du plancher et du plafond. Ne disposant pas tous les détails sur la composition des murs, des hypothèses devront être formulées tout en essayant de se rapprocher au plus près de la réalité grâce à des visites du bâtiment qui ont été effectuées et ont permis d'obtenir un peu plus d'information.

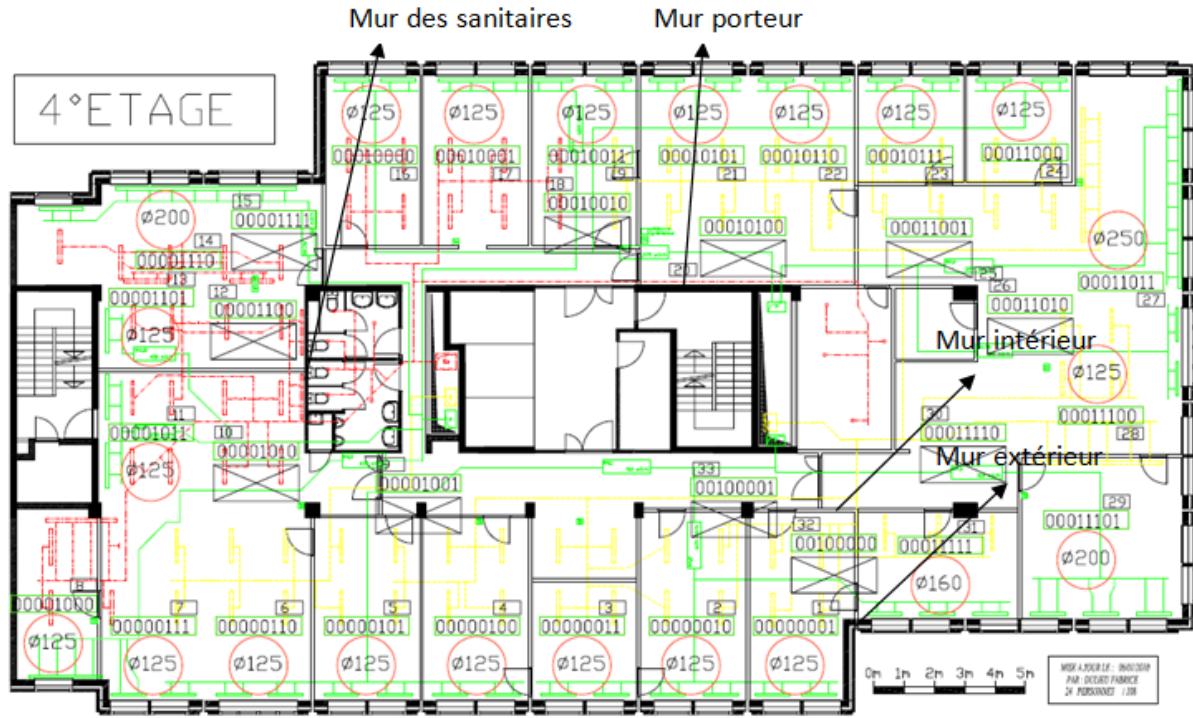


Figure 25 : Différents types de mur (Dulieu, 2010, modifié)

Le Tableau 15 reprend les caractéristiques de chaque mur. Les murs intérieurs sont en réalité des cloisons composées de panneaux de bois. Pour les autres murs, les différents matériaux ont été repris du travail réalisé au préalable par une étudiante italienne, Germana Régis. Cependant, des améliorations ont été apportées quant à la composition de certains murs comme, notamment, les murs extérieurs. Il semblerait que, après plusieurs visites, ces murs soient composés de panneaux de béton architectonique séparés par une couche d'isolant (voir Figure 26).

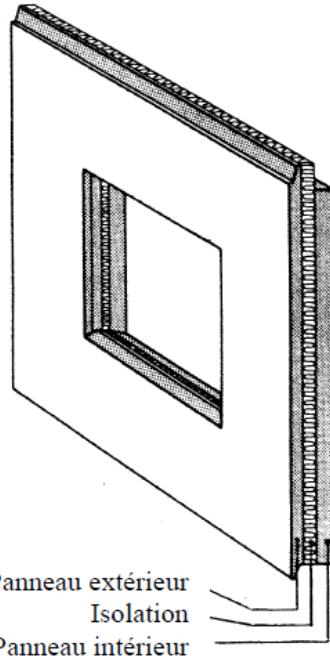


Figure 26 : Murs extérieurs composés de panneaux préfabriqués en béton architectonique (FEBE, 2010)

Le seul paramètre à encoder dans SimAudit par rapport à la composition des murs est le coefficient de transmission thermique U des murs opaques (murs extérieurs). Celui-ci se calcule de la manière suivante :

$$\frac{1}{U} = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j}$$

h_i et h_e sont respectivement les coefficients de convection intérieur et extérieur. Ils sont respectivement pris égaux à $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ et $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ (valeurs de référence fournies par SimAudit). Les deux autres paramètres e (épaisseur de la couche du matériau considéré) et λ (conductivité thermique du matériau) sont fournis par le Tableau 15. Ce tableau fournit les caractéristiques des matériaux composant les différents murs du bâtiment et proviennent du site de la Région Wallone : Energie Plus (2010).

Cela permet donc de déduire le coefficient de transmission thermique des murs extérieurs :

$$U_{murs \text{ extérieurs}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) + \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{\lambda_j}}$$

$$\Leftrightarrow U_{murs \text{ extérieurs}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{8} + \frac{1}{23} \right) + \frac{0,16}{1,73} + \frac{0,03}{0,045} + \frac{0,8}{2,24}} \cong 1,02 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Une thermographie du bâtiment a été réalisée à titre purement informatif et les résultats de celle-ci se trouvent dans la partie « 11.4. Annexe D ».

Tableau 15 : Caractéristiques des différents murs (Energie Plus, 2010)

Type de murs	Composition	Épaisseur [m]	Conductivité thermique [W/(mK)]	Masse volumique [kg/m³]	Chaleur spécifique [J/kgK]
Mur extérieur	Panneau préfab. béton	0,19	1,73	2200	1000
	Laine minérale	0,03	0,045	1800	1000
	Panneau préfab. béton	0,08	2,24	2200	1030
Mur intérieur	Panneaux en bois	0,08	0,17	600	1880
Mur des sanitaires	Briques	0,10	0,35	1050	1000
	Carrelage	0,01	1,20	2000	1000
Mur porteur	Plâtre	0,01	0,52	1300	1000
	Maçonnerie	0,19	1,357	1800	1000
	Briques	0,10	0,35	1050	1000
Plancher	Plâtre	0,01	0,52	1300	1000
	Houïdis	0,19	1,70	2400	1000
	Béton léger (chape)	0,05	0,15	450	1000
	Carrelage	0,01	1,20	2000	1000

Fenêtres : châssis et vitrage

Les fenêtres sont composées d'un double vitrage et d'un châssis en aluminium (voir Figure 27).

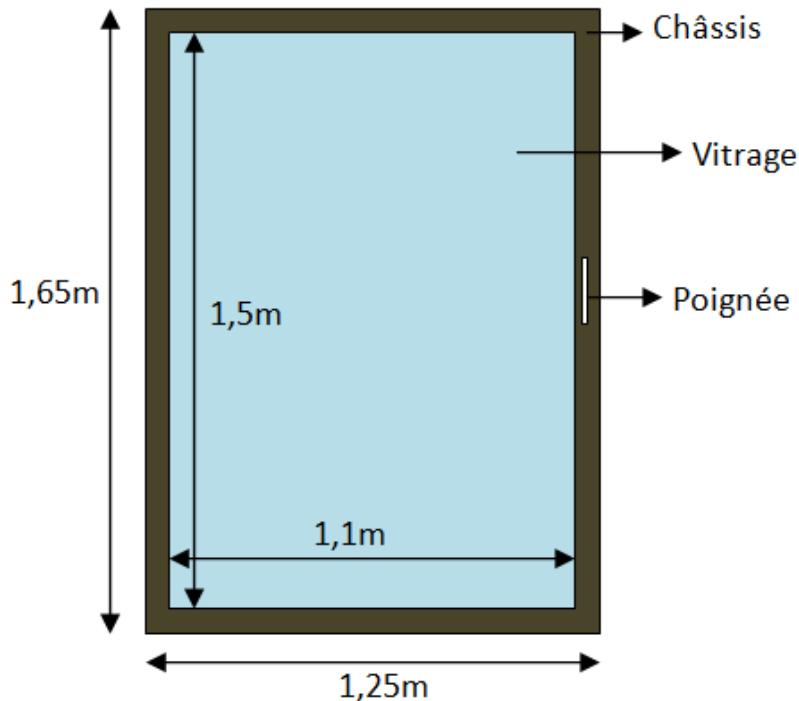


Figure 27 : Fenêtre du bâtiment à Charleroi

Les dimensions sont données à la Figure 27 et, connaissant les dimensions du vitrage et de la fenêtre, il est aisément de déterminer la superficie occupée par les châssis :

$$A_{châssis} = A_{fenêtre} - A_{vitrage} = 1,65 \cdot 1,25 - 1,5 \cdot 1,1 = 0,4125 \text{ m}^2$$

Dès lors, le rapport entre les aires du châssis et de la fenêtre vaut :

$$\frac{A_{châssis}}{A_{fenêtre}} = \frac{0,4125}{1,65 \cdot 1,25} = 0,2$$

Le châssis représente 20% de la fenêtre alors que le vitrage occupe, quant à lui, 80%. Le vitrage utilisé est du double vitrage Glaverbel Stopsol 6/12/6 (voir Figure 28). Il est donc composé de deux vitrages de 6mm d'épaisseur et d'une lame d'air de 12mm.

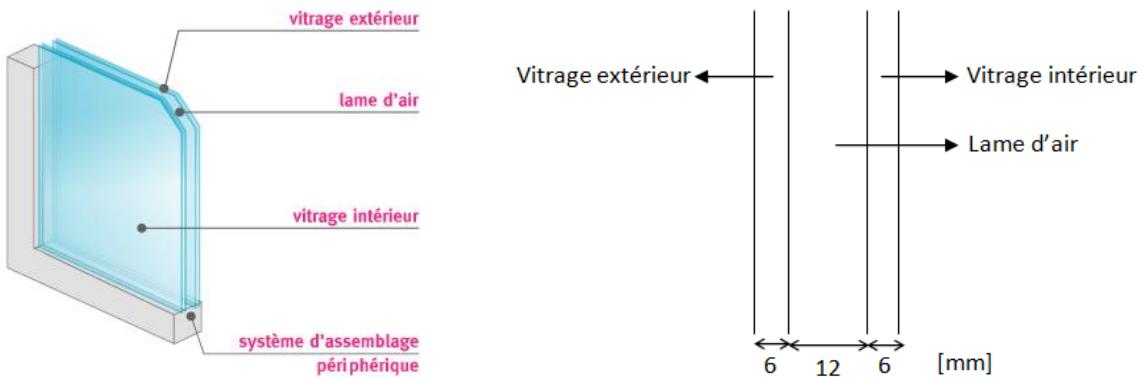


Figure 28 : Double vitrage des fenêtres du bâtiment

Les caractéristiques des composants des fenêtres sont données dans le Tableau 16 :

Tableau 16 : Composants d'une fenêtre

Composant	Coefficient de transmission thermique U [W/m ² K]	Superficie [m ²]	Pourcentage d'occupation de la fenêtre [%]
Vitrage	2,84	1,65	80
Châssis	5	0,4125	20

L'outil SimAudit ne demande pas d'introduire le coefficient de transmission thermique U de la fenêtre mais uniquement ceux du vitrage et du châssis. Cependant, afin d'avoir une idée du coefficient de transmission de la fenêtre, celui-ci peut se calculer aisément grâce au Tableau 16 :

$$U_{fen\acute{e}tre} = U_{ch\acute{a}ssis} \cdot \% \text{ occupation de la fen\acute{e}tre} + U_{vitrage} \cdot \% \text{ occupation de la fen\acute{e}tre}$$

$$\Leftrightarrow U_{fen\acute{e}tre} = 5 \cdot 0,2 + 2,84 \cdot 0,8 = 3,27 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ce coefficient paraît assez élevé et pourra donc faire l'objet d'une modification à apporter lors de la rénovation future.

6.2.3. DIVISION MULTI-ZONALE

L'étape suivante consiste à diviser l'étage choisi en différentes zones. Le nombre de zone pour ce bâtiment est choisi égal à 5. La répartition des zones est définie comme à la Figure 29.

À présent que les zones sont bien définies, il est alors possible de déterminer différents paramètres propre à chaque zone tels que la superficie climatisée, la surface des murs intérieurs et des murs adjacents (voir Tableau 17).

Tableau 17 : Caractéristiques des zones (surfaces climatisée, des murs adjacents et des murs intérieurs)

Paramètres	Zones				
	1	2	3	4	5
Superficie climatisée [m ²]	145,87	103,20	208,24	110,59	54,85
Surface des murs adjacents [m ²]	41,25	0	0	0	0
Surface des murs intérieurs [m ²]	108,51	155,40	211,65	86,85	169,65

D'autres paramètres tels que la superficie des murs extérieurs et des fenêtres peuvent être aisément déterminés. Cependant, ces valeurs sont calculées en fonction de la direction des façades par rapport aux différents points cardinaux (voir Tableau 18).

Tableau 18 : Caractéristiques des zones (Surfaces des murs extérieurs et des fenêtres)

Paramètres	Direction	Zones				
		1	2	3	4	5
Superficie des murs extérieurs [m ²]	NO	22,35	42,30	20,52	0	0
	NE	25,32	0	0	0	0
	SE	23,25	0	13,95	45	0
	SO	0	0	44,82	8,10	0
Superficie des fenêtres [m ²]	NO	10,32	20,64	12,38	0	0
	NE	0	0	0	0	0
	SE	10,32	0	12,38	20,64	0
	SO	0	0	20,64	0	0

Une autre remarque importante à émettre lors de la constitution de ces zones est le fait que les escaliers, les ascenseurs et les sanitaires n'ont pas été pris en compte. En effet, ces endroits sont non climatisés et ne doivent donc pas être considérés dans la modélisation et la simulation.

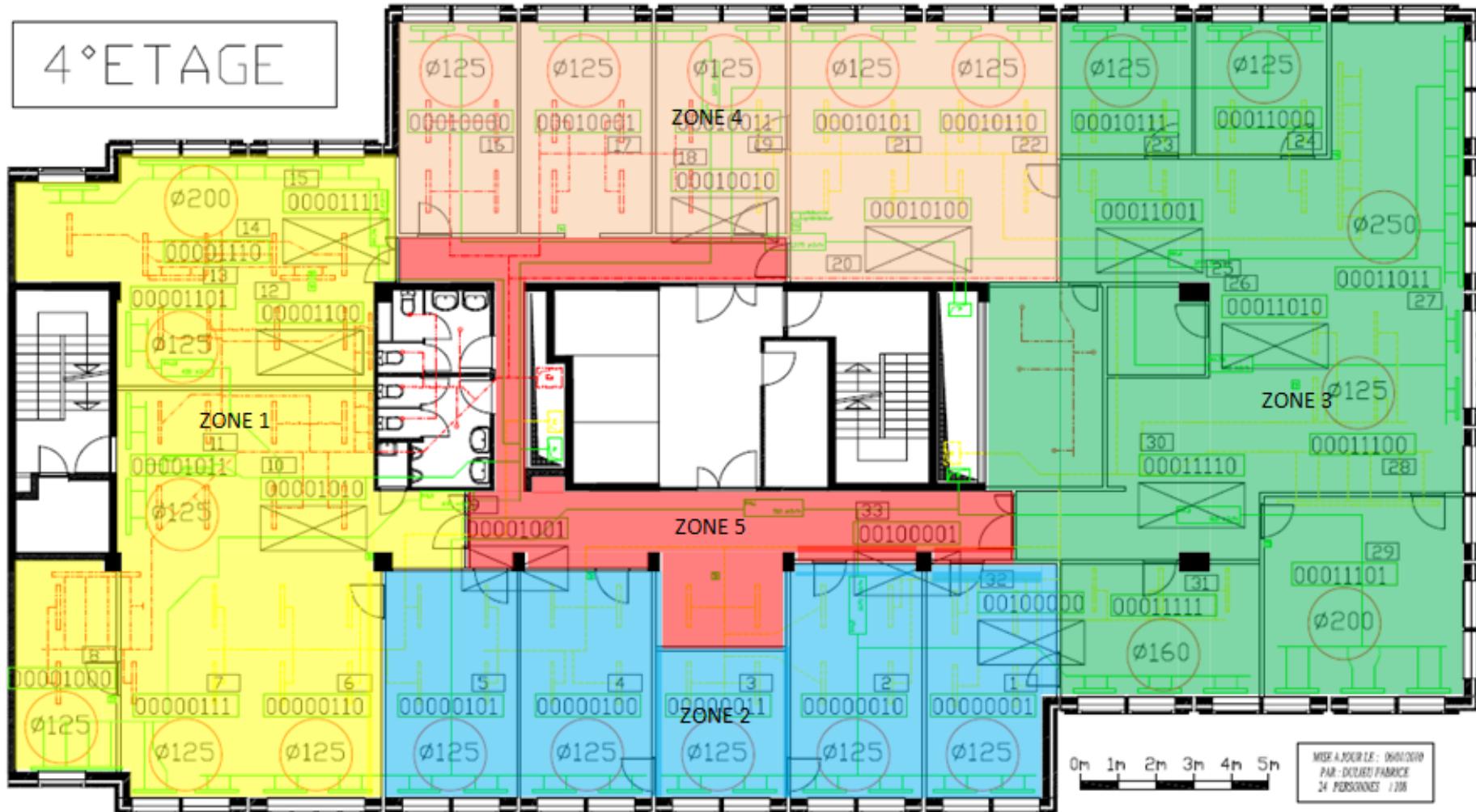


Figure 29 : Division de l'étage 4 en 5 zones (Dulieu, 2010, modifié)

6.2.4. FONCTIONNEMENT ET OCCUPATION DU BÂTIMENT

Il est important de définir les horaires d'occupation et de fonctionnement du bâtiment, c'est-à-dire les périodes pendant lesquelles l'éclairage, les appareils électriques et la ventilation fonctionnent à plein régime et celles pour lesquelles ces derniers ne fonctionnent qu'à un certain pourcentage de leur valeur totale.

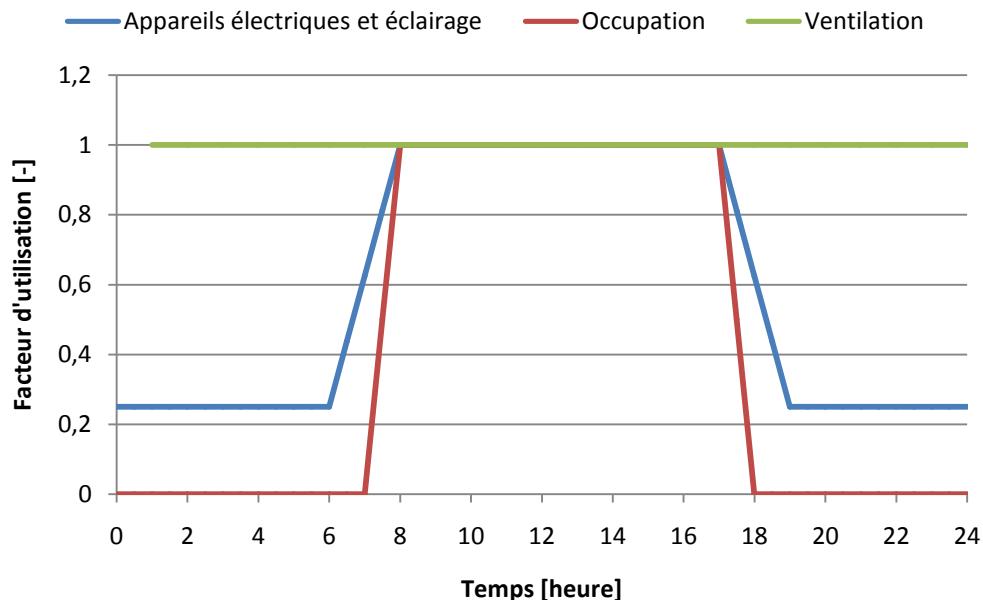


Figure 30 : Fonctionnement du bâtiment pour un jour de la semaine

Comme le montre la Figure 30, avant 7h, personne n'est présent dans le bâtiment. À partir de 7h, le personnel arrive progressivement dans le bâtiment et, à 8h, la totalité des employés est arrivée et reste⁷ en place jusque 17h. À partir de cette heure-là, les employés quittent petit à petit leur poste jusque 18h, heure à laquelle plus personne n'est présent dans le bâtiment. Personne n'est présent dans les locaux appartenant à l'Occupant 2 les weekends.

Comme décrit précédemment (voir Figure 21), les appareils électriques et l'éclairage fonctionnent tout le temps de 8h à 17h, à 50% de 7h à 8h et de 17h à 19 et à 25% de 19h à 7h ainsi que pendant les weekends.

La ventilation (AHU) est active à partir du dimanche à 16h jusqu'au vendredi 20h (voir Figure 31).

⁷ Il est important de noter que la pause de midi n'a pas été prise en compte. C'est pourquoi la totalité des employés est présente de 8h à 17h.

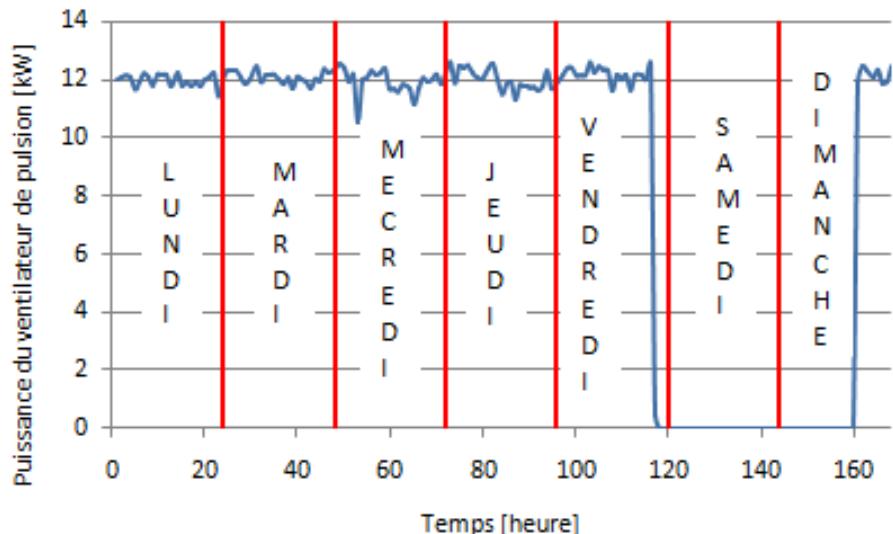


Figure 31 : Profil de ventilation du bâtiment

Dès lors, il en ressort que du lundi au vendredi, la ventilation fonctionne en continu. Ceci est assez atypique pour un bâtiment, non occupé en permanence, de ne pas couper la ventilation la nuit ce qui permettrait de réaliser des économies.

6.2.5. GAINS INTERNES

Il faut distinguer deux types de gains internes : ceux dus à l'éclairage et aux appareils électriques et ceux dus aux personnes.

Les premiers gains ont été définis à la section « 5.3.2. Données importantes résultantes des mesures effectuées ». Pour rappel, ces gains ont été calculés en se basant sur les mesures de consommation mensuelle électrique et de l'éclairage effectuées sur un étage. Ces gains varient en fonction du mois (voir Tableau 11, page 27).

Les seconds gains proviennent de la chaleur dégagée par les occupants. Celle-ci vaut approximativement 115 W⁸ par occupant.

6.2.6. SYSTÈME HVAC

Cette partie est très importante pour la simulation car les consommations énergétiques (électricité et gaz naturel) du bâtiment vont dépendre fortement des différents paramètres développés ci-après.

Production de chaleur

Puisqu'il s'agit de chaudières classiques datant de plus de 20 ans, leur rendement sera estimé à 86%, rendement normal pour ce genre de chaudière.

⁸ Cette valeur provient des livres ASHRAE (2009).

Les températures de consigne pour la production de chaleur sont les suivantes :

- lorsque le bâtiment est occupé, la température intérieure ambiante est de 22°C;
- lorsque le bâtiment est inoccupé, la température intérieure ambiante est de 19°C.

Production de froid

L'un des paramètres les plus importants pour les chillers est le coefficient EER, c'est-à-dire le taux d'efficacité énergétique (« Energy Efficiency Rating »), indice de performance des chillers. Plus ce coefficient est élevé, plus le système est efficace. Or aucune information n'est disponible à ce sujet. Étant donné que la machine frigorifique est assez vétuste et qu'il s'y produit quelques fuites de réfrigérant par moment, nous considérons le coefficient EER égal à 2⁹.

Les températures de consigne pour la production de froid sont les suivantes :

- lorsque le bâtiment est occupé, la température intérieure ambiante est de 23°C;
- lorsque le bâtiment est inoccupé, la température intérieure ambiante est de 30°C.

Ventilation

L'une des lois les plus importantes pour le système HVAC est celle qui donne les températures de pulsion en fonction de la température extérieure (voir Figure 32).

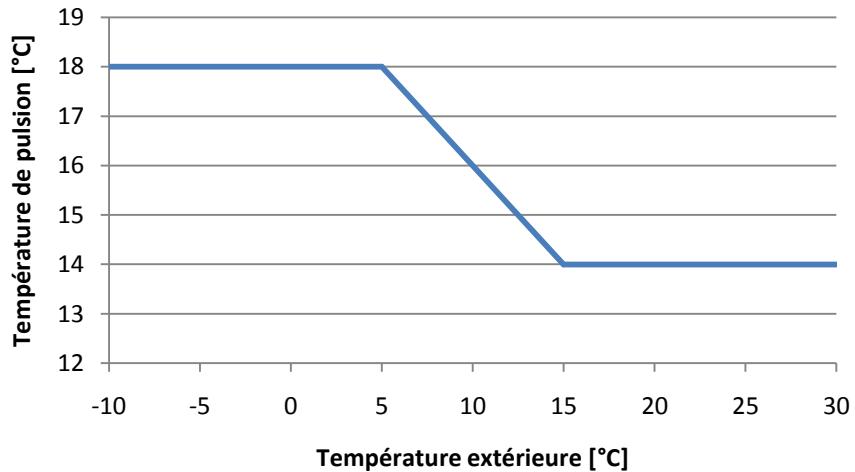


Figure 32 : Loi de température de pulsion

La consigne pour une température extérieure inférieure à 5°C donne une température de pulsion de l'air de 18°C et la consigne pour une température extérieure supérieure à 15°C donne une température de pulsion de l'air de 14°C (voir Figure 32). Entre ces deux états, la loi est de type linéaire et a été déterminée expérimentalement.

⁹ La détermination de la valeur du coefficient EER est reprise dans la partie « 11.5. Annexe E ».

Ensuite, il faut déterminer la puissance spécifique des ventilateurs de pulsion (SFP_{sufan}) et d'extraction (SFP_{refan}). Pour ce faire, il faut connaitre la puissance nominale des ventilateurs. La Figure 19 montre les puissances des groupes de pulsion et d'extraction au cours de temps. Elles valent respectivement 12kW et 6kW.

Pour le ventilateur de pulsion GP2, la puissance spécifique se calcule de la manière suivante :

$$SFP_{sufan,GP2} \left[\frac{Ws}{m^3} \right] = \frac{\text{Puissance } [W]}{\text{Débit ventilé } \left[\frac{m^3}{s} \right]} = \frac{12000[W]}{30000 \left[\frac{m^3}{h} \right]} \cdot 3600 = 1440$$

Il en est de même pour le ventilateur d'extraction, ce qui donne une puissance spécifique de 720 Ws/m³. Ne disposant d'aucune mesure concernant les ventilateurs des groupes 3 et 4, les valeurs calculées ci-dessus seront majorées de 15% puisque, dans SimAudit, l'hypothèse qu'il n'y a qu'un groupe de pulsion/extraction sera formulée.

Par conséquent, la puissance spécifique totale du système de pulsion (comprenant tous les groupes de pulsion) vaut :

$$SFP_{sufan} \left[\frac{Ws}{m^3} \right] = 1,15 \cdot SFP_{sufan,GP2} \left[\frac{Ws}{m^3} \right] = 1656$$

De même, la puissance spécifique totale du système d'extraction vaut 828 Ws/m³.

Le dernier paramètre à calibrer concerne le taux de ventilation. Ce dernier influencera grandement la consommation de gaz naturel. Il faut donc définir deux taux de ventilation : un maximum et un minimum. Le taux de ventilation maximal sera pris égal à 3 volume/h.

Pour une qualité d'air modérée et pour un travail de bureau, il faut 30m³/h d'air frais par personne. Dès lors, sachant qu'une personne occupe approximativement 10 m² de surface au sol et que la hauteur du plafond est de 3m, le taux de ventilation minimal sera de 1 volume/h. Toutefois, pour le mois de septembre, le taux de ventilation minimal est égal au taux de ventilation maximal puisque, pour des mesures sanitaires (grippe A), l'air extrait des locaux n'est pas réutilisé et donc l'air insufflé dans les locaux provient uniquement de l'extérieur.

7. CALIBRATION DU MODÈLE AVEC SIMAUDIT

7.1. POURQUOI EFFECTUER UNE CALIBRATION ?

Dans le but d'avoir un modèle proche de la réalité, il est important d'effectuer une calibration. La calibration ne s'obtient pas au premier essai, mais en effectuant un certain nombre de simulations. Il faut tester et faire varier un grand nombre de paramètres afin d'obtenir un modèle satisfaisant représentant le plus correctement possible la situation réelle.

Grâce à ce modèle, des améliorations de rénovation vont pouvoir être envisagées et être comparées à la situation initiale afin de voir les différentes économies d'énergie qui peuvent être réalisées.

7.2. MÉTHODOLOGIE

Comme mentionné ci-dessus, un modèle calibré ne s'obtient pas du premier essai. Pour arriver à une calibration de bonne qualité, un nombre important de simulations a été réalisé. Dans ce cas-ci, ce nombre s'élevait à plus de 300.

Il faut procéder par étapes. Pour commencer, la première étape fut d'encoder les paramètres connus comme ceux fournis par la campagne de mesures (i.e. la puissance spécifique totale des groupes de pulsion et d'extraction, les puissances par surface dues aux appareils électriques et à l'éclairage, etc.) ou encore ceux provenant du BEMS (i.e. la température de pulsion, etc.).

Ensuite, il a fallu faire varier divers paramètres dont la valeur précise n'était pas connue et analyser l'impact d'un tel paramètre sur les consommations énergétiques. Par exemple, le rendement des chaudières fut pris initialement à 90% puis ramené à 86% en consultant les valeurs de rendement pour des chaudières classiques fournies dans le cours d'André (2010). Un autre paramètre important est le coefficient de transmission thermique des murs opaques. Ce dernier a été défini initialement à 1,4 W/m²K suite à un travail réalisé antérieurement. Cependant, ce coefficient paraissait assez élevé et les plusieurs visites du bâtiment effectuées ont permis d'en savoir plus sur la composition des murs extérieurs. Le coefficient fut ensuite ramené finalement à une valeur de 1 W/m²K .

La procédure est donc la même pour les autres paramètres indéterminés (entre autre les taux d'humidité maximal et minimal, le coefficient de gain de chaleur solaire « SHGC », etc.). Il s'agit de voir leur effet sur les consommations énergétiques. Ces simulations ont été réalisées mois par mois pour être ensuite reportées sur un graphique¹⁰. En effet, puisque les

¹⁰ Les paramètres principaux encodés dans SimAudit sont repris dans la section « 11.6. Annexe F ».

consommations électriques mensuelles en terme d'éclairage et d'appareils électriques sont à disposition, il est donc évident qu'en procédant de la sorte, les résultats obtenus seront meilleurs qu'avec une simulation annuelle.

7.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Dès lors, après avoir effectué ces simulations, un modèle a pu être calibré. Il est important de noter que les graphiques ci-dessus représentent les consommations énergétiques totales de l'Occupant 2, c'est-à-dire l'ensemble des 4 étages.

7.3.1. CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

La consommation électrique du modèle (bâtonnets rouges) peut être comparée à celle qui a été mesurée (bâtonnets bleus) et sont représentées sur la Figure 33¹¹.

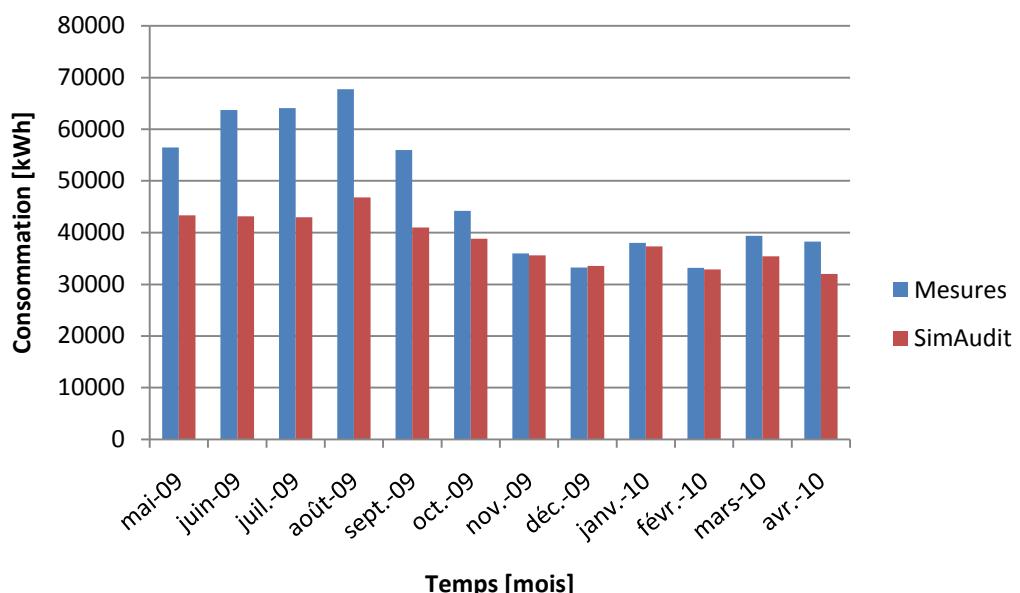


Figure 33 : Consommations électriques mesurée (bâtonnets bleus) et simulée (bâtonnets rouges)

Plusieurs remarques importantes peuvent être tirées de la Figure 33. Les consommations mesurée et simulée sont presqu'égales en hiver (une erreur de l'ordre de quelques %) alors qu'en été, ces consommations sont loin d'être égales (une erreur assez élevée de l'ordre de 30%). Une explication de l'écart des consommations estivales provient du chiller. En effet, la consommation électrique du chiller représente près de 50% de la consommation électrique mensuelle en été. En effet, comme le montre la Figure 34, la consommation électrique mesurée du chiller est importante.

¹¹ Les valeurs précises des consommations électriques simulée et mesurée sont reprises dans la section « 11.2. Annexe B ». Les valeurs des consommations électriques en kWh/m² sont reprises dans la partie « 11.7. Annexe G ».

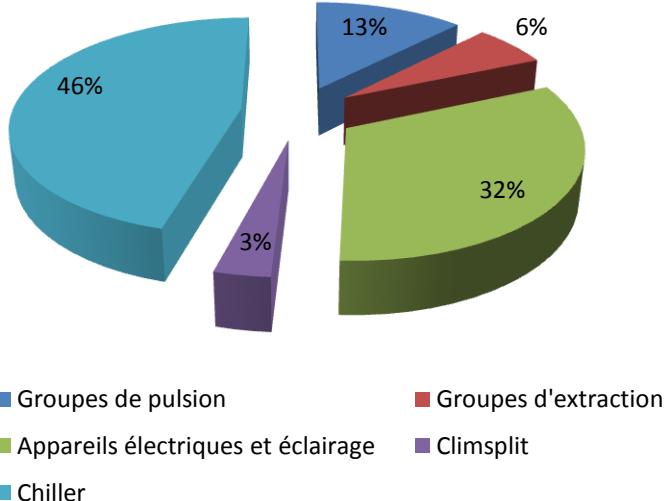


Figure 34 : Répartition de la consommation électrique mesurée du mois d'août en fonction de l'utilisation

Ceci provient du fait que le chiller est vétuste, qu'il a des pertes de réfrigérant et qu'il est mal entretenu, comme il l'a été dit précédemment. Il n'a donc pas été possible d'approcher au mieux ces consommations puisque le coefficient de performance du chiller a été pris à 2, valeur très faible, puisqu'aucune information n'a pu être trouvée sur les données « constructeur » de la machine frigorifique.

En hiver, lorsque la consommation du chiller est très faible, il est possible d'approcher assez facilement les consommations mesurées. En effet, la consommation électrique du chiller mesurée est de l'ordre de quelques pourcents (voir Figure 35).

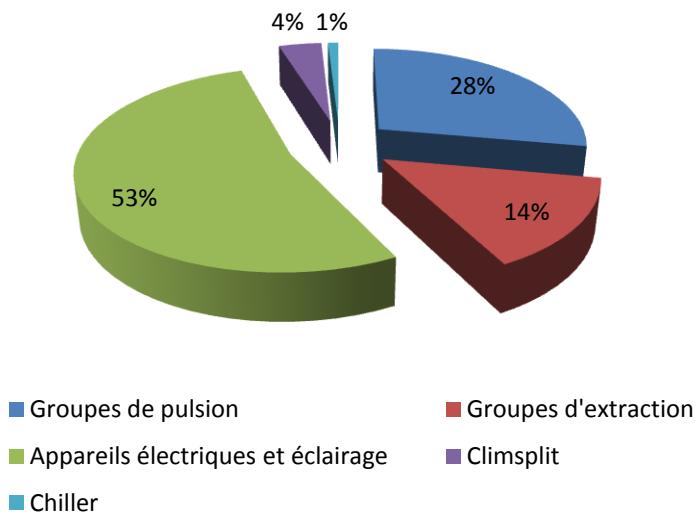


Figure 35 : Répartition de la consommation électrique mesurée du mois de décembre en fonction de l'utilisation

Dès lors, la conclusion suivante peut être tirée : le chiller consomme beaucoup plus que ce qu'il ne devrait d'où les écarts assez importants entre consommations mesurée et simulée en été. Il serait très intéressant de faire un monitoring *in situ* sur la consommation du chiller (eau froide) afin d'obtenir un coefficient de performance du chiller assez précis et d'obtenir des résultats plus cohérents et correctes pour la consommation électrique en été.

7.3.2. CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

La consommation électrique du modèle (bâtonnets rouges) peut être comparée à celle qui a été mesurée (bâtonnets bleus) et sont représentées sur la Figure 36¹².

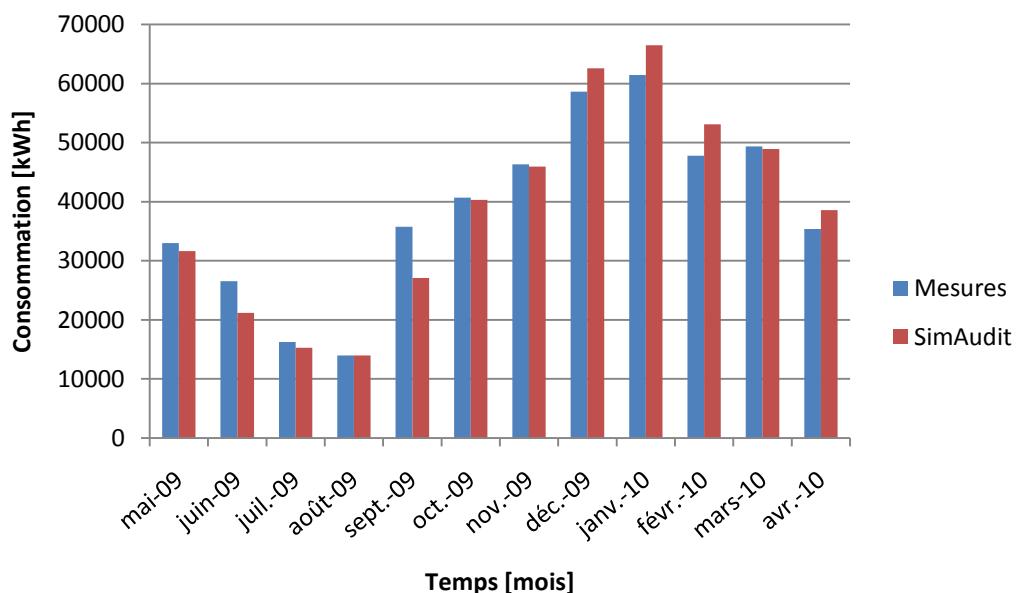


Figure 36 : Consommations de gaz naturel mesurée (bâtonnets bleus) et simulée (bâtonnets rouges)

Contrairement à la consommation électrique, celle de gaz naturel simulée approche avec une certaine précision la consommation mesurée, mis à part en septembre où la ventilation fonctionnait avec uniquement de l'air frais (uniquement pour raison sanitaire, grippe A).

7.3.3. ERREURS DU MODÈLE

Pour estimer la qualité de la calibration réalisée, les résultats du modèle sont comparés aux relevés de consommations en termes d'erreur moyenne (« Mean Bias Error » ou « MBE ») et de coefficient de variation de la racine de l'erreur quadratique moyenne (« Root Mean Squared Error » ou « RMSE ») (Bertagnolio et al., 2009).

¹² Les valeurs précises des consommations de gaz naturel simulée et mesurée sont reprises dans la section « 11.3. Annexe C ». Les valeurs des consommations de gaz naturel en kWh/m² sont reprises dans la partie « 11.7. Annexe G ».

L'erreur moyenne « MBE » se calcule via la formule suivante (Bertagnolio, 2009):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pred,i} - Q_{data,i})}{nQ_{data}}$$

Quant au de variation de la racine de l'erreur quadratique moyenne « CV(RMSE) », il est donné par :

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_{pred,i} - Q_{data,i})^2}}{Q_{data}}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} Q_{pred,i} : \text{valeur calculée durant la période } i \text{ (fournie par SimAudit)} \\ Q_{data,i} : \text{valeur mesurée durant la période } i \\ Q_{data} : \text{valeur moyenne mesurée durant tout la période} \end{array} \right.$

Dans ce cas-ci, l'indice « i » correspond à un mois de l'année et l'indice « n » reprend tous les mois sur lesquels la calibration s'effectue.

Tableau 19 : Erreurs de la calibration réalisée

Type d'erreur	Consommation	
	De gaz naturel	Électrique
MBE [%]	-0,0024	-18,82
CV(RMSE) [%]	2,93	7,41

Le Tableau 19 reprend les erreurs de la calibration réalisée. Les tolérances pour le MBE et le CV(RMSE) sont respectivement de $\pm 5\%$ et $\pm 15\%$. En ce qui concerne la consommation de gaz naturel, la calibration est de très bonne qualité puisque les deux erreurs sont largement en dessous des valeurs limites.

Par contre, pour la consommation électrique, la calibration est de moyenne qualité. Le CV(RMSE) est bien respecté alors que le MBE ne l'est pas. Il peut être bon de vérifier les erreurs en scindant l'année en deux périodes :

- Une période baptisée « Mois d'hiver » comprenant les mois d'octobre à mars
- L'autre période représentant les mois d'avril à septembre et nommée « Mois d'été ».

Comme il l'a été expliqué ci-dessus, les mois d'hiver sont très bien calibrés. Pendant ces mois-là, le chiller ne fonctionne que très peu alors que le phénomène inverse se produit en été.

Tableau 20 : Erreurs de la calibration sur la consommation électrique en fonction des périodes de l'année

Type d'erreur	Consommation électrique	
	Mois d'été	Mois d'hiver
MBE [%]	-28,00	-4,65
CV(RMSE) [%]	12,06	3,02

Le Tableau 20 représente les erreurs sur ces deux périodes. En hiver, les erreurs sont bien respectées ce qui indique que le modèle est très bien calibré alors qu'en été, le MBE dépasse largement la tolérance fixée.

Cependant, comme il a été précédemment mentionné, la consommation électrique est surévaluée en été et ne peut être modélisée avec une bonne précision à cause du chiller. Le choix est donc de faire abstraction de cette erreur sur la consommation électrique et de considérer, en conclusion, que la calibration réalisée est de bonne qualité.

8. RÉNOVATION ET AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT

8.1. INTRODUCTION

Lors du point précédent, un modèle a pu être défini et calibré avec une certaine précision. Grâce à ce modèle, des améliorations vont pouvoir être envisagées en termes de performance énergétique et réduction des coûts énergétiques.

Les améliorations de la performance énergétique du bâtiment abordées dans ce travail sont être les suivantes¹³ :

- Utilisation de vitrages et de châssis de fenêtre performants;
- Remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation;
- Nouveaux murs opaques avec un coefficient de transmission thermique de 0,4 W/m²K;
- Utilisation rationnelle de la ventilation;
- Remplacement du chiller par un chiller ayant un coefficient de performance plus élevé;
- Variation de la température de pulsion;
- Utilisation de lampes à basses consommations;
- Modification de la température ambiante lorsque le bâtiment est inoccupé.

Pour toutes ces améliorations ou rénovations, les consommations énergétiques de celles-ci seront comparées au modèle calibré précédemment.

8.2. CAS 1 : UTILISATION DE VITRAGES ET DE CHÂSSIS DE FENÊTRE PERFORMANTS

8.2.1. INTRODUCTION

Les vitrages et châssis de fenêtre actuels ont un coefficient de transmission thermique respectivement égal à 2,84 (double vitrage) W/m²K et 5 (châssis en aluminium) W/m²K. Il est donc possible d'utiliser des éléments plus performants.

¹³ Les ECOs (« Energy Conservation Opportunities ») sont reprises dans la section « 11.8. Annexe H ».

Pour cette première variante, les vitrages peu performants seront remplacés par des vitrages à basse émissivité (dit « low-e ») ayant un niveau de déperdition thermique de chaleur de 1,1 W/m²K. Les châssis¹⁴ utilisés sont en PVC dont le coefficient de transmission thermique vaut 1,4 W/m²K.

En procédant de la sorte, la réglementation wallonne à appliquer à partir du 1^{er} mai 2010 est bien respectée. En effet, celle-ci prévoit que le coefficient de transmission thermique des vitrages soit au maximum de 1,6 W/m²K et que celui des fenêtres soit au maximum de 2,5 W/m²K. Or dans ce cas-ci, ce coefficient vaut :

$$U_{fen\acute{e}tre} = U_{ch\acute{a}ssis} \cdot \% \text{ occupation de la fen\acute{e}tre} + U_{vitrage} \cdot \% \text{ occupation de la fen\acute{e}tre}$$

$$\Leftrightarrow U_{fen\acute{e}tre} = 1,4 \cdot 0,2 + 1,1 \cdot 0,8 = 1,16 \text{ W/m}^2\text{K} < 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

8.2.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

La Figure 37 montre l'impact du remplacement des châssis et vitrages actuellement en service par des éléments plus performant énergétiquement.

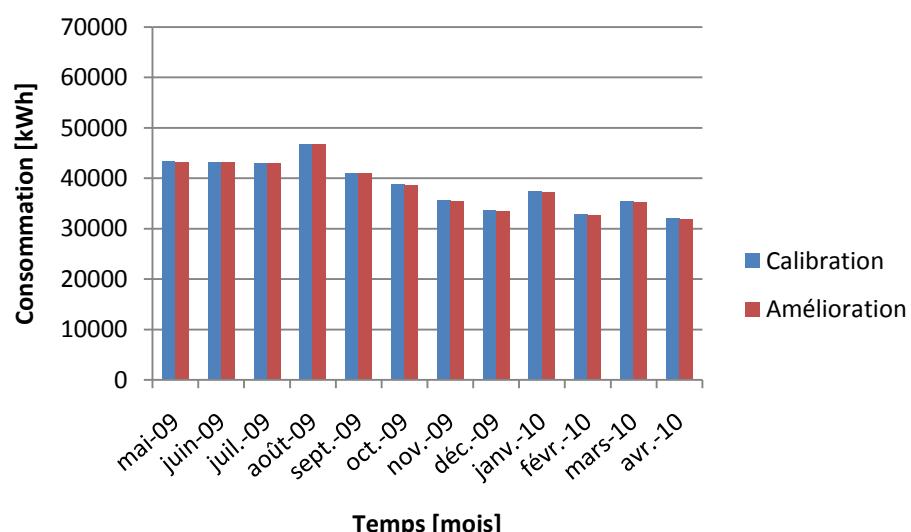


Figure 37 : Impact sur la consommation électrique avec le remplacement des fenêtres

La consommation électrique ne varie pas ou très peu. Dès lors, en réalisant la rénovation des fenêtres, il n'est pas permis de faire des économies sur l'électricité.

¹⁴ Les châssis ont été choisis dans le catalogue de la société Williams sprl : <http://www.williams-chassis.be>. Il s'agit de la référence : Système de fenêtres Topline AD 70mm.

8.2.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Comme le montre la Figure 38, le choix de placer des fenêtres plus performantes permet de réaliser de grosses économies sur la consommation de gaz naturel. Cela permet donc de réduire, en moyenne, de 17% cette consommation, soit une économie d'approximativement 80000 kWh ou encore 8000 m³ de gaz naturel.

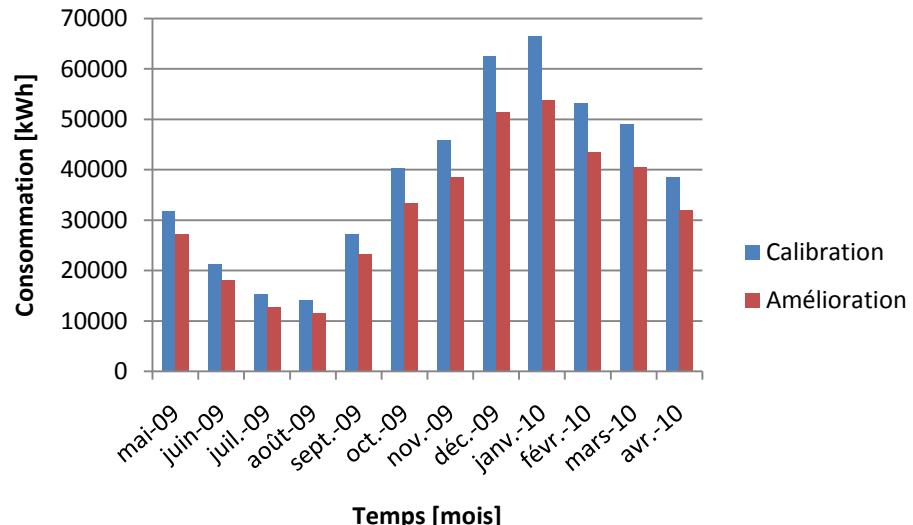


Figure 38 : Impact sur la consommation de gaz naturel avec le remplacement des fenêtres

8.2.4. RETOUR SUR INVESTISSEMENT

Connaissant les économies qui peuvent être envisagées en remplaçant les fenêtres, il serait bon d'estimer le « pay back », c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'investissement soit récupéré.

Sachant que le prix total moyen pour le gaz naturel (incluant le prix de l'énergie, le prix de distribution, les taxes...) est de 0,415 €/m³ et que les gains en gaz naturel sont estimés à 8000m³/année, il est possible d'économiser 3325 €/année.

Pour remplacer toutes les fenêtres existantes par des fenêtres plus performantes énergétiquement, il en coutera environ 88000¹⁵ € TVA incluse.

Dès lors, pour rentabiliser l'investissement initial, il faudra :

$$\text{temps de récupération} = \frac{88000 \text{ [€]}}{3325 \left[\frac{\text{€}}{\text{an}} \right]} \cong 27 \text{ ans}$$

¹⁵ Ce prix comprend le prix des fenêtres et des vitrages ainsi que l'enlèvement des fenêtres actuelles, la pose des nouvelles et la main d'œuvre. Pour consulter le devis réalisé par la société Fenetro sprl, voir « 11.9. Annexe I ».

Il est important de noter que l'on n'a pas tenu compte des incitants (primes de la Région Wallonne,...), de la dépréciation de l'euro dans ces calculs ou encore des intérêts du prêt pour l'achat de ces fenêtres.

8.3. CAS 2 : REMPLACEMENT DES CHAUDIÈRES CLASSIQUES PAR DES CHAUDIÈRES À CONDENSATION

8.3.1. INTRODUCTION

Pour rappel, les chaudières installées sont de type classique avec un rendement assez faible de 86%. La deuxième variante pour réduire les coûts énergétiques est de remplacer ces chaudières par des chaudières à condensation. Celles-ci ont un rendement très élevé de 107% et, grâce à ce changement, il est donc évident que la consommation de gaz naturel va diminuer ce qui va permettre de faire des économies.

Il est à noter que ce rendement de 107% n'est obtenu que lorsque l'on est dans des conditions où la condensation peut se produire, c'est-à-dire si la température de l'eau est suffisamment basse.

8.3.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Tout comme pour le remplacement des fenêtres, le remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation ne permet pas d'économiser de l'électricité (voir Figure 39).

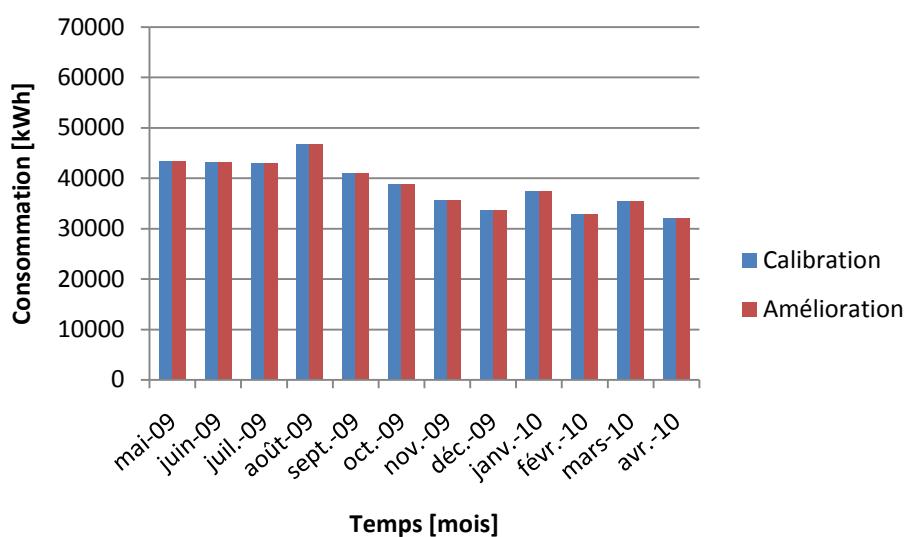


Figure 39 : Impact sur la consommation électrique avec le remplacement des chaudières

En effet, la consommation électrique en utilisant des chaudières à condensation reste exactement égale à celle des chaudières actuellement en place.

8.3.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Par contre, si l'on ne peut faire des économies sur la consommation électrique, la consommation de gaz naturel est fortement réduite (voir Figure 40).

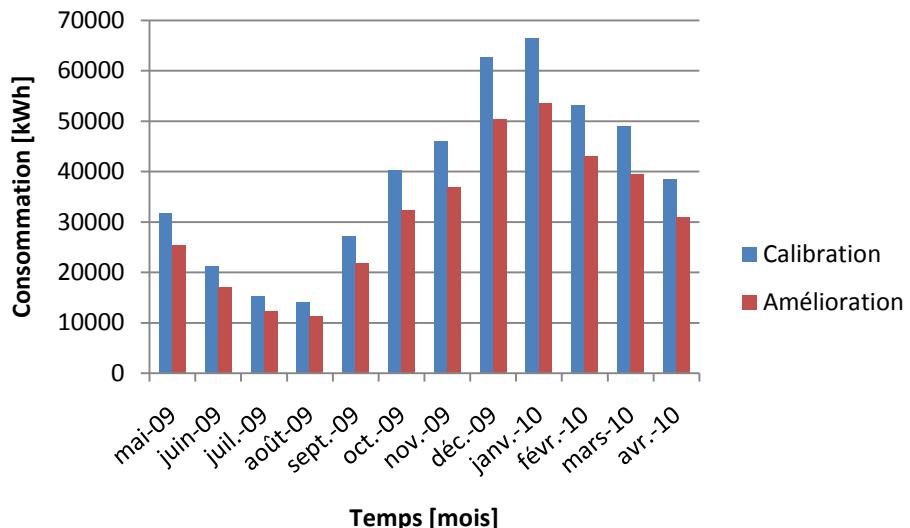


Figure 40 : Impact sur la consommation de gaz naturel avec le remplacement des chaudières

En effet, la consommation de gaz naturel atteint une diminution moyenne de l'ordre de 20%, soit une économie d'approximativement 91000 kWh ou encore 9100 m³ de gaz naturel.

8.3.4. RETOUR SUR INVESTISSEMENT

Comme pour les fenêtres, disposant des économies qui peuvent être envisagées en remplaçant les chaudières classiques, il serait bon d'estimer le « pay back ».

Les gains en gaz naturel sont estimés à 8000m³/année. Cela permet d'économiser 3780 €/année.

Pour remplacer ces chaudières par des chaudières à condensation, il en coutera environ 77000¹⁶ € TVA incluse.

Dès lors, pour rentabiliser l'investissement initial, il faudra :

$$\text{temps de récupération} = \frac{77000 \text{ [€]}}{3780 \left[\frac{\text{€}}{\text{an}} \right]} \cong 20 \text{ ans}$$

¹⁶ Ce prix comprend le prix des trois chaudières à condensation et leurs accessoires, la pose des nouvelles et la main d'œuvre. Pour consulter le devis réalisé par la société Viessmann est repris dans la section « 11.10. Annexe J ».

Il est important de noter que l'on n'a pas tenu compte des incitants (primes de la Région Wallonne,...) et de la dépréciation de l'euro dans ces calculs ni des intérêts du prêt pour acheter ces chaudières.

8.4. CAS 3 : NOUVEAUX MURS OPAQUES AVEC UN COEFFICIENT DE TRANSMISSION THERMIQUE DE 0,4 W/M²K

8.4.1. INTRODUCTION

Tout comme pour les fenêtres, la nouvelle réglementation wallonne prévoit un coefficient de transmission thermique maximal pour les murs opaques. Celui-ci est de 0,4 W/m²K. Les murs actuels ont un coefficient de 1 W/m²K, il serait donc intéressant de voir comment varieraient les consommations énergétiques en tenant compte de la nouvelle réglementation.

8.4.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Comme le montre la Figure 41, la consommation électrique reste égale à la consommation actuelle, c'est-à-dire avec des murs dont le coefficient de transmission thermique vaut 1 W/m²K.

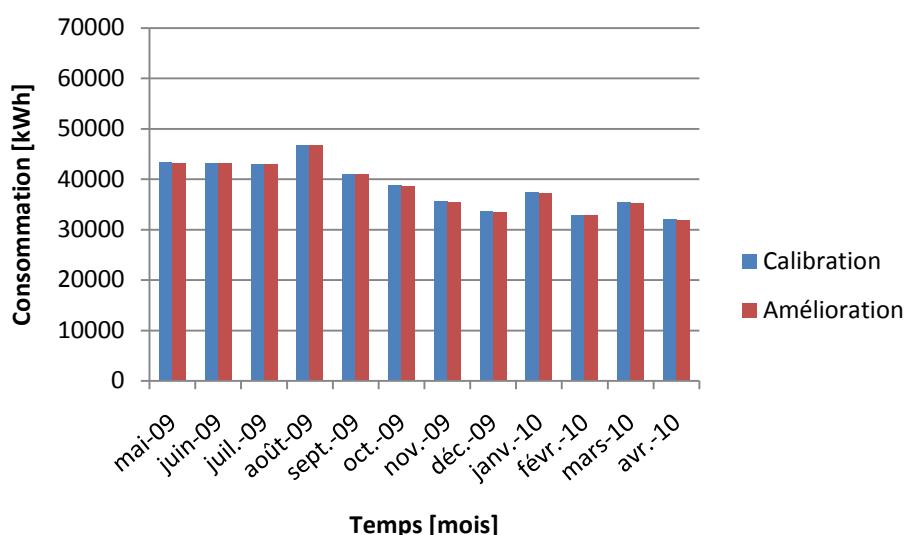


Figure 41 : Impact sur la consommation électrique avec l'utilisation de murs plus performants

8.4.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

En respectant la nouvelle réglementation wallonne, la consommation de gaz naturel peut être réduite de 13%, soit une économie d'approximativement 62500 kWh ou encore 6250 m³ de gaz naturel.

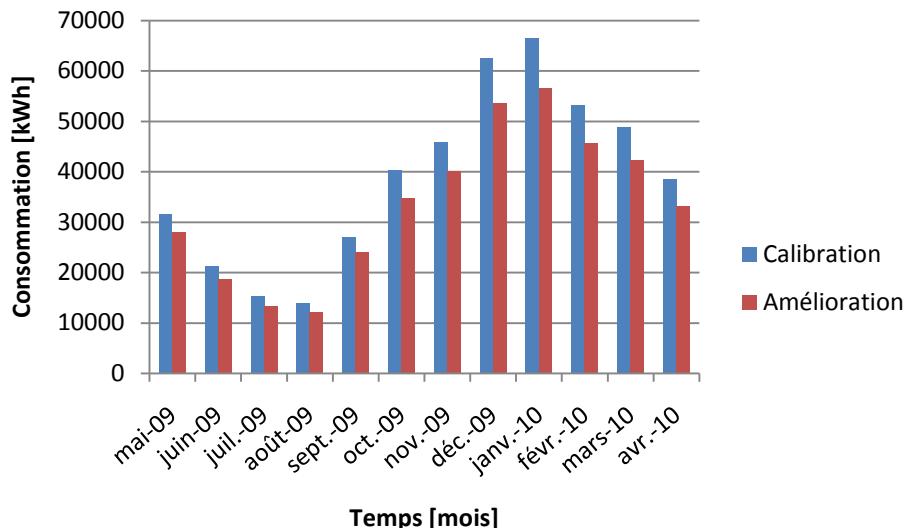


Figure 42 : Impact sur la consommation de gaz naturel avec l'utilisation de murs plus performants

8.5. CAS 4 : UTILISATION RATIONNELLE DE LA VENTILATION

8.5.1. INTRODUCTION

En analysant la campagne de mesures menée au sein du bâtiment, une information importante a pu en être tirée. En effet, sur une semaine, la ventilation fonctionne à partir du dimanche 16h jusqu'au vendredi 20h en continu.

Il pourrait être intéressant, lors d'un jour ouvrable, de lancer la ventilation le matin vers 7h et de la couper vers 19h lorsque tous les occupants ont déjà quitté le bâtiment afin d'y analyser les économies énergétiques possibles.

8.5.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

En réorganisant l'horaire de ventilation, cela permettrait de faire des économies d'électricité en moyenne de l'ordre de 15%, soit une économie d'approximativement 68500 kWh (voir Figure 43).

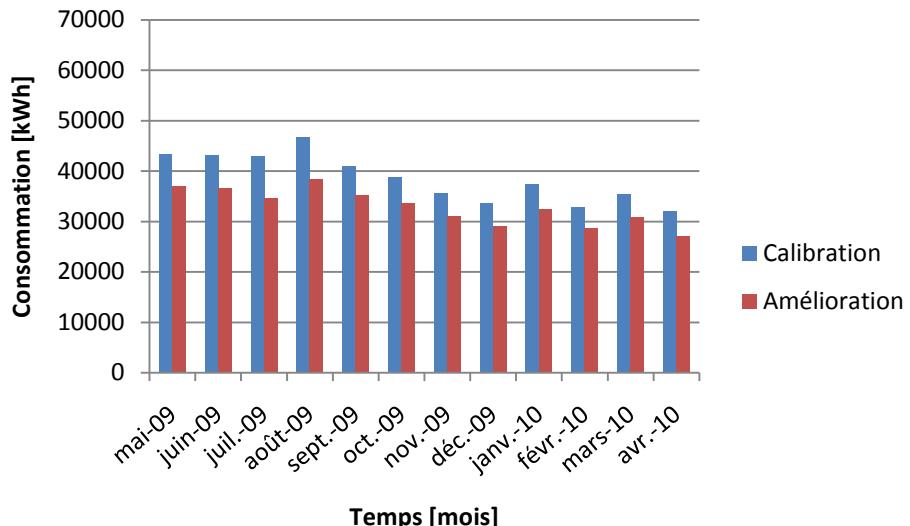


Figure 43 : Impact sur la consommation électrique en utilisant rationnellement la ventilation

Il est à noter qu'il n'est pas possible de déterminer la concentration en CO₂ dans l'air avec SimAudit. Cependant, il a été mesuré¹⁷ que cette concentration en CO₂ dans l'air variait entre 250 et 450 ppm en utilisant l'horaire de ventilation actuellement appliqué dans le bâtiment (NB : un air de bonne qualité tolère une concentration maximale de 1 000 ppm). Par conséquent, il y a encore une certaine marge avant d'atteindre 1000 ppm et on peut penser, qu'en réorganisant cet horaire, la tolérance limite sera respectée.

8.5.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Comme pour la consommation électrique, celle de gaz naturel peut être réduite en utilisant à bon escient la ventilation et en ne ventilant pas en continu. Cette diminution d'énergie est impressionnante (voir Figure 44).

¹⁷ La mesure de la concentration en CO₂ sur une courte période est reprise dans la section « 11.11. Annexe K »

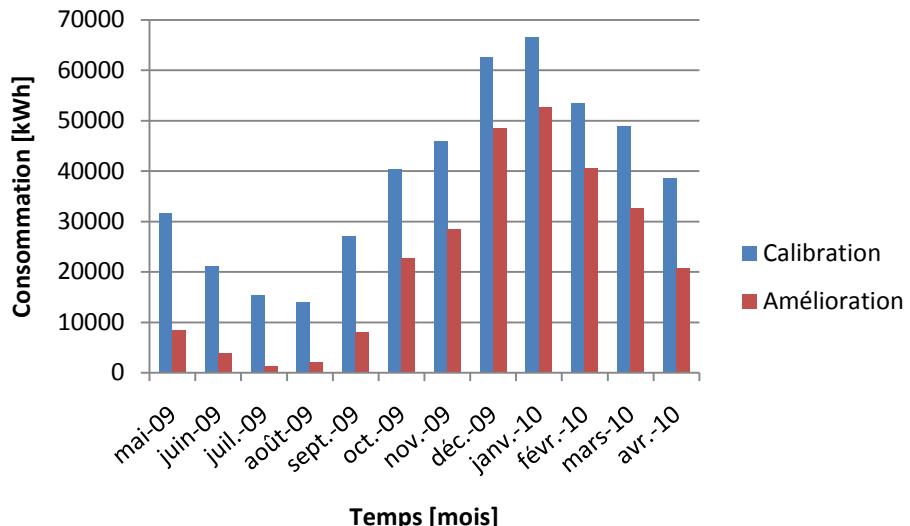


Figure 44 : Impact sur la consommation de gaz naturel en utilisant rationnellement la ventilation

En effet, plus de 52% d'économies peuvent être réalisées en moyenne, avec des réductions de plus de 85% en été. Il apparait donc très avantageux de réguler au mieux la ventilation et de définir un horaire adéquat au vu de ces économies. En moyenne, cela représente une économie d'approximativement 196000 kWh ou encore 19600 m³ de gaz naturel.

8.6. CAS 5 : REMplacement DU CHILLER PAR UN CHILLER PLUS PERFORMANT

8.6.1. INTRODUCTION

L'une des modifications les plus fondamentales à réaliser concerne le chiller. En effet, il a été mentionné plusieurs fois dans ce travail que le chiller avait un très mauvais rendement et qu'il consommait énormément d'électricité. Il serait donc approprié de penser à le remplacer par un chiller plus performant et moins gourmand en énergie.

Pour ce faire, un chiller avec un coefficient de performance de 2,9¹⁸ sera utilisé afin de voir quelles économies d'énergie électrique il est possible d'effectuer.

¹⁸ Voir « 11.5. Annexe E » afin de voir comment le coefficient de performance a été défini.

8.6.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

L'impact d'un chiller plus performant sur la consommation électrique (voir Figure 45) reste faible par rapport au modèle calibré.

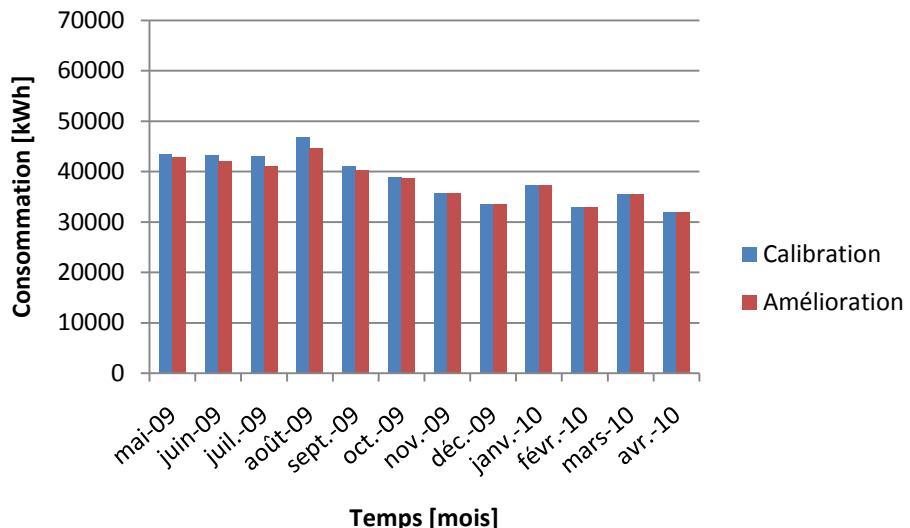


Figure 45 : Impact sur la consommation électrique avec l'utilisation d'un chiller plus performant

En effet, l'EER du chiller pour la calibration a été choisi égal à 2 alors que celui pour le chiller performant fut pris à 2,95, cela n'a permis de ne gagner, en moyenne, que 1,3% sur la consommation d'électricité, soit une économie d'approximativement 6800 kWh.

Il est également à noter que la consommation électrique peut être réduite de maximum 5% en été et ne peut être réduite en hiver étant donné la très faible demande de froid.

8.6.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Puisque le chiller est alimenté en électricité, il ne permet dès lors pas de réduire d'une once la consommation de gaz naturel.

8.7. CAS 6 : VARIATION DE LA TEMPÉRATURE DE PULSION

8.7.1. INTRODUCTION

Tout comme la modification de l'horaire de ventilation, la variation de la température de pulsion de l'air avant de passer dans les batteries de réchauffe n'implique pas aucunes modifications importantes ni n'entraîne des coûts supplémentaires comparé au remplacement des fenêtres par exemple.

Il pourrait donc être très intéressant de voir si ces modifications peuvent avoir un impact sur la consommation énergétique. Pour ce faire, les températures de pulsion seront augmentées de 2°C (voir Figure 46).

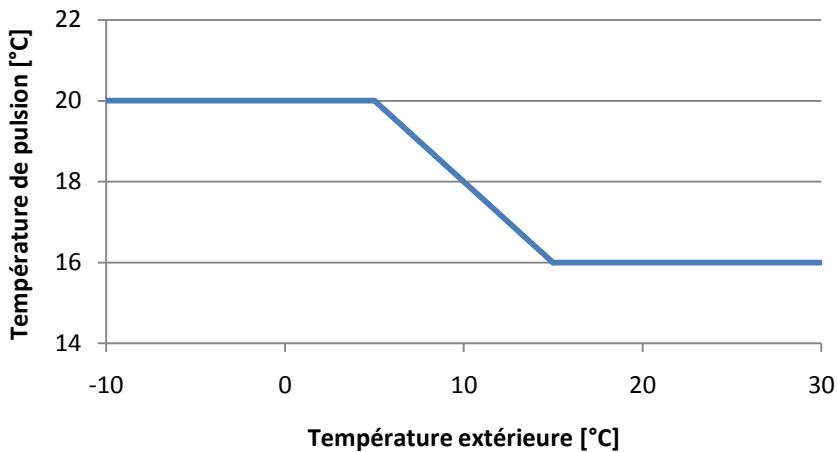


Figure 46 : Modification de la température de pulsion de l'air avant passage dans les batteries de réchauffe

En effet, lorsque la température extérieure est inférieure à 5°C, la température de pulsion sera égale à 20°C (contre 18°C lors de la calibration) et lorsque la température extérieure sera supérieure à 15°C, la température de pulsion sera égale à 16°C (contre 14°C lors de la calibration). Entre les deux états, la loi est toujours de type linéaire.

8.7.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

La modification de la température de pulsion de l'air n'a aucun impact sur la consommation électrique (voir Figure 47). Il n'est donc pas possible de faire des économies d'électricité en changeant ce paramètre.

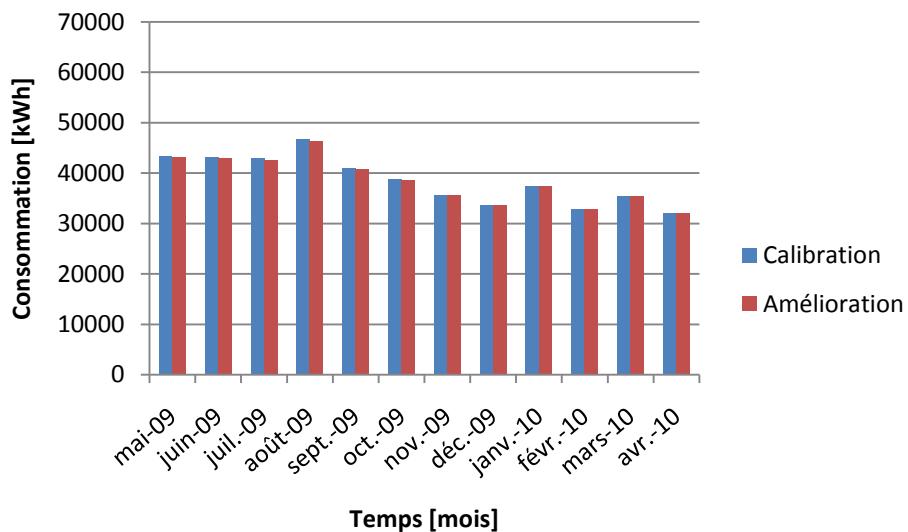


Figure 47 : Impact sur la consommation électrique en modifiant la température de pulsion de l'air

Il est à noter que le confort des occupants en été est respecté puisque les températures ambiantes définies précédemment sont assez bien respectées.

8.7.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Si aucune économie n'a pu être réalisée sur l'électricité, il n'en est pas de même avec le gaz naturel. Comme représenté sur la Figure 48, des gains d'énergie peuvent être effectués uniquement en été et peuvent atteindre 20% en juillet et 12% en août. Contrairement à ces mois d'été, la consommation de gaz naturel augmente légèrement en hiver de l'ordre de 1%. En moyenne, près de 5% de gains peuvent être réalisés sur l'année.

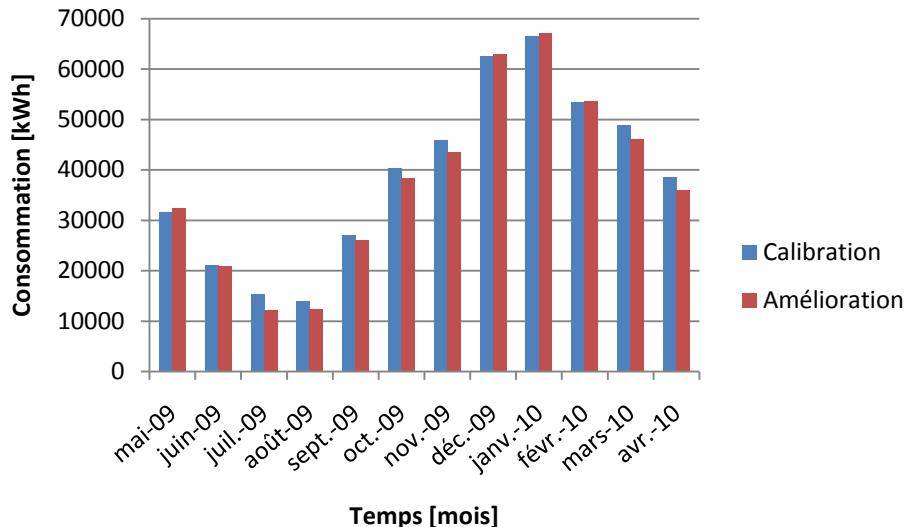


Figure 48 : Impact sur la consommation de gaz naturel en modifiant la température de pulsion de l'air

Cela permet donc de réaliser une économie d'approximativement 13900 kWh ou encore 1390 m³ de gaz naturel.

8.8. CAS 7 : UTILISATION DE LAMPES À BASSES CONSOMMATIONS ET À HAUT RENDEMENT

8.8.1. INTRODUCTION

Grâce à la campagne de mesures, il a été possible de déterminer une puissance d'éclairage et d'appareils électriques par unité de surface en fonction de la consommation électrique d'un étage. Cependant, ne connaissant pas la répartition de la consommation électrique entre l'éclairage et les appareils électriques, l'hypothèse de considérer que la moitié de celle-ci correspondait à la consommation en éclairage et que l'autre moitié provenait de l'appareillage électrique avait donc été formulée précédemment.

En utilisant des lampes à basses consommations et des tubes fluorescents haut rendement respectivement en remplacement des lampes à incandescence et des tubes fluorescents classiques, il est donc possible de réduire de 30% la consommation électrique due à l'éclairage.

8.8.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

L'utilisation de lampes à basse consommation permet de réduire la consommation électrique de l'ordre de 10% en moyenne sur les 12 mois (voir Figure 49).

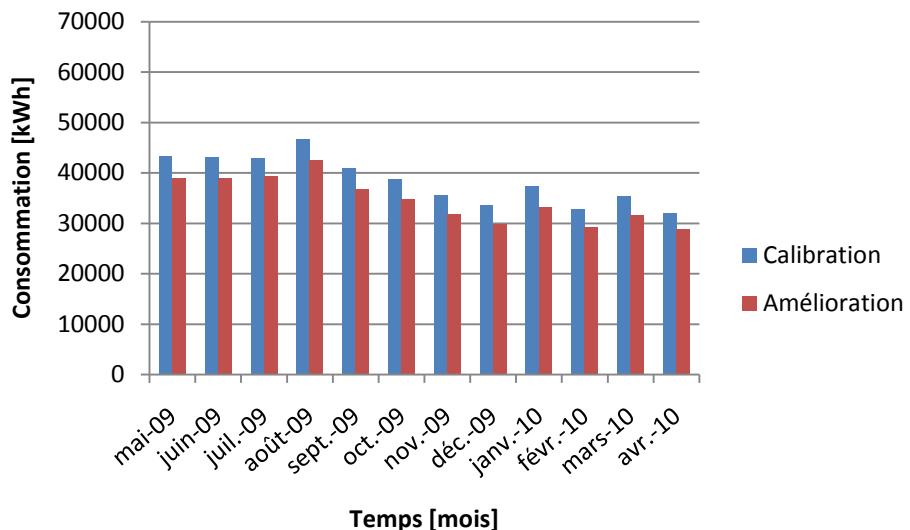


Figure 49 : Impact sur la consommation électrique en utilisant des lampes à basse consommation

Cela permet donc de réaliser une économie d'approximativement 47000 kWh.

8.8.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

En revanche, la consommation de gaz naturel est en hausse de l'ordre de 12% en moyenne (voir Figure 50).

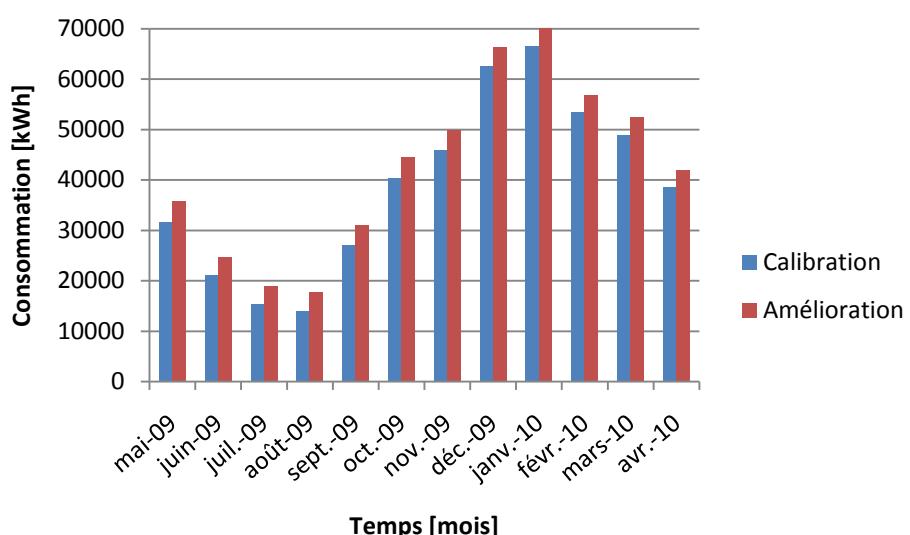


Figure 50 : Impact sur la consommation de gaz naturel en utilisant des lampes à basse consommation

Cela permet donc de réaliser une dépense d'énergie supplémentaire d'approximativement 45000 kWh soit 4500 m³ de gaz naturel.

8.8.4. ÉQUILIBRE DES COÛTS

Puisque la consommation électrique diminue (et donc également la puissance par surface due à l'éclairage), les gains internes diminuent et pour garder une température de consigne à l'intérieur du bâtiment, il est nécessaire de chauffer plus. Il peut s'avérer intéressant de voir si les gains en électricité peuvent contrebalancer les pertes en gaz naturel en terme de coût.

Disposant du prix moyen du kWh d'électricité et du m³ de gaz naturel qui vaut respectivement 0,1271 €/kWh et 0,41548 €/m³, il est donc possible de voir si cette opération est rentable économiquement.

Les économies en électricité s'élèvent à :

$$47000 \text{ [kWh]} \cdot 0,1271 \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \cong 5980\text{€}$$

Les pertes dues à la consommation supplémentaire de gaz naturel valent :

$$4500 \text{ [m}^3\text{]} \cdot 0,41548 \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] \cong 1870\text{€}$$

La différence entre gains et pertes vaut donc :

$$5980\text{€} - 1870\text{€} = 4110\text{€}$$

Il semble donc être très intéressant et avantageux d'opter pour des lampes à basse consommation puisque la différence gains/pertes est assez élevée à condition de connaître le coût de remplacement de ces lampes (matériel et main d'œuvre).

8.9. CAS 8 : MODIFICATION DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE LORSQUE LE BÂTIMENT EST INOCCUPÉ POUR LA PRODUCTION DE CHAUD

8.9.1. INTRODUCTION

Pour la production de chaleur, lorsque le bâtiment est inoccupé, la température intérieure ambiante est de 19°C. Cela signifie que, même la nuit, le bâtiment est chauffé en continu. Par conséquent, il serait bon d'analyser l'impact d'une réduction de cette température de 4°C pour obtenir une température ambiante de 15°C.

8.9.2. IMPACT SUR LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

La modification de la température intérieure ambiante n'a aucun impact sur la consommation électrique (voir Figure 51).

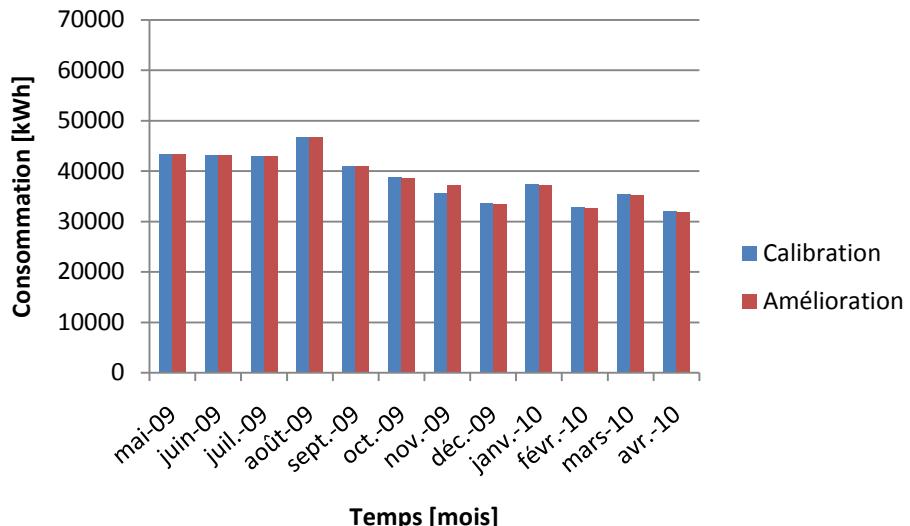


Figure 51 : Impact sur la consommation électrique en modifiant la température intérieure ambiante

Il n'est donc pas possible de faire des économies d'électricité en changeant ce paramètre.

8.9.3. IMPACT SUR LA CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Puisqu'il s'agit de modifier la température intérieure ambiante pour la production de chaud, il est possible de faire certains gains énergétiques surtout en hiver. Ceux-ci sont de l'ordre de 3% en moyenne sur toute l'année et de 6% sur les mois d'hiver.

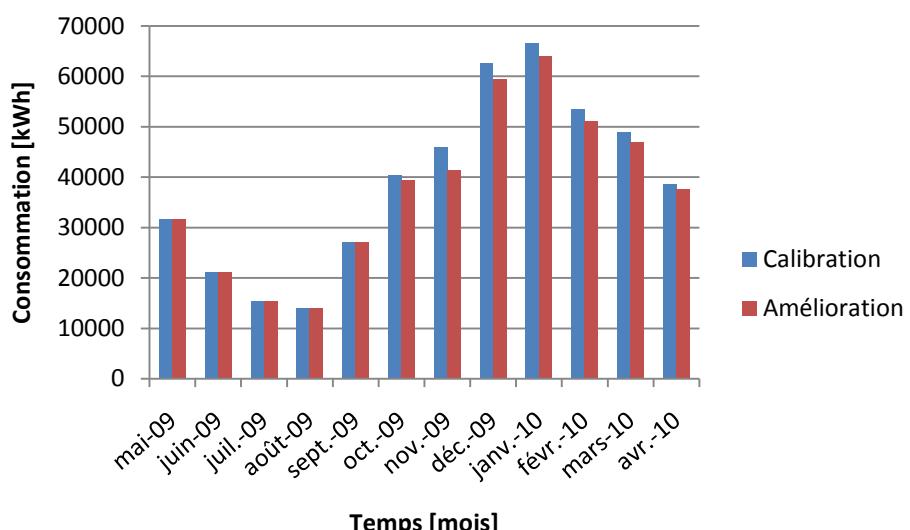


Figure 52 : Impact sur la consommation de gaz naturel en modifiant la température intérieure ambiante

Cela permet donc de réaliser une économie d'approximativement 16800 kWh ou encore 1680 m³ de gaz naturel.

8.10. CONCLUSION

8.10.1. CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES

Le Tableau 21 reprend les différents gains possibles sur la consommation énergétique (électricité et gaz naturel).

Tableau 21 : Récapitulation des différents gains énergétiques moyens possibles en fonction des améliorations/rénovations

Améliorations/Rénovations	Gains sur la consommation ¹⁹	
	Électrique	De gaz naturel
Utilisation de vitrages et de châssis de fenêtre performants	≈ 0%	≈ 17%
Remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation	≈ 0%	≈ 20%
Nouveaux murs opaques avec un coefficient de transmission thermique de 0,4 W/m ² K	≈ 0%	≈ 13%
Utilisation rationnelle de la ventilation	≈ 15%	≈ 52%
Remplacement du chiller par un autre plus performant	≈ 1,3%	0%
Variation de la température de pulsion	≈ 0%	≈ 5%
Utilisation de lampes à basses consommations et à haut rendement	≈ 10%	≈ -12%
Modification de la température ambiante lorsque le bâtiment est inoccupé	≈ 0%	≈ 3%

Les différentes améliorations sont reprises dans le tableau ci-dessus. Des modifications n'entrant aucun coût supplémentaire, comme une utilisation rationnelle de la ventilation, permettent de faire de grosses économies d'énergies. En effet, près de 15% et 53%

¹⁹ Les intervalles d'économies d'énergies sont repris dans la section « 11.12. Annexe L ».

respectivement d'électricité et de gaz naturel peuvent être économisés par rapport à la situation « réelle » en modifiant simplement l'horaire de ventilation.

Par contre, d'autres améliorations, comme le remplacement des fenêtres ou chaudières actuelles, entraînent des coûts importants et ne seront rentables qu'après un certain nombre d'années.

Enfin, l'utilisation d'éclairage à basse consommation permet de faire des économies électriques mais demande une plus grande consommation de gaz naturel. Il a, cependant, été montré que cet investissement était intéressant puisque la différence gains/pertes était assez importantes sur une année.

8.10.2. ÉMISSIONS CO₂

Disposant des consommations énergétiques totales annuelles fournies par la calibration et les cas de rénovation, les gains en émissions de CO₂ peuvent être aisément déterminés et mis en évidence (voir Tableau 22).

Tableau 22 : Gains en émissions de CO2 pouvant être envisagés

Améliorations/Rénovations	Emissions totales en CO2 [tonnesCO2]		Gains en émissions de CO2 [tonnesCO2]
	Calibration	Rénovation	
Utilisation de vitrages et de châssis de fenêtre performants	232	213	19 (8,23%)
Remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation	232	210	21 (9,11%)
Nouveaux murs opaques avec un coefficient de transmission thermique de 0,4 W/m ² K	232	217	15 (6,47%)
Utilisation rationnelle de la ventilation	232	168	64 (27,45%)
Remplacement du chiller par un autre plus performant	232	230	2 (0,79%)
Variation de la température de pulsion	232	228	4 (1,61%)
Utilisation de lampes à basses consommations et à haut rendement	232	229	2 (0,95%)
Modification de la température ambiante lorsque le bâtiment est inoccupé	232	228	4 (1,59%)

Il en ressort que, de ce Tableau 22, que des gains importants en émissions de CO2 peuvent être réalisés afin d'être plus écologique et de bénéficier de possibles certificats « verts ».

Par exemple, une utilisation rationnelle de la ventilation permet de réduire les émissions de CO2 de près de 30% en passant de 232 tonnesCO2 à 168 tonnesCO2. De même, l'utilisation de chaudières à condensation ou de fenêtres plus performantes permet de réduire de près de 10% les émissions CO2.

À l'inverse, une modification de la température ambiante ou une variation de la température de pulsion ne permet pas de faire des grosses économies d'émissions de CO2.

9. CONCLUSIONS

Un audit énergétique n'est pas une tâche facile à réaliser. Pour mener à bien une telle opération, il est nécessaire de connaître le mieux possible le bâtiment à auditer et de commencer par effectuer une description complète et précise du bâtiment et de son système HVAC.

La calibration du modèle, étape la plus importante afin d'envisager des cas de rénovation, s'avère comme étant assez fastidieuse. Il faut obtenir un modèle collant le plus possible à la réalité et donc cette étape peut prendre énormément de temps puisque la calibration ne s'obtient pas au premier essai mais en effectuant un certain nombre de simulations.

La calibration obtenue est de bonne qualité, les tolérances d'erreurs fixées sont respectées, exceptée pour une. En effet, tous les paramètres ne sont pas connus avec exactitude, comme le coefficient de performance du chiller. Ce coefficient n'est pas connu et il serait intéressant d'effectuer des tests *in situ* pour essayer d'approcher au maximum la valeur de ce paramètre. En déterminant ce coefficient avec une bonne précision, il y a de grandes chances que le modèle obtenu serait de très bonne qualité puisque les tolérances d'erreurs seraient bien respectées. Toutefois, la campagne de mesures menée par l'Université de Liège dans le bâtiment fut très utile et enrichissante. Cela a permis de connaître les différentes consommations électriques heure par heure et donc de réaliser une calibration très précise à ce niveau-là.

Une fois la calibration validée, différents cas de rénovation ont été étudiés et ont permis de mettre en évidence les possibles économies d'énergies qui peuvent être réalisées. Dans certains cas, comme pour le remplacement des fenêtres actuelles par des fenêtres plus performantes du point de vue énergétique ou dans le cas du remplacement des chaudières actuelles par des chaudières à condensation, un retour sur investissement a été évalué. Cependant, il reste du ressort de l'Occupant 2 de voir s'il est préférable d'effectuer ces remplacements ou de ne pas remplacer les divers éléments considérés et laisser les choses dans l'état actuel afin de réaliser des économies d'argent (c'est-à-dire ne pas investir).

Par contre, une future calibration pourrait être réalisée en connaissant plus précisément les paramètres indéterminés pour lesquels une hypothèse a dû être formulée ou une variation des valeurs de ces paramètres a été effectuée afin d'analyser leur impact sur les consommations énergétiques. Il serait donc intéressant d'effectuer, tout comme pour le coefficient de performance du chiller, des analyses *in situ*. Cela améliorerait très certainement la calibration puisqu'un temps important a été dépensé dans l'approche divers paramètres le plus possible avec ce qui existe réellement dans le bâtiment.

Il serait également très intéressant d'avoir toutes les informations utiles sur les propriétés du bâtiment comme la composition des parois ou encore des fenêtres. Ces propriétés ont été déterminées par des visites effectuées en essayant d'être le plus réaliste possible. Cela pourrait

donc induire des erreurs d'incertitude sur les résultats. C'est pourquoi une analyse complète du bâtiment et de son système HVAC doit être réalisée avec une grande précision.

Une simulation pour chaque étage donnerait des valeurs de consommations électrique et de gaz naturel plus précises puisqu'il y a deux « vérandas » au dernier étage. L'hypothèse formulée dans ce travail était d'effectuer la modélisation et la simulation sur un étage et multiplier les consommations énergétiques par 4 afin d'avoir la consommation énergétique totale du bâtiment. En effet, le temps nécessaire pour effectuer une simulation de chaque étage serait relativement long.

Enfin, il s'avérerait également intéressant d'effectuer une analyse avec le nouveau logiciel PEB agréé par la Région Wallonne mis en ligne le 1^{er} mai 2010 et ainsi pouvoir mettre en relation les résultats obtenus par cette méthode avec ceux de SimAudit.

Ces différentes suggestions pourraient peut-être faire l'objet d'un prochain travail de fin d'études.

10. BIBLIOGRAPHIE

- André P. 2007. *Projet HARMONAC, inspection et audits de systèmes de conditionnement d'air dans les bâtiments tertiaires*. Université de Liège, Belgique.
http://reflexions.ulg.ac.be/cms/c_16473/projet-harmonac-inspection-et-audits-de-systemes-de-conditionnement-d-air-dans-les-batiments-tertiaires.
- André P. 2010. *Cours n°7 : Installations de chauffage*. Notes du cours de Climatisation : cours ARCH-2015. Université de Liège, Belgique.
- André P. & Franck P.-Y. 2009. *Belgian Case Study CS06: Status in June 2009*. HarmonAC meeting, Porto. Université de Liège, Belgique.
- ASHRAE. 2002. *ASHRAE Guideline: Measurement of energy and demand savings*. ASHRAE Guideline 14-2002.
- ASHRAE. 2009. *Chapter 18: Non residential cooling and heating load calculations*. ASHRAE. 62p.
- Aparecida Silva C., Bertagnolio S., Hannay J. & Franck PY. 2008. *Example of audit of an air conditioning system, CASE06 Belgium*. Université de Liège, Belgique.
- Bertagnolio S., Lebrun J. & André P. 2009. *Développement et utilisation de modèles de simulation pour l'audit et la rénovation de bâtiments conditionnés*. Université de Liège, Belgique. CIFQ2009 / ART-41-xx, VIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, Lille.
http://www.harmonac.info/fileadmin/downloads/papers/HARMONAC_CIFQ2009paper_SB090217.pdf. 7p.
- Bertagnolio S. & Stabat P. 2009. *Analysis of heating and cooling demands and equipment performances*. In: Annex 48 of the International Energy Agency: Energy conservation in buildings and Community Systems Programme, Review of heat recovery and heat pumping solutions.
- Brull C. 2009. *Analyse du paquet « énergie-climat » de l'Union européenne et de ses répercussions en Europe, en Belgique et en Région Wallonne*. Brüll C. – Directeur du cluster TWEED, à titre personnel. 83p.
- CSTB. 2004. *Trnsys : simulation dynamique*. CSTB.
http://software.cstb.fr/soft/present.asp?page_id=fr!Trnsys.
- Dulieu F. 2010. *4^e étage*. Igretac, Charleroi.
- Énergie Plus. 2010. *Conductivité thermique des matériaux homogènes et résistance thermique des matériaux non homogènes ou des lames d'air*. Énergie +. http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_10453.htm#04.

Essenscia. 2008. *La forte augmentation des prix de l'énergie sape la compétitivité de l'industrie*. Essenscia.

<http://www.essenscia.be/FR/Communiqu%C3%A9s/page.aspx/1140?xid=2133>.

Europa. 2007. *Efficacité énergétique : performance énergétique des bâtiments*. Europa. http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/l27042_fr.htm.

FEBE. 2010. *Leçon 8 – Façades en béton architectonique*. Modèle de cours béton préfabriqué, Bruxelles, Belgique. <http://www.febe.be/uploads/0/default/140.pdf>. 18p.

Harmonac. 2010. *Introduction*. Harmonac. <http://www.harmonac.info/index.php?id=284>.

ICEDD. 2007. Bilan énergétique de la Région Wallonne 2005: Consommations spécifiques du secteur tertiaire. Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable, Namur, Belgique.

Lebrun J. 2010. *Audit énergétique des installations de conditionnement d'air*. Université de Liège. http://reflexions.ulg.ac.be/cms/c_16800/audit-energetique-des-installations-de-conditionnement-dair?portal=j_55&printView=true.

Organisation de Coopération et de Développement Economiques. 1999. *Contre le changement climatique : bilan et perspectives du Protocole de Kyoto*. Organisation de Coopération et de Développement Economiques. 155p.

Organisation de Coopération et de Développement Economiques. 2010. *Ratification de la Convention relative à l'OCDE*. Organisation de Coopération et de Développement Economiques. http://www.oecd.org/document/1/0,3343,fr_2649_201185_1889409_1_1_1,00.html.

Province de Liège. 2009. *Formation continue : Performance Energétique des Bâtiments - Nouvelles constructions et rénovations*. Province de Liège, Belgique. <http://www2.prov-liege.be/eplsup/spip.php?article725>.

Région Wallonne. 2006. *Pour y voir clair et faire les bons choix*. Région Wallonne, Belgique. <http://energie.wallonie.be/fr/pae-procedure-d-avis-energetique.html?IDC=6235>.

Région Wallonne. 2009. *L'Europe se mobilise pour une approche globale plus responsable et plus intelligente des bâtiments en matière d'énergie*. Région Wallonne, Belgique. <http://energie.wallonie.be/fr/la-directive-europeenne.html?IDC=6231>.

Surveillance de l'environnement. 2010. *Harmonac*. Université de Liège. http://www.dsge-arlone.ulg.ac.be/ulg_surveillance/index.php?option=com_content&task=view&id=48&Itemid=49.

11. ANNEXES

11.1. ANNEXE A

Afin de justifier la loi de température des chaudières, des capteurs ont été installés dans le but de relever la température de l'eau en sortie de chaudière en fonction de la température extérieure et ont permis de la représenter graphiquement sur une période allant de décembre 2007 et février 2008 (voir Figure 53).

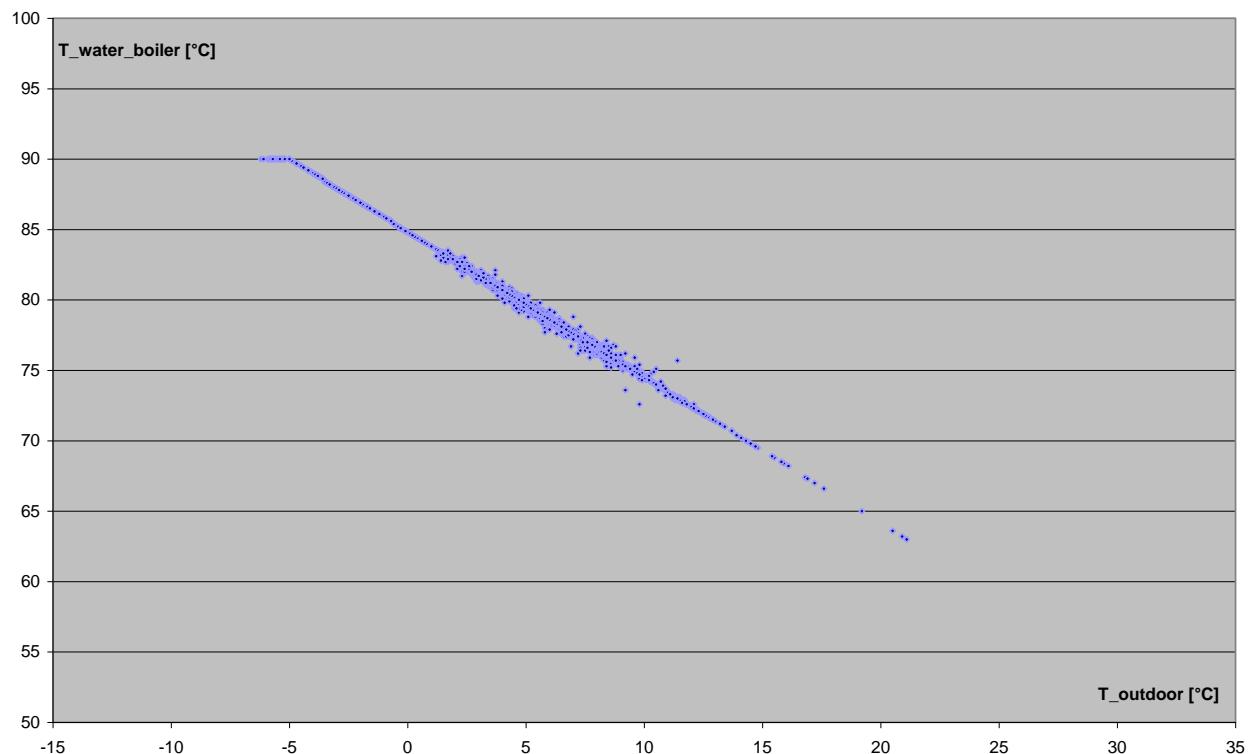


Figure 53 : Justification de la loi de température pour l'eau chaude (Aparecida Silva et al., 2008)

11.2. ANNEXE B

Les valeurs des consommations électriques mensuelles mesurée et simulée sont reprises dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Consommations électriques mesurée et simulée

Mois	Mesures [kWh]	SimAudit [kWh]	Erreur [%]
Mai 09	56476	43352	-23,23
Juin 09	63693	43137	-32,27
Juillet 09	64088	42994	-32,91
Août	67712	46924	-30,7
Septembre 09	55980	41016	-26,73
Octobre 09	44228	38800	-12,27
Novembre 09	35956	35623	-0,92
Décembre 09	33252	33554	0,9
Janvier 10	38014	37307	1,86
Février 10	33190	32870	0,96
Mars 10	39382	35447	-9,97
Avril 10	38246	32003	-16,32

11.3. ANNEXE C

Les valeurs des consommations de gaz naturel mensuelles mesurée et simulée sont reprises dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Consommations de gaz naturel mesurée et simulée

Mois	Mesures [kWh]	SimAudit [kWh]	Erreur [%]
Mai 09	32995,73	21660	-4,04
Juin 09	26541,94	21184	-20,18
Juillet 09	16229,72	15276	-5,87
Août	13998,08	15400	-10,02
Septembre 09	35735,13	27096	-24,17
Octobre 09	40676,32	40300	0,92
Novembre 09	46346,25	45920	0,91
Décembre 09	58616,24	62584	6,77
Janvier 10	61450,04	66504	8,23
Février 10	53550,18	53120	11,10
Mars 10	49369,62	48936	-0,88
Avril 10	35371,92	38552	8,99

11.4. ANNEXE D

11.4.1. INTRODUCTION

La thermographie infrarouge d'une partie du bâtiment, c'est-à-dire les étages considérés lors de ce travail, permettra d'avoir une idée de la performance énergétique de l'enveloppe de ce bâtiment. Cela permettra de voir si les parois opaques induisent des déperditions thermiques et de mettre en évidence les éventuels points faibles de ces murs. En d'autres mots, il s'agit d'un contrôle non destructif permettant de visualiser la répartition des déperditions thermiques sur l'enveloppe du bâtiment.

La thermographie du bâtiment a été réalisée le mercredi 31 mars 2010 à 6h du matin lorsque la température extérieur fut de -5°C. En procédant de la sorte, la présence d'un corps chaud dans l'environnement, qui pourrait émettre un flux réfléchi par l'enveloppe du bâtiment et dont la caméra capterait ce flux, est presque réduite à néant.

11.4.2. MATÉRIEL UTILISÉ

La caméra utilisée (voir Figure 54) pour réaliser la thermographie est une caméra Flir ThermaCAM PM 695 mise à disposition par la société Infravision sprl.



Figure 54 : Caméra Flir ThermaCAM PM 695 utilisée pour la thermographie

Il s'agit de la première caméra infrarouge fournissant à la fois une image thermique et une image visible. Cette caméra possède une précision de +/- 2% et une gamme de mesures de -40°C à +1500°C.

11.4.3. EXTÉRIEUR

Les deux thermogrammes (voir Figure 55 et Figure 56) montrent une homogénéité de la température des murs extérieurs. Certaines zones apparaissant plus chaudes ou plus froides (i.e. fenêtres et châssis) ne doivent pas être prises en compte car c'est le résultat de réflexion d'autres émissions lumineuses ainsi que l'angle de prise de vue.

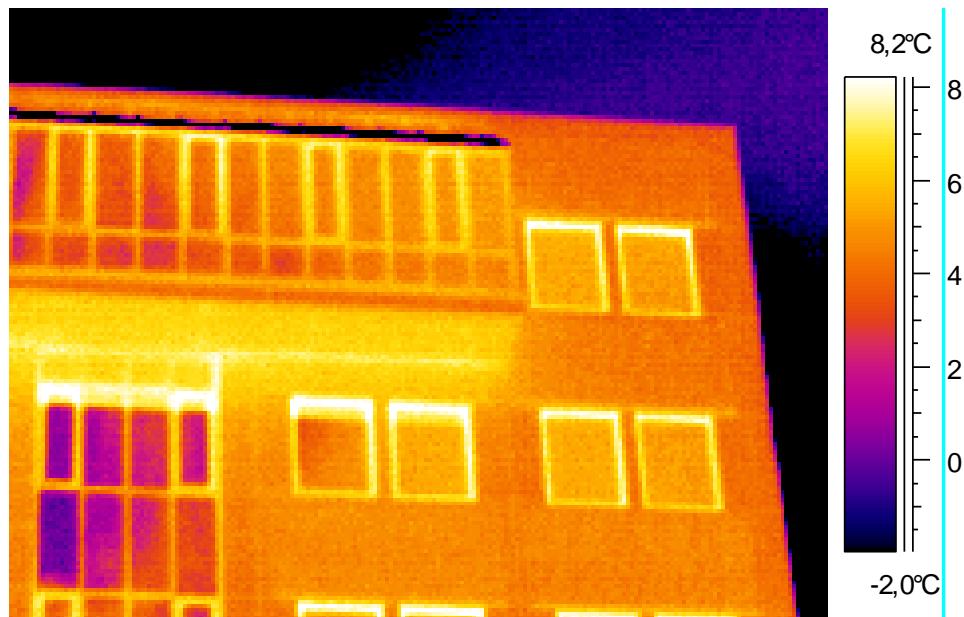


Figure 55 : Thermogramme d'une partie des étages 6 et 7 de la façade sud-ouest

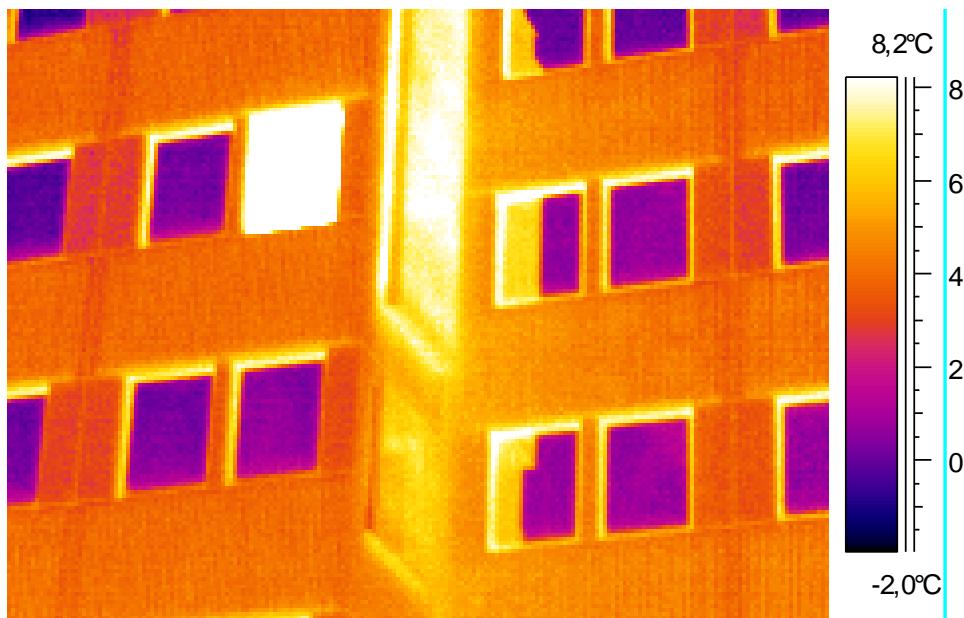


Figure 56 : Thermogramme d'une partie des étages 4 et 5 de la façade nord-ouest

11.4.4. INTÉRIEUR

La Figure 57 montre le thermogramme obtenu en analysant un mur et une fenêtre intérieurs. Cela permet de déduire que, comme pour les murs extérieurs, la température est bien homogène pour le mur considéré.

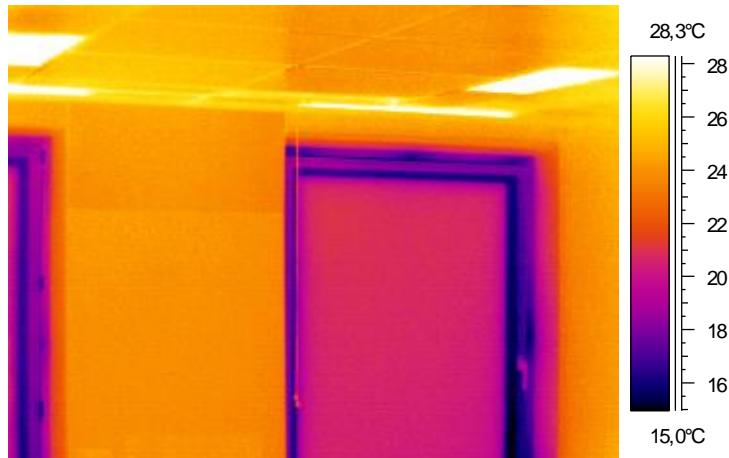


Figure 57 : Thermogramme d'un mur et d'une fenêtre intérieurs de l'étage 4

Les châssis de fenêtre ont, quant à eux, une température beaucoup plus froide que le mur voisin. Ceci confirme que, comme dans la plupart des constructions, les châssis de fenêtre induisent des déperditions via les joints. Il y a donc un transfert de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur par ces endroits.

11.5. ANNEXE E

La Figure 58 reprend les coefficients EER des chillers en fonction de leur puissance.

Étant donné que la puissance du chiller en place dans le bâtiment est comprise entre 200 et 300 kW, le coefficient de performance de ce chiller sera pris égal à la borne inférieure de cette gamme de chillers, c'est-à-dire à approximativement 2.

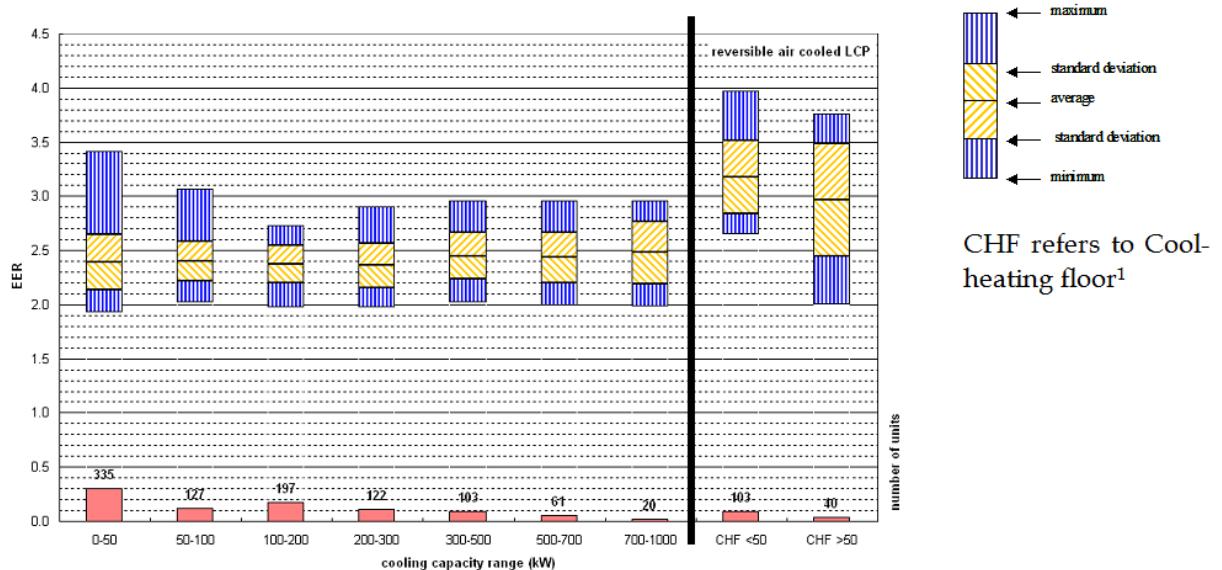


Figure 58 : Coefficients EER pour les condenseurs à air en fonction de la puissance du chiller (Bertagnolio & Stabat, 2009)

Pour voir l'effet d'un chiller plus performant sur la consommation énergétique, il a fallu déterminer son coefficient EER. Le coefficient de performance choisi est donc la borne supérieure de la gamme de chillers énoncée ci-dessus, soit un coefficient égal à 2,9.

11.6. ANNEXE F

Les paramètres principaux utilisés lors de la calibration sont repris dans le Tableau 25.

Tableau 25 : Paramètres principaux utilisés lors de la calibration

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de zones	5	[-]
Coefficient de gain de chaleur solaire « SHGC »	0,5	[-]
Hauteur du plafond	3	mètre
Type de système de ventilation	CAV	[-]
Type de combustible	Gaz Nat.	[-]
Rendement des chaudières	0,86	[-]
Facteur de majoration des chaudières	1,15	[-]
Facteur de majoration des chillers	1,15	[-]
Coefficient de performance du chiller	2	[-]
Taux de ventilation maximal	3	Vol/h
Taux de ventilation minimal	1 à 3	Vol/h
Humidité relative minimale	45	%
Humidité relative maximale	60	%

11.7. ANNEXE G

Il peut être très intéressant de fournir les consommations énergétiques par mètre carré. Cela fournirait des données des références aux futurs auditeurs.

11.7.1. CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Les consommations électriques par mètre carré sur 12 mois sont reprises à la Figure 59.

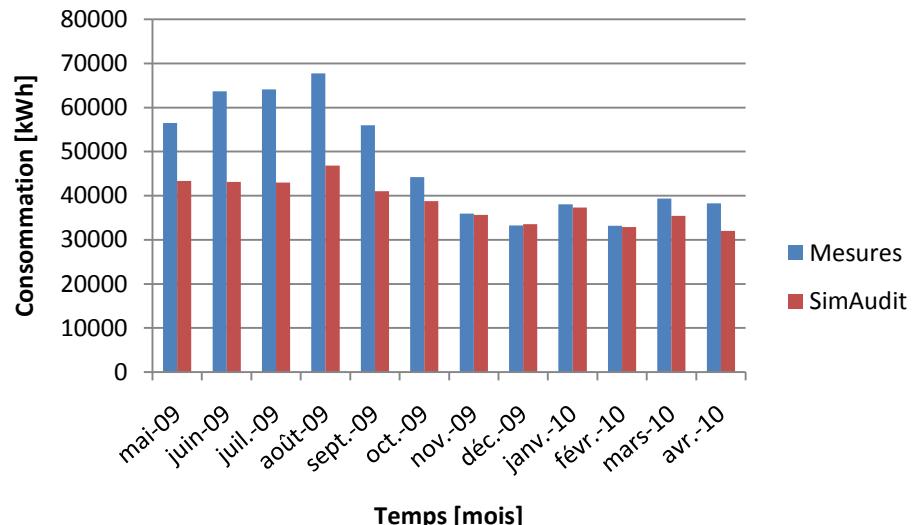


Figure 59 : Consommations électriques par mètre carré sur les 12 mois considérés

Les moyennes de ces consommations mesurée et calculée valent respectivement 76 kWh/m² et 62 kWh/m².

Pour des bâtiments publics regroupant des établissements de la branche « Administration publiques et internationales », la consommation électrique moyenne de 121 établissements de 170 à 30 000 m² était de 54 kWh/m² avec un écart-type de 49 kWh/m² en 2005²⁰. Dès lors, les consommations moyennes mesurée et calculée sont bien comprises dans l'intervalle de variation (celui-ci comprend les valeurs entre [5 kWh/m² ; 103 kWh/m²]) de la consommation moyenne des établissements échantillonnés.

²⁰ Les valeurs des consommations énergétiques mesurée et calculée pour ont été comparées à l'année 2005 puisqu'il n'y a pas de document plus récent fourni par l'ICEDD (2005).

11.7.2. CONSOMMATION DE GAZ NATUREL

Les consommations électriques par mètre carré sur 12 mois sont reprises à la Figure 60.

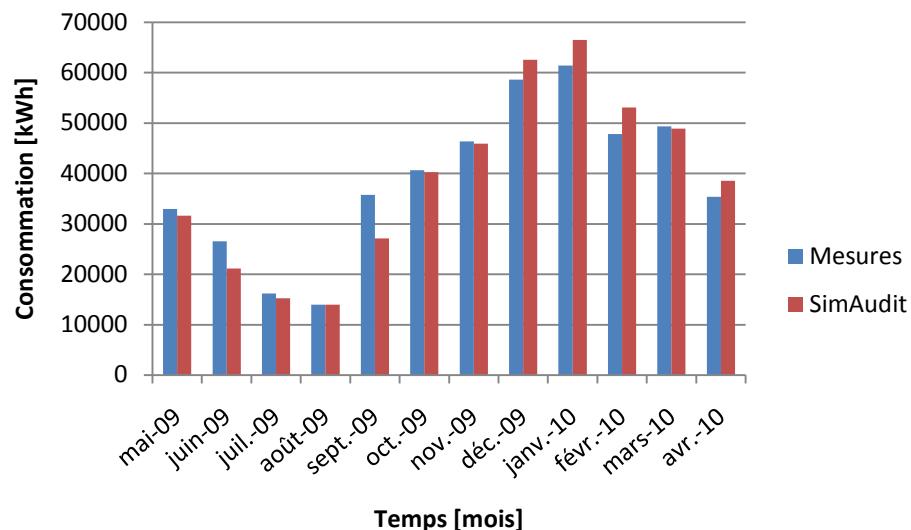


Figure 60 : Consommations de gaz naturel par mètre carré sur les 12 mois considérés

Les moyennes de ces consommations mesurée et calculée valent toutes deux 62 kWh/m^2 .

Pour des bâtiments publics regroupant des établissements de la branche « Administration publiques et internationales », la consommation électrique moyenne de 121 établissements de 170 à 30 000 m^2 était de 174 kWh/m^2 avec un écart-type de 127 kWh/m^2 en 2005. Dès lors, les consommations moyennes mesurée et calculée sont bien comprises dans l'intervalle de variation (celui-ci comprend les valeurs entre $[45 \text{ kWh/m}^2 ; 301 \text{ kWh/m}^2]$) de la consommation moyenne des établissements échantillonnes.

11.8. ANNEXE H

Après avoir effectué la calibration du modèle, il est possible d'envisager des cas de rénovation. Pour ce faire, ces différents cas ont été choisis dans une liste regroupant des ECOs (« Energy Conservation Opportunities »), c'est-à-dire des possibilités de conservation de l'énergie. Ces ECOs sont reprises dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Différentes ECOs envisagées

Cas de rénovation		ECOs	
Numéro	Intitulé	Code	Intitulé
1	Utilisation de vitrages et de châssis de fenêtre performants	E3.9	Use double or triple glaze replacement
2	Remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation	-	-
3	Nouveaux murs opaques avec un coefficient de transmission thermique de 0,4 W/m ² K	E3.4	Add insulation to exterior wall externally
4	Utilisation rationnelle de la ventilation	O2.2	Shut off A/C ventilation system when not needed
5	Remplacement du chiller par un autre plus performant	P2.6	Replace or upgrade cooling equipment and heat pumps
6	Variation de la température de pulsion	O4.1	Consider modifying the supply air temperature
7	Utilisation de lampes à basses consommations et à haut rendement	E4.6	Replace lighting equipment with low consumption types
8	Modification de la température ambiante lorsque le bâtiment est inoccupé	P1.4	Modify control system in order to adjust internal set point values to external climatic conditions

11.9. ANNEXE I

Cette section reprend le devis fourni par la société Fenetro sprl pour le remplacement des fenêtres actuelles par des fenêtres plus performantes énergétiquement. Le devis est repris dans les pages suivantes.



Fenetro sprl

Chemin du Verdi, 30 A - 1370 Jodoigne
Tél : 0475/46.46.56
Fax : 010/39.02.24

Offre

WM08 wymardata 2008 - 10/05/2010 - 0:41:10

A l'att. de Madame/Monsieur

Fenetro sprl
Chemin du Verdi, 30 A
1370 Jodoigne
Tél : 0475/46.46.56
Fax : 010/39.02.24

BELLIGOI Julien

Offre : 1307 FENETRO WM08 10 05 10

Jodoigne, 10/5/2010

Madame, Monsieur

Nous avons le plaisir de vous faire parvenir par la présente la remise de prix que vous nous avez demandé et pour laquelle nous vous remercions.

Nous nous permettons d'attirer votre attention sur le fait que notre entreprise met à votre disposition un savoir faire et une tradition de qualité qui nous assurent une position de leader dans notre profession.

L'équipe de Fenetro

Détail :

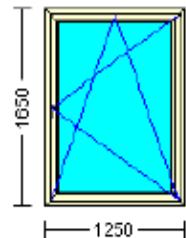
Finition des châssis : BLANC EUROPEAN

Finition standard des finitions châssis du projet : BLANC EUROPEAN

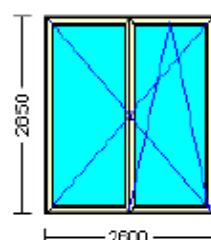
Finition standard des finitions châssis du cadre : BLANC EUROPEAN

Finition standard des finitions châssis de l'ouvrant : BLANC EUROPEAN

Vitrage standard : SUPER PLUS 1,1W (4/15/4)



196x	00001				
	1	OSCILLO-BATTANT (BLANC EUROPEAN)	1250mm	1650mm	407,87
		rejet d'eau normal (BLANC EUROPEAN)			
		SUPER PLUS 1,1W (4/15/4) (--)			100,22
Prix unitaire :			196x	508,09	= 99.585,64



6x	00002				
	1	DOUBLE OUVRANT OSCILLO-BATTANT (BLANC EUROPEAN)	2600mm	2850mm	723,20
		rejet d'eau normal (BLANC EUROPEAN)			
		SUPER PLUS 1,1W (6/14/4) (--)			237,40
		rejet d'eau normal (BLANC EUROPEAN)			
		SUPER PLUS 1,1W (6/14/4) (--)			237,40
Prix unitaire :			6x	1.198,00	= 7.188,00

Supplément (hors TVA) :

	Dépose, pose, finition extérieure P.U	24.240,00
--	---------------------------------------	-----------

Prix :	131.013,64
Remise 45,0% sur 106.773,64 :	-48.048,14
Prix net :	82.965,50
TVA 6,0% :	4.977,93
Prix total TVA incluse :	87.943,43

Conditions de règlement : 40 % à la commande - 40% à la livraison - Solde à la fin du chantier
Délai de livraison : 6 à 8 semaines
Validité de l'offre : 1 mois
Merci de bien vérifier l'offre au niveau des finitions (à consulter sur les dessins) et au niveau des quantités

Le client est censé avoir vu les échantillons de(s) teinte(s), couleur(s) du présent devis.

Important :

Le client a été informé de la nouvelle norme NBN 23-002 ainsi que de son contenu. (Vitrage de sécurité).
Fenetro décline toute responsabilité si le client décide de ne pas suivre la norme en matière de vitrage de sécurité.

Notre travail comprend :

- La fourniture de vos châssis « Fenetro »
- La pose des châssis par nos propres ouvriers qualifiés suivant les normes du bâtiment STS 52.
- L'enlèvement & l'évacuation de vos anciens châssis et des décombres.
- Le réglage des nouveaux châssis.
- La finition extérieure par un joint en silicone de max : 10 mm
- La finition extérieure est réalisée par la pose d'un joint en silicone transparent ou blanc de maximum 10 mm.
- Si l'espacement pour le joint en silicone est supérieur à 10 mm il faudra prévoir un cimentage facturé 30 € Htva par châssis.

Garantie Fenetro:

- Une garantie de dix ans est donnée sur les châssis sans la quincaillerie.

Détails techniques de l'offre :

- Châssis en PVC, de marque Wymar S 3000 5 chambres d'isolation, d'une profondeur de profilé de 70 mm. (Isolation du profilé UF de 0.8 W (m²K) à 1.35 W (m²K) voir variante, Protection contre le vol Classe 2, perméabilité à l'air Classe 4, étanchéité à l'eau 9A, résistance au vent C3-C5, isolation acoustique Rw 46 (-2,-4) dB).
- Double vitrage à haut rendement thermique. Coefficient U=1.0W/m². K .
- Renforts internes en acier galvanisé.
- Quincaillerie de sécurité Roto NT à réglage tri directionnel, verrouillage de sécurité type DIN V ENV 1627-1630 (classe 1 & 2).
- L'agrément technique du profilé Wymar est muni d'une approbation avec certificat ATG émis par l'UBA en ce qui concerne l'étanchéité à l'eau, à l'air, la résistance au vent et au système d'isolation.

EXTRAITS DE NOS CONDITIONS GENERALES DE VENTES

1. Toutes nos factures sont payables en notre domicile, au grand comptant, net sans escompte. Il n'est pas renoncé à ce droit en faisant traite sur le client ou le débiteur. Le paiement de nos factures de menuiseries extérieures nous sera fait par provisions: 40% à la commande, un 2ème acompte de 40% sera réclamé au client avant le déchargement de la marchandise et enfin, le solde de

20% sera payé à la fin du chantier. Seuls les revendeurs professionnels de la société peuvent introduire par écrit, une demande de paiement à 30 jours date de facture. Ceux-ci ne peuvent profiter de cet avantage qu'après accord écrit de la société.

2. La date de livraison et délai sont donnés à titre indicatif et ne peuvent en aucun cas nous être opposés en vue de résiliation de contrat en dommages et intérêts.

3. Le délai prendra cours dès que l'acompte sera perçu sur le compte de la société, si un acompte est demandé, soit dès que la confirmation de commande sera remise signée pour accord au siège de la société. Toutes réclamations ou contestations doivent nous être formulées dans les trois jours de la réception de la marchandise et/ou des travaux et n'excluent pas le paiement.

4. Pour toutes contestations, les Tribunaux de Nivelles sont seuls compétents.

5. Tout retard de paiement dépassant les 15 jours de la date de facture donne droit à l'encaissement de celle-ci et la mise en compte des frais et dépends de l'opération. En aucun cas, les acomptes ou provisions ne seront remboursés; ils constituent le dommage-intérêt résultant de la renonciation. Ces dispositions n'impliquent ni novation, ni dérogation à cette clause attributive de juridiction. En cas de non-paiement à l'échéance fixée à l'article 1, il sera dû, de plein droit par le débiteur, sans aucune mise en demeure, un intérêt de retard calculé au taux de 12% sur la somme due ou restant due et le montant dû est majoré d'une indemnité forfaitaire de 20% au titre de dommage-intérêts avec un minimum de 40€.

6. Les projets et plans soumis au client restent notre propriété et nous seront restitués.

7. Les prix remis pour tous placements et/ou travaux sont établis considérant les emplacements et/ou pièces vides de tout mobilier ou dégagés et d'accès facile, direct et rapide. Dans le cas de rénovation, l'acheteur est conscient qu'il doit subir un excès de poussière due aux démolitions des plafonnages et autres matériaux. C'est pourquoi, si l'acheteur décide de laisser du mobilier dans les pièces, il veillera à éloigner tout mobilier le plus possible du lieu de travail et à le protéger au maximum des poussières.

8. Nos prix sont automatiquement adaptés en cas de hausse de salaires, des charges sociales, des appointements ou des prix de matières.

9. La propriété des marchandises vendues ne passe à l'acheteur qu'après acquittement des sommes totales dont il nous est redevable du chef de cette livraison, y compris les frais éventuels, intérêts et pénalités. L'acheteur ne pourra donc en aucune manière disposer des marchandises qui n'auraient pas encore été intégralement payées, plus particulièrement, il ne pourra en transférer la propriété à des tiers ou les donner en gage.

10. Les volets et les stores extérieurs et intérieurs sont garantis 5 ans, à partir de la date de fabrication, contre tout défaut de matière pour autant que ceux-ci soient dans les conditions normales d'utilisation. La menuiserie en PVC est garantie 10 ans sur les profilés blancs et 10 ans sur les profilés Rénolités, imitation bois et couleur, suivant les lois en vigueur en Belgique. La menuiserie en aluminium est garantie 10 ans suivant les lois en vigueur en Belgique. La menuiserie en bois est garantie 10 ans suivant les lois en vigueur en Belgique Si, durant la période visée, de tels défauts de matières apparaissent, la fourniture éventuelle de pièces nouvelles en remplacement de pièces défectueuses, serait gratuit. Pendant les six premiers mois de garantie, les frais de transport, de main-d'œuvre et d'éventuels autres frais de réparation ne seront

pas à charge du client. En outre, la garantie n'est pas d'application en cas d'influences extérieures (comme celles de produits chimiques, corrosifs, de liquides, de vapeur, de gaz), autres que celles inhérentes à un usage courant sous des conditions normales.

A compléter pour la facturation

NOM :

M.-Mme.....

Adresse de facturation :

N°TVA :

Attestation : applications du taux de la TVA de 6 %

Je soussigné....., atteste que l'immeuble est utilisé soit exclusivement, soit à titre principal comme logement privé durable et que la première date d'occupation de cet immeuble remonte à plus de 5 ans.

Nous restons à votre disposition pour toute information supplémentaire. En vous remerciant de votre confiance, nous vous prions d'agréer, Madame, Monsieur, nos salutations distinguées.

Pour Fenetro sprl,

Accord pour exécution du travail comme décrit aux conditions de vente mentionnées,

Nom : Degeest Laurent

Nom :

Date : 10/5/2010

Date :

Fenetro sprl

Numéro de TVA : BE 0820
967 022

Compte en banque :
001-5989427-44

Joinery Process Planning System - Fenetro sprl

11.10. ANNEXE J

Cette section reprend le devis fourni par la société Viessmann Belgium pour le remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation. Le devis est repris dans les pages suivantes.



Viessmann Hermesstraat 14 1930 Zaventem

Belligoi Julien

Bureau Zaventem
Hermesstraat 14
1930 ZAVENTEM
Téléphone: 02-7120666
Télécopie: 02 725 12 39

Référence: Wyj
Stijn Weygaerts
Téléphone: +32 2 7120671
Télécopie: +32 2 7251239
E-mail: Wyj@viessmann.com

12-mei-2010

Votre demande du 12/05/10
Projet Devis
Numéro de projet

Votre référence
N° d'offre 6020065743

Client 0601003534

Monsieur Belligoi

Nous vous remercions vivement pour votre demande de prix et nous vous prions de bien vouloir trouver notre meilleure offre pour la fourniture du matériel décrit ci-après (selon nos conditions générales de vente).
Nos prix s'entendent bruts hors TVA, à l'exception des articles en prix nets.

Validité de l'offre : 3 mois

Le matériel proposé dans cette offre peut être soumis à modifications en relation avec l'évolution de nos produits.

Délai de livraison : à convenir.

Conditions de livraison: franco chantier (Belgique), mise en place sur site non comprise.

Conditions de paiement: conditions habituelles ou à convenir.

En cas de paiement endéans les 10 jours de réception de la facture, nous accordons un escompte de 2% sur le montant net de la commande.

Nous espérons que notre offre répond à vos souhaits. N'hésitez pas à nous contacter pour tous renseignements complémentaires.

Sincères salutations
Viessmann Belgium

Stijn Weygaerts

Bruno Lociuro

Outre d'autres informations, vous trouverez la documentation technique de nos produits sur notre site www.viessmann.be.

Siège social: Viessmann Belgium sprl Hermesstraat 14 B-1930 ZAVENTEM
TVA: BE 0402.475.962 ING 350-0074146-60

Pos	Désignation matériel	Quantité	Prix unitaire	Remise	Total																				
10	<p>VIESSMANN Vitocrossal 200, type CM2</p> <p>Chaudière gaz à condensation avec brûleur radiant Matrix.</p> <p>Selon EN 297, EN 303, EN 483 et EN 677 et marquage CE.</p> <p>Pour installations de chauffage fermées avec températures de départ admissibles jusqu'à 110°C.</p> <p>Pour fonctionnement avec température de l'eau de chaudière glissante et utilisation de la chaleur de condensation.</p> <p>Pour combustion de gaz naturel.</p> <p>Fonctionnement très silencieux et émission très bas de matières nocives grâce au brûleur radiant modulant MatriX.</p> <p>Chaudière à condensation compacte avec chambre de combustion en acier inoxydable avec charge de foyer très basse.</p> <p>Avec surfaces de chauffe Inox-Crossal en acier inoxydable, pour une utilisation de la chaleur de condensation à haute efficacité et haute fiabilité.</p> <p>Toutes les pièces en contact avec les gaz de fumées sont en acier inoxydable 1.4571.</p> <p>Raccordement cheminée en plastique (PP).</p> <p>Exécution optimisée pour l'utilisation de la chaleur de condensation selon le principe de circulation à contre-courant de l'eau de chaudière et des gaz de fumées.</p> <p>Chaudière avec grande contenance en eau.</p> <p>Corps de chaudière pourvu sur tous les côtés d'une épaisse isolation composite.</p> <p>Montage facile grâce au système fastfix de Viessmann.</p> <p>Puissance calorifique nominale</p> <table> <tr> <td>à 50/30 degrés C:</td> <td>311 kW</td> </tr> <tr> <td>à 80/60 degrés C:</td> <td>285 kW</td> </tr> </table> <p>Dimensions globales</p> <table> <tr> <td>Longueur:</td> <td>1790 mm</td> </tr> <tr> <td>Largeur:</td> <td>915 mm</td> </tr> <tr> <td>Hauteur:</td> <td>1450 mm</td> </tr> </table> <p>Dimensions d'introduction</p> <table> <tr> <td>Longueur:</td> <td>1390 mm</td> </tr> <tr> <td>Largeur:</td> <td>760 mm</td> </tr> <tr> <td>Hauteur:</td> <td>1275 mm</td> </tr> </table> <p>Poids avec isolation thermique:</p> <table> <tr> <td>360 kg</td> </tr> </table> <p>Pression de service max.:</p> <table> <tr> <td>4 bar</td> </tr> </table> <p>Tubulure échap. (larg. libre):</p> <table> <tr> <td>200 mm</td> </tr> </table> <p>Rendement normalisé jusqu'à</p> <table> <tr> <td>108 %</td> </tr> </table>	à 50/30 degrés C:	311 kW	à 80/60 degrés C:	285 kW	Longueur:	1790 mm	Largeur:	915 mm	Hauteur:	1450 mm	Longueur:	1390 mm	Largeur:	760 mm	Hauteur:	1275 mm	360 kg	4 bar	200 mm	108 %				
à 50/30 degrés C:	311 kW																								
à 80/60 degrés C:	285 kW																								
Longueur:	1790 mm																								
Largeur:	915 mm																								
Hauteur:	1450 mm																								
Longueur:	1390 mm																								
Largeur:	760 mm																								
Hauteur:	1275 mm																								
360 kg																									
4 bar																									
200 mm																									
108 %																									

Pos	Désignation matériel	Quantité	Prix unitaire	Remise	Total
	<p>Avec régulation numérique de chaudière Vitotronic 100, type GC1 pour le fonctionnement avec température de l'eau de chaudière constante ou en fonction de la température extérieure en liaison avec une régulation externe. Pour le fonctionnement avec brûleurs à deux allures ou modulants.</p> <p>Des fonctions de protection de chaudière Therm-Control, une pompe de mélange supplémentaire ou la régulation continue de température de retour sont possibles.</p> <p>Système de diagnostic intégré.</p> <p>La régulation Vitotronic 100 comprend: limiteur électronique de température maximale, régulateur de température et limiteur de température de sécurité.</p> <p>Possibilités de réglage pour température de l'eau de chaudière et température d'eau sanitaire.</p> <p>Raccordement en option d'une extension fonctionnelle avec entrée 0-10 V.</p> <p>Avec sonde de température de chaudière. Les appareils externes sont raccordés via connecteurs système Rast 5.</p> <p>Avec brûleur radiant Matrix avec marquage CE.</p> <p>Pour la combustion de gaz naturel E et LL. Brûleur modulant avec deux électrovannes de gaz (dont une électrovanne de sécurité). Le brûleur est réglé sur la puissance calorifique nominale de la chaudière et testé à chaud.</p> <p>Etendue de la livraison:</p> <p>Chaudière avec brûleur radiant Matrix, jeu complet de contre-brides, isolation calorifique, viseur de flamme, siphon et régulation de chaudière.</p> <p>N° de cde.: CM20006</p>				
20	<p>Système de neutralisation type N 70</p> <p>Neutralisation par granulés suivant DIN 4716.</p> <p>Pour eau de condensation d'installations de combustion de gaz jusqu'à 70 l/h, correspond à env. 500 kW.</p> <p>Enveloppe en matière plastique stable, opaque. Avec zone de décantation intégrée pour particules de saleté et plaques filtrantes de répartition régulière</p> <p>de l'eau de condensation. Des pentes d'écoulement évitent les dépassements de pH.</p>	3,00	19.833,00		59.499,00

Pos	Désignation matériel	Quantité	Prix unitaire	Remise	Total
	8 kg de granulés, 5 m de flexible 3/4", accessoires de raccordement et 100 bandelettes de mesure de pH sont compris dans la livraison. Dimensions hors tout Longueur: 520 mm Largeur: 346 mm Hauteur: 192 mm Poids y compris granulés: 15 kg N° de cde.: 7264769	2,00	423,00		846,00
30	Granulés de neutralisation (8 kg) N° de cde.: 9521702	1,00	67,00		67,00
40	Soupape de sécurité à membrane Vitoset Type MS 1 1/4 avec pression de fonctionnement 3 bars Pour installations de chauffage fermées jusqu'à 350 kW de puissance calorifique. Corps en laiton. Raccordement: G 1 1/4 Echappement: G 1 1/2 N° de cde.: 9572991	3,00	47,00		141,00
50	VIESSMANN Vitotronic 300-K Typ MW1 Gr.2. Régulation numérique de cascade avec sonde extérieure pour installations à plusieurs chaudières (jusqu'à 4 chaudières). La régulation Vitotronic 300-K règle la cascade de l'installation, la préparation de l'eau chaude sanitaire, le circuit d'installation et/ou - en relation avec des kits d'extension - max. deux circuits de chauffage avec mélangeur. Elle possède une unité de commande avec écran. Capable de communiquer via téléphone, fax ou liaison directe au PC. Raccordement en option d'une extension fonctionnelle avec entrée 0-10 V. Les courbes caractéristiques de chauffage et les périodes de temps pour les circuits de chauffage, la préparation de l'eau chaude sanitaire et la pompe de circulation sont réglables séparément. Via liaison LON, on peut brancher 32 régulations de circuits de chauffage Vitotronic 200-H.				

Pos	Désignation matériel	Quantité	Prix unitaire	Remise	Total
	Avec sonde extérieure. Les appareils externes sont raccordés via connecteur système Rast 5. Résistances de terminaison LON comprises dans la livraison. N° de cde.: Z004985	1,00	2.182,00		2.182,00
60	Module de communication LON avec câble de communication LON 7 m de long. Une pièce nécessaire par Vitotronic 100, type GC1, pour communication avec Vitotronic 300-K, type MW1. N° de cde.: Z003394	3,00	250,00		750,00
	Somme positions 21,00 % TVA Somme en EUR		63.485,00		63.485,00 13.331,85 76.816,85
	Notre offre est basée sur les données techniques que vous nous avez communiquées. Veuillez vérifier si notre offre correspond au concept de votre installation. Si ce n'est pas le cas, veuillez nous en avertir afin que l'on puisse adapter l'offre.				
	Veillez toujours tenir compte de nos conditions de livraison et de fonctionnement des chaudières, ainsi que les conditions de l'eau d'alimentation et de remplissage.				
	Vous trouverez les conditions de fonctionnement et les exigences de qualité de l'eau dans nos feuilles techniques ainsi que dans les notices pour l'étude.				
	***** Veuillez, en cas de commande, toujours mentionner le numéro de projet et/ou d'offre svp. *****				

11.11. ANNEXE K

La Figure 61 montre la concentration en CO₂ dans l'air dans les locaux de l'Occupant 2.

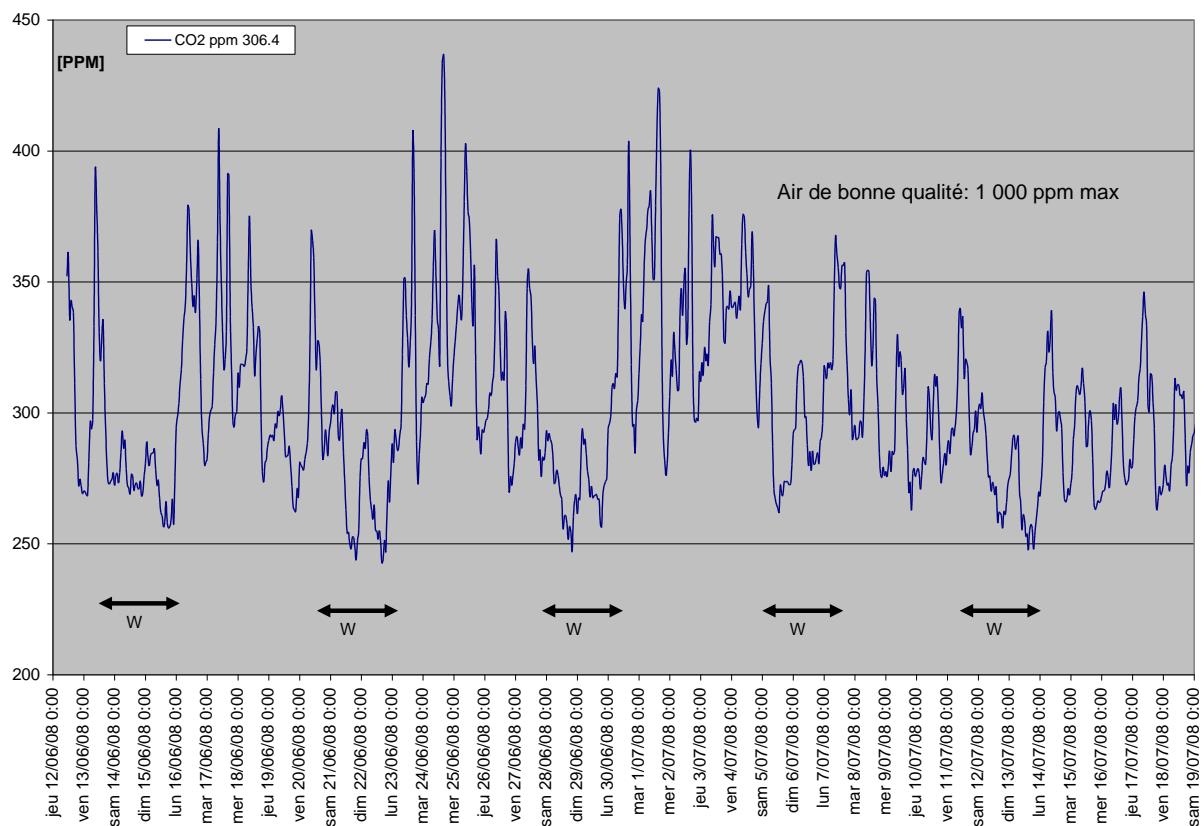


Figure 61 : Concentration en CO₂ dans l'air des locaux (André & Franck, 2009)

11.12. ANNEXE L

En disposant des économies d'énergies dans les différents cas de rénovation envisagés, il est intéressant de déterminer l'incertitude U sur ces économies d'énergies via la formule suivante (ASHRAE, 2002) :

$$U = t \cdot \frac{1,26 \cdot CV(RMSE)}{F} \cdot \sqrt{\frac{n+2}{n \cdot m}}$$

Avec

- t = distribution t de Student. Ce paramètre dépend de l'intervalle de confiance et du nombre de degrés de liberté. Puisque l'intervalle de confiance considéré est de 90% et que le nombre de degrés de liberté est très important, le paramètre t de Student vaut 1,282;
- F = fraction de la moyenne des économies d'énergie sur la période donnée;
- m = période sur laquelle s'effectue la calibration;
- n = période sur laquelle s'effectue la rénovation;
- CV(RMSE) en fonction du type d'énergie considéré. Ce paramètre vaut 2,93 pour la consommation de gaz naturel et 7,41 pour la consommation électrique.

En procédant de la sorte, il est possible de déterminer un intervalle d'économies d'énergies en fonction de l'erreur relative sur l'économie d'énergie calculée.

Par exemple, en remplaçant les chaudières classiques par des chaudières à condensation, cela permet de faire des économies de gaz naturel de 19,57%. Dès lors, l'incertitude U sur les économies de gaz naturel vaut :

$$U = 1,282 \cdot \frac{1,26 \cdot 2,93}{0,1957} \cdot \sqrt{\frac{12+2}{12 \cdot 12}} \cong 7,54$$

Avec

- t = 1,282;
- F = 0,1957;
- m = 12;
- n = 12;
- CV(RMSE) = 3,21.

Par conséquent, les gains en gaz naturel seront compris dans l'intervalle suivant :

$$[19,57 - U \cdot F ; 19,57 + U \cdot F]$$

Soit

[18,09% ; 21,04%]

En conclusion, les économies moyennes en gaz naturel en installant des chaudières à condensation varient donc entre approximativement 18% et 21%.

Le raisonnement est le même pour la consommation électrique et pour tous les autres cas de rénovation. Le Tableau 27 reprend les intervalles d'économies d'énergies pour tous les cas de rénovation.

Tableau 27 : Intervalles d'économies d'énergies en fonction des différents cas de rénovation

Améliorations/Rénovations	Intervalles²¹ d'économies réalisées sur la consommation [%]	
	Électrique	De gaz naturel
Utilisation de vitrages et de châssis de fenêtre performants	[-3,29 ; 4,16]	[15,19 ; 18,42]
Remplacement des chaudières classiques par des chaudières à condensation	[18,09 ; 21,04]	[-3,73 ; 3,73]
Nouveaux murs opaques avec un coefficient de transmission thermique de 0,4 W/m ² K	[-3,35 ; 4,10]	[11,49 ; 14,72]
Utilisation rationnelle de la ventilation	[10,91 ; 18,37]	[51,19 ; 54,25]
Remplacement du chiller par un autre plus performant	[-2,43 ; 5,02]	0
Variation de la température de pulsion	[-3,34 ; 4,11]	[3,02 ; 6,25]
Utilisation de lampes à basses consommations et à haut rendement	[6,52 ; 13,98]	[10,73 ; 13,97]
Modification de la température ambiante lorsque le bâtiment est inoccupé	[-3,55 ; 3,9]	[1,12 ; 4,35]

²¹ Il est important de définir une convention de signe : un « - » signifie une dépense d'énergie et un « + » représente une économie d'énergie.