UNIVERSITÉ DE LILLE
École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur
Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement

THÈSE

Pour l'obtention du grade

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

Discipline : Génie Civil

Présentée par :

Khadija JNAT

Bâtiment intelligent : Analyse et optimisation des dépenses d'énergie dans le logement social

Soutenue le 13 Novembre 2018 devant le jury composé de :

Ali ZAOUI	Professeur, Université de LILLE	Directeur
Aziz SOULHI	Professeur, École Nationale supérieure des mines de Rabat	Rapporteur
Marwan AL HEIB	Directeur de recherche, INERIS	Rapporteur
Isam SHAHROUR	Professeur, Université de LILLE	Examinateur
Didier DEFER	Professeur, Université d'Artois	Examinateur
Ola HAJ HASSAN	MCF, Université d'Artois	Examinateur
Negin ASHOORI	Chercheure, Stanford University	Examinateur
Nathalie LABONNOTTE	MCF, Norwegian University of Science and Technology	Examinateur
Afif BENYAHYA	Chargé de mission, Lille Métropole Habitat	Invité

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Pour la mémoire de PAPA chéri qui nous a quitté très tôt ! Pour la mémoire de Mon grand-Père, le grand Homme !
Que leurs âmes reposent en Paix !

Pour maman qui depuis très longtemps souhaiterai vivre ce moment !

Pour mon mari et ma princesse Rhalia !

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

REMERCIEMENTS

C’est avec une certaine émotion et beaucoup de sincérité que je voudrais remercier toutes les personnes ayant soutenu et apprécié mon travail.

En premier lieu, je remercie Mr Didier DEFER de me faire l’honneur de présider le jury. Je le remercie également pour ses encouragements et ses remarques tout au long de cette période. Je remercie Messieurs Aziz SOULHI et Marwan ALHEIB, pour avoir accepté d’être rapporteur de ma thèse et pour l’intérêt qu’ils ont porté à mon travail.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de thèse, Mr. Ali ZAOUI, pour sa disponibilité pour toutes les démarches administratives, ses conseils qui ont été nombreux et importants. Je remercie infiniment Mr. Isam SHAHROUR pour m’avoir accueilli au sein de son équipe. Je lui suis également reconnaissante pour le temps conséquent qu’il m’a accordé, ses qualités scientifiques et humaines, sa franchise et sa sympathie. J’ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

J’adresse de chaleureux remerciements à Madame Ola EL HAJ HASSAN, pour son attention durant la dernière phase de ma thèse, ses conseils avisés et son accueil à l’IUT de Béthune.
J’associe à ces remerciements Mesdames Negin ASHOORI et Nathalie LABONOTTE pour avoir accepté d’examiner mon travail.

Bien sûr, atteindre ces objectifs n’aurait pas été possible sans l’aide des membres de Lille Métropole Habitat. Je souhaite notamment remercier Mr.Afif BENYAHYA, chargé de missions qui nous a facilité la tâche durant la phase d’instrumentation.

Je désire grandement remercier mes collègues au sein du laboratoire pour leur sympathie, leur amitié et leur support technique. Ce fut un plaisir de travailler avec eux.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Je tiens à remercier tous mes amis notamment Mr Abdellah HANANI, Labiba, Chaima, Laila, Amal et les sœurs Safaa et Hanaa de m'avoir soutenu et épaulé durant mes moments de faiblesse.

Je souhaite remercier spécialement, maman Fatima Zohra, la formidable femme qui m'a aidé et soutenue et sans laquelle je n'en serai pas là aujourd'hui. Qu'elle trouve, dans la réalisation de ce travail, l'aboutissement de ses efforts ainsi que l'expression de ma plus affectueuse gratitude.

Merci à mes frères Anouar et Othmane pour leur soutien et bonne humeur. Leur confiance et leur amour me portent et me guident tous les jours.

Je remercie la famille BENCHRIFA pour leurs encouragements.

Je remercie ma petite princesse Rhalia, qui a su supporter mes frustrations et mon stress tout en me comblant de son amour et de ses bisous.

Je remercie mon époux Abdel de sa patience, d'avoir cru en moi, de m'avoir préparé l'environnement convenable pour que notre projet puisse voir le jour. Il a su me donner toutes les chances pour réussir. Cette thèse et moi te devons beaucoup. Merci !

Et enfin une pensée pour terminer ces remerciements pour Toi qui n'a pas vu l'aboutissement de mon travail mais je sais que tu en aurais été très fier de ta fille !

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

ABSTRACT

This work concerns the optimization of heating energy consumption in social housing.
It is a part of a global approach to reduce energy consumption in social housing. It was realized within a collaboration between Lille University and Lille Métropole Habitat. The research is based on monitoring occupied dwellings to explore the possibilities of reducing energy consumption through control of the heating system and the implication of tenants.

This thesis is composed of four parts.

The first part includes a literature review concerning energy precarity in social housing and thermal regulations.

The second part presents the social housing residence used in this research. It presents in details the monitoring system and the experimental protocol used to follow the comfort conditions in the residence.

The third part presents analysis of indoor temperature and relative humidity recorded in three apartments. Analysis shows an overheating during the heating period, which leads to important increase in the heating expenses.

The last part presents thermal simulation using the software “Archiwizard”. It shows the calibration of the numerical model as well as an estimation in heating energy savings.

Keywords: Social housing, smart monitoring, heating energy, thermal comfort, numerical model.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

RESUMÉ

Le travail de thèse porte sur l'optimisation des consommations d'énergie de chauffage dans le logement social. Il s'inscrit dans une démarche globale de réduction des consommations d'énergie. Ce travail a été réalisé grâce à une collaboration entre l'Université de Lille et le bailleur Lille Métropole Habitat. Il s'appuie sur une instrumentation des logements occupés afin d'explorer les possibilités de réduction des consommations à travers le contrôle du système de chauffage et la sensibilisation des occupants.

Le travail comporte 4 parties.

La première partie comprend une étude bibliographique sur la précarité énergétique dans le logement social ainsi que les réglementations thermiques.

La deuxième partie présente le site d'étude qui sert de support pour cette thèse. Cette partie décrit la méthode expérimentale et le système d'instrumentation utilisé pour réaliser les mesures du confort thermique.

La troisième partie comporte une analyse de la température intérieure et de l'humidité relative pendant les différentes saisons. L'étude montre des périodes de surchauffe, qui se traduisent par des surconsommations.

La dernière partie s'appuie sur le logiciel de simulation thermique dynamique Archiwizard. Elle montre le calage des paramètres numériques sur les mesures, ensuite elle donne une estimation des économies potentielles que nous pouvons réaliser par la simple application de la réglementation thermique.

Mots-clés : logement social, instrumentation intelligente, énergie de chauffage, confort thermique, simulation thermique.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Table des matières

Table des matières i
Liste des figures iii
Liste des tableaux vi
Liste des abréviations vii
Introduction 1
1. Chapitre 1 5
Problématique du logement social : Analyse bibliographique 5
1.1. Introduction 5
1.2. Logement social en France 5
1.2.1. Présentation 5
1.2.2. Historique du logement social 6
1.3. Efficacité énergétique du logement social 9
1.3.1. Précarité énergétique 9
1.3.2. Consommation d'énergie 11
1.3.3. Le diagnostic de performance énergétique (DPE) 13
1.3.4. Les dépenses d'énergie 15
1.3.5. La réglementation Thermique 16
1.4. Le confort thermique dans le bâtiment 21
1.4.1. Le bilan thermique 21
1.4.2. Evaluation du confort thermique 23
1.5. L'occupant et sa relation avec le bâtiment 29
1.6. Conclusion 31
2. Chapitre 2 33
Suivi des conditions de confort et des consommations dans des logements occupés : Présentation du site d'étude 33
2.1. Introduction 33
2.2. Présentation générale du site d'expérimentation 33
2.2.1. La résidence avant la réhabilitation 34
2.2.2. Réhabilitation 2012 35
2.2 3. Diagnostic thermique 36
2.3. Système d'instrumentation 40
2.3.1. Cahier de charge 40
2.3.2. Architecture du dispositif 41
2.4. Instrumentation des appartements 46
2.4.1. Procédure d'instrumentation 46

© 2018 Tous droits réservés.

2.4.2. Instrumentation de l'appartement A 47
2.4.3. Instrumentation de l'appartement B 48
2.4.4. Instrumentation de l'appartement C 49
2.4.5. Exemples de mesure 50
2.5. Conclusion 51
3. Chapitre 3 54
Analyse des mesures réalisées dans la résidence Tennis 54
3.1. Introduction 54
3.2. Analyse des données de l'appartement A 54
3.2.1. Période de chauffe 54
3.2.2. Période de non-chauffe 69
3.3. Comparaison entre les appartements 74
3.3.1. Période de chauffe 74
3.4. Conclusion 82
4. Chapitre 4 84
Modélisation numérique et analyse des économies d'énergie 84
4.1. Introduction 84
4.2. Modélisation thermique du bâtiment 84
4.2.1. Outils de simulation dynamique 84
4.2.2. Construction du modèle numérique 87
4.2.3. Le modèle météorologique 89
4.2.4. Scénario basé sur les mesures réelles 89
4.2.5. Résultats 91
4.3. Analyse paramétrique 94
4.3.1. Scénarios conventionnels 95
4.3.2. Scénario RT 2012 98
4.4. Conclusion 103
Conclusion 104
Bibliographie 106
Annexes 111

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Liste des figures

Figure 1.1: Loyer moyen en euros/m² de surface habitable par tranche d'ancienneté du logement 8
Figure 1.2: Proportion de logements affectés par un défaut (Source : INSEE, enquête logement 2013) 10
Figure 1.3: Évolution des consommations unitaires des résidences principales par usage (kWh/m2) Source : L'ADEME (Chiffres clés du bâtiment) 13
Figure 1.4: DPE au 1er janvier 2017, classe de consommation d'énergie 14
Figure 1.5: DPE au 1er janvier 2017, effet de serre 14
Figure 1.6: Pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) en fonction du vote moyen prédit (PMV) sur l'échelle de l'ASHRAE ISO7730 24
Figure 1.7: Comparaison des résultats obtenus par l'indice PMV et des observations issues d'enquêtes de terrain (a) bâtiment climatisés 27
(b) bâtiment naturellement ventilés 27
Figure 2.1: Localisation du site expérimental 34
Figure 2.2: Photographies de la Résidence TENNIS avant et après la réhabilitation 34
Figure 2.3: Classes de performance énergétique (kWh) 36
Figure 2.4: Façade Sud-Est 38
Figure 2.5: Façade Sud 38
Figure 2.6: Façade Nord-ouest 38
Figure 2.7: Façade Nord 38
Figure 2.8: Distribution de la consommation de gaz 39
Figure 2.9: Caractéristiques du système de contrôle 41
Figure 2.10: Composition du système de communication 41
Figure 2.11: Photographie du capteur de température et humidité 43
Figure 2.12: Capteurs pour test de précision 44
Figure 2.13: Courbes de températures des différents capteurs choisis 44
Figure 2.14: Valeurs des paramètres étudiés en temps réel et visualisation des courbes 45
Figure 2.15: Instrumentation de l'appartement A 47
Figure 2.16: Fonctionnement des capteurs - Appartement A 48
Figure 2.17: Instrumentation de l'appartement B 48
Figure 2.18: Fonctionnement des capteurs - Appartement B 49
Figure 2.19: Instrumentation de l'appartement C 49
Figure 2.20: Fonctionnement des capteurs - Appartement C 50
Figure 2.21: Variation de la température intérieure dans le séjour de l'appartement A 50
Figure 2.22: Variation de l'humidité relative dans le séjour de l'appartement A 51
Figure 2.23: Variation de la luminosité dans le séjour de l'appartement A 51

Figure 3.1: Variation de la température dans le salon durant la période de chauffe 55
Figure 3.2: Variation de la température dans le salon durant 4 jours 56
Figure 3.3: Répartition de la température dans l'appartement A durant la période de chauffe 57
Figure 3.4: Répartition de la température dans l'appartement A et à l'extérieur durant la période de chauffe 57
Figure 3.5: Ecart entre température extérieure et intérieure pendant la période de chauffe 58
Figure 3.6: Variation de la température selon les jours de la semaine durant la période de chauffe 59

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Figure 3.7: Distribution des températures selon les tranches horaires durant la période de chauffe 60
Figure 3.8: Variation de l'humidité relative pendant la période de chauffe 61
Figure 3.9: Répartition de l'humidité relative à l'intérieur de l'appartement A 62
Figure 3.10: Répartition de l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur de l'appartement A 63
Figure 3.12: Variation de la température intérieure en fonction de l'humidité relative dans l'appartement A 64
Figure 3.11: Variation de la température et de l'humidité relative durant le mois de décembre dans l'appartement A 64
Figure 3.13: Position de l'appartement A sur le diagramme hygrothermique (Diagramme de GIVONI) 65
Figure 3.14: Répartition de la température dans deux pièces de l'appartement A 66
Figure 3.15: La répartition de l'humidité relative dans le séjour par rapport aux valeurs de l'humidité relative relevées dans la chambre 67
Figure 3.16: Variation de température dans l'appartement A 68
Figure 3.17: Variation de la température à l'intérieure dans l'appartement A 69
Figure 3.18: Répartition de la température dans l'appartement A durant la période de non chauffe 70
Figure 3.19: Répartition de la température dans l'appartement A ainsi qu'à l'extérieur durant la période de non chauffe 71
Figure 3.20: Écart de température extérieure et intérieure 72
Figure 3.21: Variation de l'humidité relative durant la période de non-chauffe 72
Figure 3.22: Répartition de l'humidité relative dans l'appartement A 73
Figure 3.23: Répartition de l'humidité relative dans l'appartement A ainsi qu'à l'extérieur durant la période de non chauffe 74
Figure 3.24: Variation de la température dans les différents appartements 75
Figure 3.24: Variation de la température dans les différents appartements 75
Figure 3.25: Fréquence de la température dans les appartements étudiés 75
Figure 3.26: Variation de la température pendant le mois de décembre dans les différents appartements 77
Figure 3.27: Fréquence de la température dans les appartements étudiés en fonction des jours de la semaine 78
Figure 3.28: Variation de l'humidité relative dans les appartements étudiés 79
Figure 3.30: Position de l'appartement B sur le diagramme hygrothermique. 80
Figure 3.31: Position de l'appartement C sur le diagramme hygrothermique. 80

Figure 4.1: Caractéristiques du logiciel Archiwizard 86
Figure 4.2: Plan de l'appartement A avec les différentes parois 88
Figure 4.3: Modélisation 3D de l'appartement A ; (a) Façade exposée du séjour Sud-Est 88
Figure 4.4: Les températures mesurées et les températures de consigne dans l'appartement A 90
Figure 4.5: Comparaison de la température du modèle numérique et la température de consigne 91
Figure 4.6: Consommation de chauffage calculée et besoin simulé avec le scénario réel 92
Figure 4.7: Comparaison entre le besoin de chauffage simulé avec les scénarios issus de l'état réel et le besoin de chauffage simulé avec un apport du à l'occupation nul. 93
Figure 4.8: Les scénarios d'usage utilisés pour la simulation thermique dynamique 94
Figure 4.9: Besoin d'énergie simulé (Scénario réel comparé au scénario conventionnel) 96
Figure 4.10: Besoins d'énergie de chauffage dans le salon et la chambre 97

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Figure 4.11: La température de consigne majorée par 1°C par rapport à la température de consigne d'entrée..... 97
Figure 4.12: Besoin de chauffage réel simulé et besoin simulé avec la RT2012..... 100
Figure 4.13: Répartition des consommations de chauffage dans les différentes pièces instrumentées..... 101
Figure 4.14: Comparaison du scénario réel et le scénario issu de la RT 2012 dans le séjour 101
Figure 4.15: Comparaison du scénario réel et le scénario issu de la RT 2012 dans la chambre 102
Figure 4.16: Les besoins de chauffage des différents scénarios 102

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Répartition des logements selon les défauts 9
Tableau 1.2: Echelle de caractérisation de la sensation thermique 26

Tableau 2.1: Travaux réalisés avant la réhabilitation 35
Tableau 2.2: Les indices de performance suivant les différents labels de qualité 37
Tableau 2.3: Consommations et dépenses de gaz avant la réhabilitation 38
Tableau 2.4: Consommations et dépenses de gaz après la réhabilitation 39
Tableau 2.5: Récapitulatif de l'instrumentation des appartements choisis 46

Tableau 3.1: Températures mensuelles intérieures et extérieures durant la période de chauffe 55
Tableau 3.2: Températures selon les jours de la semaine durant la période de chauffe 59
Tableau 3.3 : Températures selon les créneaux horaires durant la période de chauffe 60
Tableau 3.4 : Valeurs de l'humidité relative mensuelle intérieure et extérieure durant la période de chauffe 61
Tableau 3.5: Les données de la consommation d'énergie dans l'appartement A 68
Tableau 3.6: Températures moyennes mensuelles intérieure et extérieure durant la période de non chauffe 70
Tableau 3.7: Les valeurs mensuelles de l'humidité relative intérieure et extérieure durant la période de non chauffe 73
Tableau 3.8 : Les valeurs mensuelles de la température intérieure durant la période de chauffe dans les différents appartements 76
Tableau 3.9: Les valeurs mensuelles de l'humidité relative intérieure et durant la période de chauffe dans les différents appartements 80
Tableau 3.10: Les données énergétiques des appartements étudiés 81

Tableau 4.1: Compositions des parois du modèle 89
Tableau 4.2: Apports internes de chaleur en fonction des équipements pris en compte (Valeurs selon la réglementation thermique) 93
Tableau 4.3:Taux d'adulte équivalent en fonction des heures de la semaine 99
Tableau 4.4: Apports internes de chaleur en fonction des équipements pris en compte 99

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Liste des abréviations

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
BBC	Bâtiment à Basse Consommation
Bbio	Besoin Bioclimatique
BEPAS	Bâtiment à Energie Passive
BEPOS	Bâtiment à Energie Positive
CEP	Consommation Conventionnelle en Energie Primaire
CSS	Cascading Style Sheets
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DIES	Durée d'Inconfort d'Été Statique
DPE	Diagnostic de Performance Energétique
ECS	Eau Chaude Sanitaire
GBR	Global Behavioral Regulator
HLM	Habitation à Loyer Modéré
HTML	HyperText Markup Language
PHP	Hypertext Preprocessor
PLAI	Prêt Locatif Aidé d'Intégration
PLI	Prêt Locatif Intermédiaire
PLS	Prêt Locatif Social
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
PVC	Polychlorure de Vinyle
QPV	Quartiers Prioritaires de la Politique de la Ville
RT	Réglementation Thermique
SCAT	Smart Control Thermal Comfort
SGBDR	Système de Gestion de Base de Données Relationnel
SHOCC	Sub Hourly Occupancy Control
SRU	Solidarité et Renouvellement Urbains
SWAP	Simple Wireless Abstract Protocol
TIC	Température Intérieure Conventionnelle

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Introduction

Ce travail de thèse porte sur l'optimisation des consommations d'énergie de chauffage dans le logement social. Il présente un grand intérêt social, économique et environnemental. En effet, le secteur du logement social compte plus de 4,9 millions d'unités, ce qui représente près de 19% de logement en France. Il s'adresse en particulier aux ménages à faibles revenus. Compte tenu de l'ancienneté de ce secteur, il souffre de plusieurs problèmes liés à la surconsommation énergétique et à la dégradation de la qualité de vie. Le chauffage présente en moyenne 67% de la consommation d'énergie de ce secteur ; ceci explique les enjeux de la maîtrise du chauffage dans ce secteur. La surconsommation d'énergie liée au chauffage a plusieurs impacts, notamment (i) économiques, à cause des dépenses élevées, (ii) sociaux liés à la précarité énergétique et à son effet sur la santé et l'inconfort (iii) environnementaux, liés à la surconsommation d'énergie et aux fortes émissions de gaz à effets de serre.

La réduction de la consommation d'énergie dans le secteur social constitue une grande préoccupation des pouvoirs publics et d'autres acteurs de ce secteur. Elle fait aussi partie de la politique de réduction des consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment. De nombreuses réglementations ont été mises en place en France pour réduire ces consommations. La première remonte à 1974 (RT 1974) suite au premier choc pétrolier. Son objectif était de réduire de 25% la consommation énergétique des bâtiments par rapport aux dernières normes instaurées à la fin des années 50. Elle a été suivie par la RT 1982 avec un objectif de réduction de 20 % de la consommation d'énergie par rapport à la RT 1974, ce qui revenait à 170 kWh/m².an. La RT 1988 a élargi les réglementations précédentes aux bâtiments non résidentiels (bureau, commerces, etc.). Cette réglementation a permis de calculer les besoins d'un logement en chauffage et en eau chaude sanitaire en prenant en compte le rendement des équipements. Suite aux protocoles de Kyoto en 1997 qui ont pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la France a mis en place la RT 2000, qui visait à réduire de 20% la consommation d'énergie par rapport à 1982, (la ramener à 130 kWh/m².an) et de 40% pour les bâtiments du tertiaire.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

La RT 2005 a imposé une nouvelle baisse de 15% de la consommation énergétique des bâtiments neufs avec un objectif de ne pas dépasser l90 kWh/m².an. Cinq nouveaux labels ont été créés pour la performance énergétique des bâtiments neufs :

- **Haute Performance Energétique** (HPE) avec une consommation inférieure à 10% par rapport à la consommation de référence.
- **Très Haute Performance Energétique** (THPE), avec une consommation inférieure à 20% par rapport à la consommation de référence.
- **Haute Performance Energétique à énergies renouvelables** (HPE EnR) qui valorise les équipements de chauffage utilisant une énergie renouvelable.
- **Très Haute Performance Energétique à énergies renouvelables** (THPE EnR) qui comprend la production de chauffage ou d'eau chaude sanitaire assurée par une énergie renouvelable.
- **Bâtiment à Basse Consommation** (BBC) avec des consommations énergétiques globales inférieures à 50 kWh/m²/an.

Suite au Grenelle de l'environnement, la RT 2012 a été mise en place avec l'objectif de développer au mieux le label BBC. Tous les bâtiments neufs, ne devront plus dépasser les 50 kWh/m²/an de consommation d'énergie. La RT 2018-2020 vise les bâtiments à énergie positive. Elle est axée sur la construction de bâtiments qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment, à travers l'apparition des maisons passives, des BEPOS, et des bâtiments à énergie positive.

Dans le secteur du logement social, le gouvernement a imposé aux bailleurs de rénover 800 000 logements dans le but de réduire les consommations d'énergie et d'améliorer le cadre de vie.
Au cours des dernières années, l'effort de réduction des consommations d'énergie a porté sur les constructions neuves et sur les rénovations lourdes avec des travaux importants sur l'isolation thermique et l'amélioration des performances des équipements. Or, on sait aussi que la consommation d'énergie dépend aussi du comportement des occupants. Il est donc essentiel de comprendre l'impact de ce comportement sur les consommations d'énergie dans le logement social et d'explorer les possibilités de réduire ces consommations à travers une implication plus forte des occupants dans une démarche globale de réduction des consommations d'énergie. Ce travail de thèse s'inscrit dans cette démarche. Il a été réalisé avec Lille Métropole Habitat. Il s'appuie sur une instrumentation des logements occupés afin de comprendre les conditions de

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

chauffage et d'explorer les possibilités de réduction des consommations à travers des mesures de contrôle du système de chauffage et des gestes simples des occupants.

Le travail réalisé est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une analyse de l'état de l'art avec un intérêt pour la problématique de précarité énergétique dans le logement social. Après une présentation de l'évolution du bâtiment dans le secteur social, le chapitre présente les réglementations thermiques ainsi que leurs exigences et mises en application. Le confort thermique est présenté en prenant en compte les différents modèles d'évaluation. Ce chapitre expose aussi la relation occupant-habitat et son influence sur le confort et les performances énergétiques.

Le deuxième chapitre décrit la méthode expérimentale utilisée dans ce travail. Le chapitre présente, en premier, le site d'étude ainsi que les travaux réalisés depuis sa construction. Puis, il décrit le système d'instrumentation déployé et le protocole suivi pour réaliser les mesures de l'ambiance thermique.

Le troisième chapitre analyse les données des mesures. Dans un premier temps, il analyse les paramètres de température et d'humidité relative pendant les saisons de chauffe et de non-chauffe. Grâce à l'étude de ces paramètres, nous détectons des intervalles de surchauffe se traduisant par des surconsommations et de l'inconfort. Nous terminons par la comparaison des consommations d'énergie et l'évaluation du confort thermique dans les appartements instrumentés.

La dernière partie s'appuie sur le logiciel de simulation thermique dynamique Archiwizard. Elle montre le calage des paramètres numériques sur les mesures, ensuite elle donne une estimation des économies potentielles par la simple application de la réglementation thermique.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

© 2018 Tous droits réservés.

Chapitre 1

Problématique du logement social : Analyse bibliographique

1.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique des problématiques du logement social en France, qui fait l'objet de ce travail de thèse. Il présente d'abord le logement social en France. Ensuite, il traite une question importante du parc du logement social, celle de l'efficacité énergétique, et plus particulièrement la précarité énergétique et la consommation d'énergie dans ce parc. Le chapitre expose aussi une autre question importante relative au confort thermique dans le bâtiment et aux modèles proposés pour l'évaluation de ce confort. La dernière partie analyse la relation entre l'occupant et le bâtiment. La conclusion fait une synthèse des questions traitées dans ce chapitre et expose les grandes lignes de ce travail de thèse.

1.2. Logement social en France

1.2.1. Présentation

Le logement social en France vise à soutenir l'offre du logement et à augmenter le nombre de logements proposés aux ménages à revenus modérés. Il est également un outil de mixité sociale, qui a été confirmée par la loi « Solidarité et renouvellement urbains » (SRU), qui impose aux communes de plus de 3500 habitants de construire 25 % de logements sociaux avec de lourdes pénalités en cas de non-respect d'ici 2025 comme horizon.[1]

Le logement social permet au locataire de s'acquitter d'un loyer relativement faible, très souvent inférieur au loyer dans le parc privé. Les caractéristiques du logement social varient

[1] Commissariat générale au développement durable. DataLab : Le parc locatif social au 1er janvier 2017, p.1-13

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

sensiblement. Pour diverses raisons, les ménages à faibles revenus occupent des logements de moins bonne qualité.

Le logement social représente près d'un cinquième de logements en France (18,2 %). Les logements HLM en constituent la majeure partie. Dans le secteur locatif, certains ménages emménagent dans des logements sociaux, d'autres les quittent. Le nombre de demandeurs du logement en HLM continue à croître. Le principal critère d'admission est le non-dépassement des plafonds de ressources. Des critères supplémentaires de sélection se structurent autour des deux catégories de l'action publique, droit au logement et mixité sociale. Les profils suivants sont prioritaires :

- les personnes en situation de handicap ;
- les résidents des logements insalubres ;
- les résidents dans des logements de transition ;
- les personnes mal logées reprenant une activité après une période de chômage de longue durée ;
- les personnes en couple justifiant de violences de couple.

La loi Besson du 31 mai 1990 précise que le logement social est prioritaire aux « ménages défavorisés » ou « mal logés ».

1.2.2. Historique du logement social

À l'origine, le logement social fut conçu pour résoudre un problème sanitaire : éviter les épidémies qui se propageaient facilement dans les logements insalubres des ouvriers, qui s'entassaient en masse dans les villes depuis la révolution industrielle. Les premiers groupements de logements sont construits par des patrons, dans une logique de paternalisme industriel : la cité Meunier à Noisiel. L'objectif derrière la construction des grands rassemblements est de favoriser « une grande ponctualité des salariés et un meilleur rendement de leur part car le trajet n'est plus source de fatigue ». En outre, cette proximité avec l'usine permet d'exercer un contrôle social et de fidéliser les employés à l'entreprise [Stebé 2016].

Quand le logement social devient réellement une politique publique, à l'aube du XXème siècle, l'état invente le concept de « banlieues-jardins » ou « cités jardins », visant à mêler architecture

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

bucolique et efficacité économique. Les logements sont souvent des maisons individuelles, ou des immeubles de quelques étages.

Après la seconde guerre mondiale, le relogement devient une urgence. 45% des logements occupés sont surpeuplés, 10% de la population vit dans des habitats totalement insalubres. L'État favorisait encore la réhabilitation de l'ancien parc ou la construction de « petits ensembles ».

Les tours d'immeubles arrivent dans les années 1960. La France est en pleine expansion démographique, elle produit en masse, le pays accueille de nombreux travailleurs immigrés et doit également reloger les rapatriés du Maghreb. Plus question de construire des immeubles de 20 ou 30 logements. Alors, des grands ensembles sont construits en périphérie du centre-ville avec le souci d'implanter des commerces et des associations. A partir des années 1990, le concept des tours d'immeubles disparaît des projets de logement social. Les élus reviennent vers des projets plus modestes : le concept des années cinquante. Depuis les années 2000, les opérations se concentrent sur deux versants : l'insertion de toutes petites opérations (4 ou 5 logements dans un même quartier) dans de l'ancien, en plein cœur de ville ; et le développement d'éco-quartiers sur de nouveaux pans de territoire.[2]

1.2.3. Données sur le parc du logement social en France

Au 1er janvier 2017, le parc locatif des bailleurs sociaux compte 4 999 300 logements, dont 4 914 500 forment le parc locatif social. Parmi ces logements, 4 697 800 sont présents sur le marché de la location : loués ou vacants, 95 700 sont en attente de travaux ou de démolition, 36 500 sont pris en charge par des associations et les 84 500 autres sont des logements fonctionnels ou occupés contre indemnités. En 2016, le parc locatif social a progressé de 1,6%. Cette évolution reflète de fortes disparités régionales. Le parc se développe toujours fortement dans les départements d'outre-mer (DOM) avec une évolution de + 3,5 % contre + 1,5 % en métropole. Un peu plus de trois logements sociaux sur dix sont situés dans un quartier prioritaire de la politique de la ville (QPV). L'Île-de-France a la proportion la plus élevée en logement social, soit 25 % du parc de logement[3].

[2] L'Union social de l'habitat, Rapport Hlm : habiter mieux, bien vivre ensemble/ Histoire du logement social
[3] Commissariat général au développement durable, Service de la donnée et des études statistiques : Le parc locatif social au 1er janvier 2017, p3

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Le parc social compte 14% de maisons individuelles, 58% d'immeubles de moins de 50 logements, 26% d'immeubles de 50 à 200 logements. Seuls 11% des logements datent d'avant 1956. 49% du parc a été construit entre 1956 et 1975. L'âge moyen des bâtiments est plus faible que celui du parc privé et la qualité thermique des bâtiments est, pour une même date de construction, supérieure dans le parc social. Les réhabilitations sont fréquentes et importantes.

Au 1er janvier 2017, dans le parc locatif social, le loyer s'élève en moyenne à 5,72 €/m² de surface habitable (Fig.1.1). Entre 2016 et 2017, les loyers progressent en moyenne de 0,5 %. Cette augmentation est plus faible que celle constatée entre 2015 et 2016 (0,8 %). Un quart des loyers sont inférieurs à 4,80 €/m² et un quart sont supérieurs à 6,50 €/m². D'une région à l'autre, les loyers moyens varient. Ils sont les plus élevés en Île-de-France (6,70 €/m²), Provence-Alpes-Côte d'Azur (5,75 €/m²) ainsi que dans la plupart des DOM.

En Île-de-France, le loyer moyen est supérieur de 1,3 €/m² à la moyenne des autres régions, soit un écart de 24 %. Entre l'Île-de-France et la Bourgogne Franche-Comté, la région ayant le loyer le plus bas, l'écart s'élève à 1,54 €/m². Outre la localisation du logement, d'autres facteurs influent sur le montant du loyer comme son ancienneté, ou son mode de financement initial. Ainsi, les logements construits depuis 40 à 60 ans ont les loyers les plus faibles (5,05 €/m2). Pour les logements mis en service après 1977, l'écart de loyer entre les financements les plus sociaux (PLAI) et les moins sociaux (PLS et PLI) est en moyenne de 2,8 €/m2. [4]

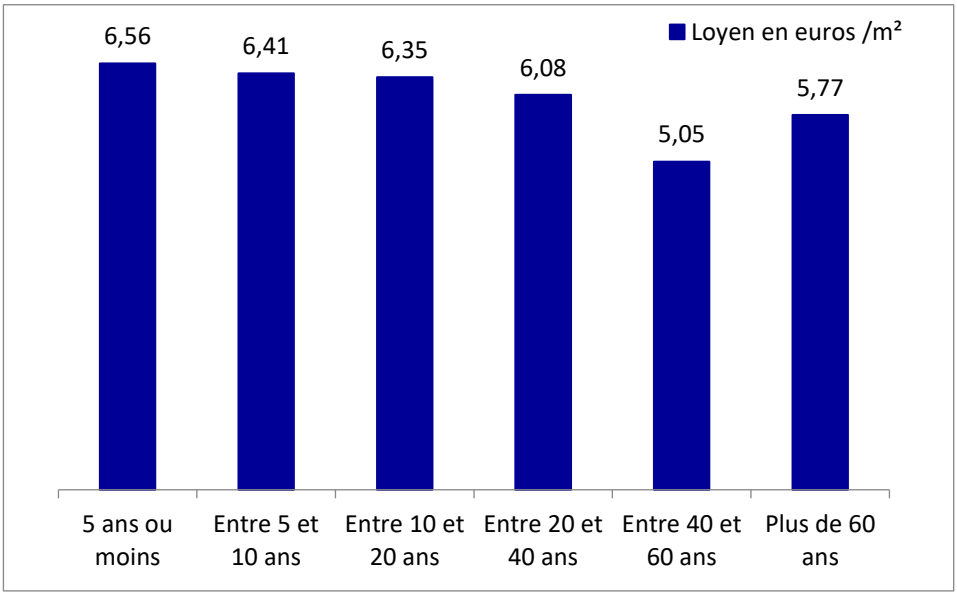


Figure 1.1: Loyer moyen en euros/m² de surface habitable par tranche d'ancienneté du logement

**L'ancienneté est calculée à partir de l'année de construction, parc social locatif, Source : SDES, RPLS au 1er janvier 2017*

[4] Commissariat général au développement durable : les statistiques du développement durable 2017, p :8

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

1.3. Efficacité énergétique du logement social

1.3.1. Précarité énergétique

En quarante ans, le confort du logement en France s'est considérablement amélioré. Le confort sanitaire de base est quasi intégralement acquis en 2013, alors qu'à la fin des années 1970, un logement sur quatre manquait de toilettes à l'intérieur et un sur quatre n'avait ni douche ni baignoire. Tout au long du temps, avec l'amélioration globale du confort, la perception de la qualité du logement a évolué. En 2013, 77.5% des ménages vivent dans un logement sans défaut grave de confort. C'est le cas de 79.9% des ménages vivant dans un logement individuel et de 74.5% de ceux vivant dans un logement collectif (Cf. Tab.1.1).

Tableau 1.1: Répartition des logements selon les défauts (Source INSEE, enquêtes logement)

	2001	**2006**	**2013**
Aucun défaut			
Ensemble	**75.0**	**76.7**	**77.5**
Individuel	76.4	78.2	79.9
Collectif	73.3	74.7	74.5
1 défaut			
Ensemble	**20.1**	**19.7**	**19.1**
Individuel	19.1	18.5	17.3
Collectif	21.4	21.2	21.3
2 défauts			
Ensemble	**4.9**	**3.6**	**3.4**
Individuel	4.5	3.2	2.8
Collectif	5.3	4.1	4.1

Certains logements présentent des défauts susceptibles de porter atteinte à la sécurité et à la santé de leurs occupants. Les défauts les plus fréquents déclarés par les occupants (20 % des logements) concernent l'humidité sur les murs ou les problèmes d'isolation thermique, à l'air et aux infiltrations d'eau. Ces irrégularités affectent directement la performance et le confort thermiques. Une enquête réalisée en 2013 par le Commissariat Général au Développement Durable relève que la raison principale invoquée par les personnes ayant souffert du froid l'hiver précèdent est d'abord la mauvaise isolation de leur logement (36 %), puis la volonté d'économiser l'énergie (25 %), les défaillances techniques liées à l'installation de chauffage (14 %) et le mauvais ajustement du chauffage collectif (5 %). Lorsque le phénomène se produit

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

fréquemment, il semble que la mauvaise isolation soit prépondérante : c'est la raison principale invoquée par plus de la moitié des personnes.[5]

Le décret du 30 janvier 2002 relatif à la loi solidarité et renouvellement urbains (SRU) précise les conditions que doit satisfaire un logement pour garantir la sécurité et la santé de ses occupants, et les équipements dont il doit être pourvu en termes de surface et volume habitables, de qualité du bâti, de dispositifs d'isolation, d'installation électrique, de chauffage, d'éclairement naturel, etc. Les défauts de confort les plus graves présentent également un indicateur important pour apprécier les évolutions récentes de la qualité de l'habitat (Fig.1.2).

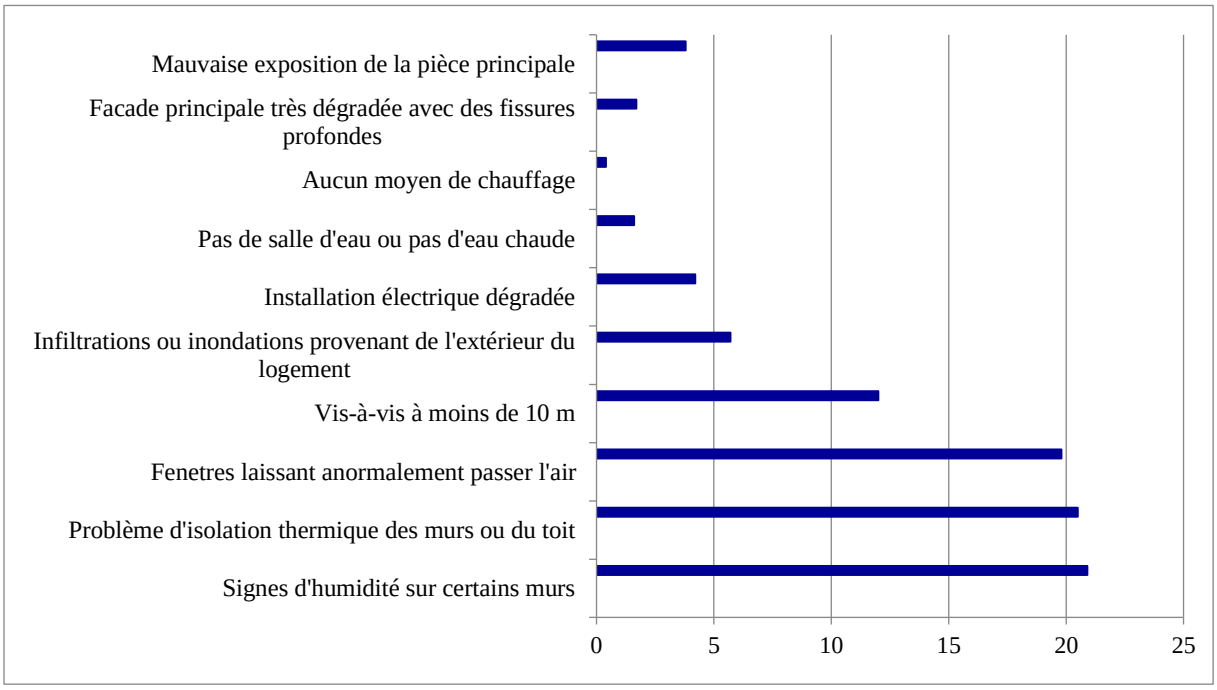


Figure 1.2: Proportion de logements affectés par un défaut (Source : INSEE, enquête logement 2013)

En 2013, plus de trois logements sur quatre (près de 78 % contre 75 % en 2001) ne présentent aucun défaut. À l'inverse, 3,4 % des logements présentent encore deux défauts graves ou plus, et c'est le cas de 6,5 % des logements construits avant 1949. Le logement est d'autant plus en défaut grave qu'il comporte un petit nombre de pièces [Brisepierre 2011].

[5] Institut national de la statistique et des études économiques (2017) : Les conditions de logements en France. p:140

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

D'après la loi SRU, un logement décent doit avoir une surface minimale de 9 m² et une hauteur sous plafond d'au moins 2,20 mètres. En 2013, ces critères ne sont pas satisfaits pour 1,3 % des logements. Ces derniers présentent en outre au moins un défaut grave de confort dans un cas sur trois. Enfin, 0,6 % des ménages vivent dans un logement qui est sous le coup d'un arrêté d'insalubrité. Deux logements sur trois présentent dans ce cas au moins un des défauts graves mesurés par l'enquête Logement.

Depuis 1975, Les performances thermiques ont commencé à s'améliorer en vertu des réglementations thermiques (RT) successives ; plus de la moitié des immeubles construits avant 1974 ont été rénovés. La performance énergétique médiane correspond à la classe D du DPE. 1% des logements sont classés G. Plus de 60% des logements sont chauffés au gaz naturel, de façon individuelle ou collective. Cela rend le logement social particulièrement sensible à la hausse du prix de cette énergie.

Les tensions appliquées sur le marché du logement créent une tendance à l'allocation des crédits disponibles vers le secteur du neuf. Cette tendance est renforcée par le fait que les «gains» énergétiques réalisables dans les logements neufs sont moins coûteux que ceux réalisés lors des réhabilitations. Cependant, l'enjeu énergétique majeur se présente dans le logement ancien. L'exemple du remplacement parfois inapproprié des fenêtres, alors que la performance thermique des murs n'était pas suffisante (ce qui a conduit à des problèmes de moisissures, entre autres) ou celui du remplacement de chaudières hors amélioration du bâti, montrent les limites d'actions menées de façon anarchique et sans diagnostic global des situations. Il en va de même pour les équipements en énergies renouvelables. La difficulté de financement des opérations économiquement rentables à moyen terme a pour conséquence de « sous dimensionner » les opérations actuelles, y compris pour la construction neuve, ce qui produira des surcoûts d'usage et des réhabilitations plus coûteuses à terme, y compris en raison d'évolutions réglementaires déjà connues.

1.3.2. Consommation d'énergie

Le chauffage présente en moyenne 67% de la consommation d'énergie des foyers. Il représente le premier poste énergivore du logement social. Si de nos jours la tendance est à la réduction progressive des consommations liées au chauffage, on peut cependant relever que la diminution

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

est inférieure à celle attendue des règlementations thermiques. L'écart entre la consommation réelle et celle prévisible peut relever de trois facteurs :

- Non-conformité technique de la performance réelle des bâtiments, notamment lors de la conception ;

- Dégradation de la performance due à l'utilisation inappropriée ou à un défaut d'entretien ;

- Effet rebond direct, l'utilisation des gains liés à la performance dans l'amélioration du confort et donc « une consommation ».

Depuis 1973, les consommations moyennes de chauffage par superficie ont baissé de 58%. Ces progrès ont pu être réalisés grâce aux travaux de maîtrise de l'énergie dans l'habitat existant, aux réglementations thermiques dans le neuf et à un comportement plus économe des ménages. Ainsi, la consommation unitaire moyenne totale est passée de 352 kWh/m^2 en 1973 à 186 kWh/m^2 en 2012 (-1,2% par an, en moyenne) (Cf. Fig.3).

En outre, ce mouvement de baisse est contrecarré par l'évolution des autres consommations d'énergie dans le cadre du logement, qui, poursuivent leur croissance ou ne diminuent que légèrement. C'est particulièrement le cas de la consommation d'électricité spécifique qui connait une progression continue. Pendant cette même période, L'ADEME précise que la consommation unitaire moyenne d'électricité spécifique été multipliée par 2 en 20 ans : elle est passée de 13 kWh/m^2 en 1973, à 30 kWh/m^2 en 2012. Cette croissance change la répartition entre les différents postes de consommation ainsi que celle des utilisations de l'électricité spécifique. Ce phénomène résulte notamment de la progression de l'équipement en appareils électroménagers, hifi et bureautique, d'une augmentation de leur puissance ainsi que l'évolution des habitudes de consommation.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

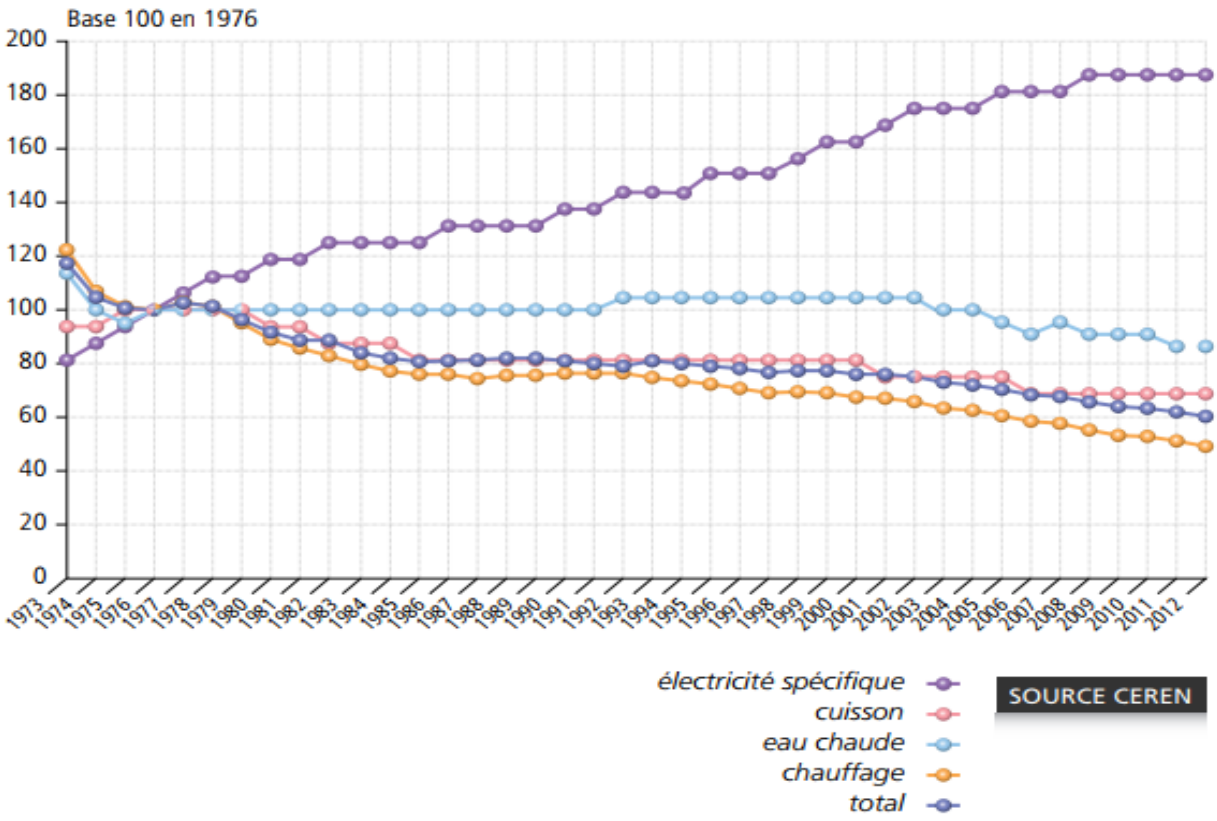


Figure 1.3: Évolution des consommations unitaires des résidences principales par usage (kWh/m2)
Source : L'ADEME (Chiffres clés du bâtiment)

1.3.3. Le diagnostic de performance énergétique (DPE)

Au 1er janvier 2017, le diagnostic de performance énergétique (DPE) a été réalisé dans 79 % du parc locatif social. La Bretagne, la Normandie et les Pays de la Loire sont les régions qui comptent la plus grande part de DPE réalisés (plus de 9 logements sur 10 ont un DPE réalisé). À l'inverse, en Île-de-France, en Hauts-de-France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur, seulement 72 % des logements ont un DPE réalisé. Lorsque le DPE a été réalisé, les logements se situent principalement dans la classe C ou D en termes de consommation d'énergie (Cf Fig. 4). Concernant l'impact de ces consommations sur l'effet de serre, la plupart des logements se trouvent en classe D ou E (Cf .Fig.5). Globalement, les logements du parc des bailleurs sociaux sont plus performants dans le classement « énergie » que dans le classement « effet de serre ». Dans le premier, 77 % des logements ont une note entre A et D alors qu'ils sont seulement 56 % dans la seconde. Pour les deux types de diagnostic, la part de logements classés de A à D a augmenté entre 2016 et 2017.[6]

[6] Etude n°7 Juillet 2017, Eclairages. « Logement social et transition énergétique : Etude sur la performance énergétique du secteur LMH, p 32.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

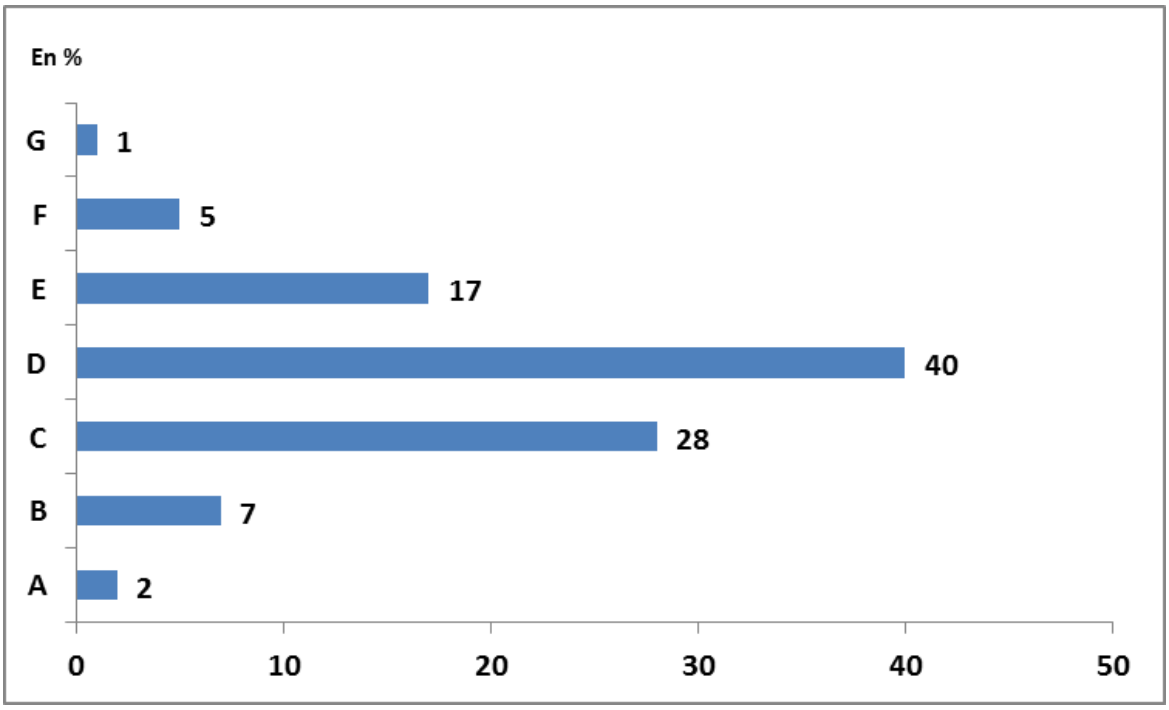


Figure 1.4: DPE au 1er janvier 2017, Classes de consommation d'énergie

Source : SDES, RPLS au 1ER Janvier2017 (Logements du parc social ayant un DPE réalisé)

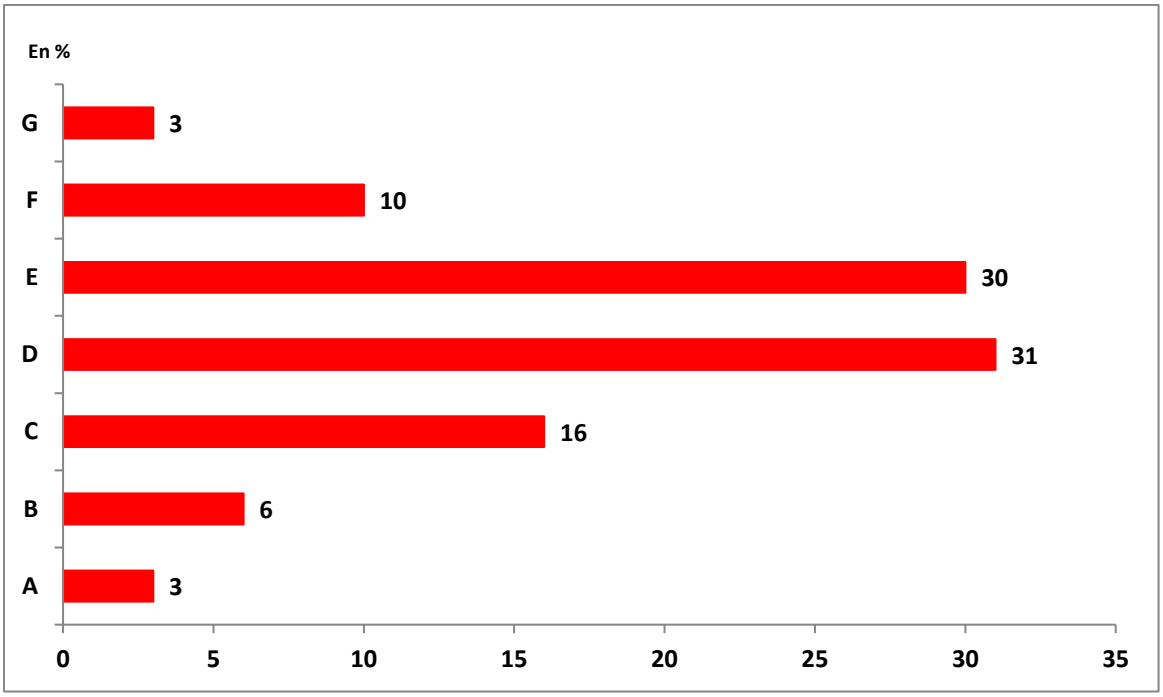


Figure 1.5: DPE au 1er janvier 2017, effet de serre

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

1.3.4. Les dépenses d'énergie

En 2014, les dépenses courantes d'énergie des ménages ont diminué de 7,4 % malgré une hausse du prix de l'énergie de 2 %. Au total, les ménages ont consacré, en 2014, plus de 8 % de leurs dépenses totales à leurs achats d'énergie. S'agissant du chauffage, les ménages ont réduit fortement leur consommation : - 10,7 % en 2014 après + 2,9 %, (eau chaude, cuisson, électricité spécifique inclus). Au niveau des prix, ceux du gaz ont peu varié (– 0,6 % après + 1,3 %). En revanche, le prix de l'électricité augmente toujours vivement (+ 5,7 % après + 6,5 %). Au plan individuel, le budget qu'un ménage consacre à l'énergie de son logement dépend de la surface, de la température ainsi que de la source d'énergie utilisée pour le chauffage. De ce fait, les ménages âgés qui occupent souvent des surfaces importantes relativement à la taille de leur ménage ainsi que les ménages modestes qui ne peuvent pas toujours ajuster leur consommation d'énergie en fonction de leur niveau de vie sont confrontés à des dépenses d'énergie importantes relativement à leur budget. Ainsi la progression des performances énergétiques n'a pas suffi à diminuer, la consommation d'électricité spécifique des particuliers, qui a fortement augmenté depuis les années 1970, à l'inverse des consommations de chauffage. Au développement de nouveaux types d'appareils s'ajoute l'évolution des habitudes de consommation (mise en veille, rechargement d'appareils portables, etc.)[7]

Les ménages ne sont pas uniformes entre les aspects de recherche d'efficacité et sobriété énergétiques. Ils sont liés au niveau de revenu, ainsi, face à une augmentation du prix de l'énergie, les ménages vont principalement opter pour une réduction de leur consommation jusqu'à un certain niveau de revenu, la proportion s'inversant ensuite au-delà au bénéfice de l'investissement en efficacité énergétique. En ce qui concerne les options des ménages sur les moyens les plus efficaces de réduire la consommation d'énergie, la réduction de la température du logement en hiver n'est citée en priorité que par un ménage sur trois alors que le chauffage reste le principal poste de consommation. [8]

Pour réduire durablement les dépenses énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre, deux ensembles législatifs dotés d'objectifs ambitieux et chiffrés se sont dernièrement succédés en France : les lois Grenelle de 2008 et 2009, la loi relative à la transition énergétique de 2015 et les diverses réglementations thermiques.

[7] Commissariat Général au Développement Durable (2015), Bilan énergétique de la France pour 2014, p.28.
[8] Centre d'analyse stratégique (2013), Note d'analyse n°320, Février 2013, p.3.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

1.3.5. La réglementation Thermique

En 2012, le secteur du bâtiment a consommé environ 68 millions de tonnes d'équivalent pétrole soit 44 % de la consommation totale d'énergie finale et a émis près de 23 % de gaz à effet de serre[9]. La maîtrise de la demande en énergie a fait régulièrement l'objet de mesures réglementaires depuis les chocs pétroliers des années 70.

Le logement social est doublement concerné par les mesures de réduction de la consommation. D'une part, le parc social compte un peu plus de 4 millions de logements, d'autre part il est un outil privilégié de la puissance publique en matière d'intervention sur l'habitat. Comme les autres secteurs de l'habitat, la construction des logements sociaux doit désormais répondre à des normes énergétiques très ambitieuses, puisque la consommation d'énergie doit être divisée par trois pour les logements construits après 2013.

Dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, les pouvoirs publics ont fixé un objectif de réduction de 38 % des consommations d'énergie d'ici à 2020 pour le parc des bâtiments existants. L'Union Sociale pour l'Habitat (USH), principale organisme représentatif des bailleurs sociaux, a défini une stratégie d'amélioration de la performance énergétique du parc HLM. Les bailleurs sociaux s'engagent à instaurer un programme de 400 000 rénovations thermiques et énergétiques complètes de logements à partir de 2013 avec un plan particulier pour les 800 000 logements les plus énergivores de leur parc, dont la consommation d'énergie primaire par mètre carré et par an est supérieure à 230 kWh^2 (180 000 logements sociaux rénovés dans les zones relevant du Programme National de Rénovation Urbaine). Les travaux de rénovation prévus ont pour but de ramener la consommation en énergie primaire de tous ces logements à des valeurs inférieures à 150 kWh/m²/an, ce qui correspond à la classe énergétique C. Il était alors estimé que 600 000 logements sociaux consomment entre 231 et 330 kWh/m²/an ce qui est équivalent à la classe E, 150 000 logements entre 331, 450 kWh/m^2/an (classe F) et 50 000 logements plus de 450 kWh/m^2/.an.

1.3.5.1. RT 2012

Avant la RT 2012, les anciennes réglementations thermiques prévoyaient déjà des dispositions pour réguler l'utilisation d'énergie au niveau des bâtiments neufs. Ces normes visaient entre autres le chauffage et la ventilation. Il s'agit essentiellement de celles de 1974, de 1988, de 2000, de 2005.

[9] L'ADEME : Les lois Grenelle et Transition énergétique pour la croissance verte, Janvier 2017, Les réglementations .p.2

© 2018 Tous droits réservés. lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La réglementation thermique 2012 est avant tout une réglementation d'objectifs. Elle comporte trois exigences: le besoin bioclimatique (Bbio), la consommation conventionnelle d'énergie primaire (Cep) et la température intérieure conventionnelle (Tic).

Le besoin bioclimatique caractérise, l'efficacité énergétique du bâtiment. L'exigence de performances énergétiques minimales du bâti est définie par le coefficient « Bbiomax » (besoins bioclimatiques du bâti). Cette exigence impose une limitation simultanée du besoin en énergie pour les composantes liées à la conception du bâti (chauffage, refroidissement et éclairage), imposant ainsi une optimisation séparément des systèmes énergétiques mis en œuvre. Il doit être inférieur à une valeur de référence modulée en fonction du type de bâtiment, de sa localisation géographique, de son altitude et de la surface des logements. Le Bbio prend en compte différentes caractéristiques du projet : l'orientation, le type d'isolation, les apports solaires, le niveau d'éclairage naturel, l'inertie et la compacité afin de définir les besoins du bâtiment en termes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage[10]. Il s'exprime en points et est indépendant de la consommation d'énergie et du type d'énergie utilisée :

$$Bbio \leq Bbiomax \qquad 1.1$$

Bbio : Besoin bioclimatique du bâtiment, en points

Bbiomax : Besoin bioclimatique maximum, en points

Depuis que la première réglementation thermique a vu le jour, la consommation énergétique des constructions neuves a été divisée par 2. La loi a envisagé de la diviser à nouveau par 3 grâce à la RT 2012. Pour atteindre cet objectif, et conformément à l'article 4 de la loi Grenelle 1, le plafond des consommations conventionnelles d'énergie primaire s'élève à 50 kWhEP/(m².an) pour les logements individuels et 57,5 kWhep/(m².an) pour les logements collectifs, valeur moyenne du label « bâtiments basse consommation » (BBC), qui est devenu la référence dans la construction neuve. Cette valeur est modulée selon la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements et les émissions de gaz à effet de serre. Cette initiative a permis de tracer le chemin vers des bâtiments passifs (BEPAS) et permettra d'arriver en 2020 à des bâtiments énergie positive.

[10] Site de la Direction Générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature, Réglementation Thermique 2012 : Un saut énergétique pour les bâtiments neufs.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Comme dans la réglementation thermique 2005, l'exigence de consommation conventionnelle d'énergie primaire « Cep », portant sur les consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et d'autres équipements (pompes et ventilateurs) ne doit pas dépasser le seuil de «Cepmax ».

$$Cep \leq Cepmax \qquad 1.2$$

Cep : Consommation conventionnelle en énergie primaire, kWhep/(m².an) ·

Cepmax : Consommation conventionnelle maximale en énergie primaire, kWhep/ (m².an)

La RT 2012 définit des catégories de bâtiments dans lesquels il est possible d'assurer un bon niveau de confort en été sans avoir à recourir à un système actif de refroidissement. Pour ces bâtiments, la réglementation n'impose que la température conventionnelle intérieure notée « Tic » la plus chaude atteinte dans les locaux, au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été ne doit pas excéder une température intérieure conventionnelle de référence « Tic réf ».

$$Tic \leq Ticref \qquad 1.3$$

Tic : Température intérieure conventionnelle, °C ·

Ticref : Température intérieure conventionnelle de référence, °C

Selon l'article 6 de l'arrêté du 26 octobre [JORF 2010] : « La température intérieure conventionnelle d'un local, atteinte en été, est la valeur maximale horaire en période d'occupation de la température opérative. Pour le résidentiel, la période d'occupation considérée est la journée entière. » Le calcul de la Tic est effectué à travers le moteur de calcul Th B-C-E. Cette méthode utilise comme données d'entrée tous les éléments descriptifs du bâtiment et de ses équipements qui sont définis de façon opposable. Les éléments apportés après la réception du bâtiment ainsi que les paramètres indépendants du bâtiment intervenant dans la méthode sont définis de façon conventionnelle : Elle est calculée en utilisant des données climatiques conventionnelles pour chaque zone climatique et des données relatives à l'occupation et l'usage des bâtiments.

À l'heure actuelle, c'est le seul critère permettant de gérer le confort d'été dans les bâtiments. Cependant des travaux du C.S.T.B ont été réalisés pour réévaluer et introduire un nouveau paramètre nommé : la Durée d'Inconfort d'Été Statistique (D.I.E.S.). Ce paramètre prend en compte la durée et l'intensité de l'inconfort et pas simplement le dépassement de seuil ainsi que le temps d'occupation du bâtiment. D'après [Caccavelli 2014], il s'agit de définir une zone de

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

confort (qui est adaptative en fonction de la température extérieure) et préciser la situation de l'occupant au pas de temps horaire par rapport à la zone d'inconfort, ensuite évaluer statistiquement le niveau d'inconfort des occupants. Enfin la DIES permet de calculer par intégration le pourcentage d'insatisfaits sur la période étudiée.

Avec le temps, des améliorations ont été apportées à cette norme. L'éclairage, la production d'eau, la climatisation, le chauffage, la ventilation, sont autant de domaines qui ont nécessité des réflexions plus approfondies. La nouvelle norme isolation a pour objectif d'aller au-delà des propositions de la norme de 2012 et de celles qui l'ont précédé tout en conduisant davantage vers une meilleure restriction en matière d'utilisation d'énergie. Cette norme préconise que la consommation d'énergie dans les bâtiments neufs n'excède 30 kWh/m²/an. Cette exigence nécessite la mise en place de certaines règles pour favoriser la pérennité de l'immeuble. A cet effet, les règles d'isolation doivent être rigoureusement suivies afin d'éviter que les coûts d'entretien à long terme ne soient élevés. La Réglementation thermique 2015 a le mérite d'établir un label écologique. Afin d'obtenir le label BBC, il faut respecter certains critères. Il s'agit entre autres de l'intégration de l'électricité photovoltaïque ou du choix des avantages hygrothermiques du bois.

En 2020, une nouvelle réglementation thermique sera mise en application. Elle remplacera l'actuelle RT 2012 en termes d'exigences et de normes énergétiques pour les bâtiments, notamment pour la construction de logements. L'objectif principal de la RT 2020 est d'atteindre un niveau passif en termes de consommation énergétique. Tous les bâtiments construits après 2020 seront des Bâtiments à Energie Positive (BEPOS). Ils seront incités à consommer autant d'énergie qu'ils n'en produisent, ou même, de produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Concrètement, l'objectif énergie passive ou positive se traduit par des normes renforcées pour cette prochaine réglementation thermique qui instaure que la consommation de chauffage ne devra pas dépasser les 12 kWhep /m²/an et la consommation globale, comprenant chauffage, électricité et production d'eau chaude sanitaire, devra être obligatoirement inférieure à 100 kWhep /m²/an. Cette performance énergétique sera assurée par une isolation et une ventilation efficace. La production énergétique issue du

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

renouvelable (solaire, géothermie, éolien,…) devra couvrir les besoins en énergie du bâtiment pour atteindre un bilan passif [11] .

1.3.5.2. Retours d'expériences

Les bâtiments dits performants représentent un réel enjeu. Nous pouvons déduire deux constats majeurs : premièrement, la problématique fondamentale du confort d'été demeure indénouable, et les consommations énergétiques prévues ne concordent pas avec la réalité économique. Chaque projet est un prototype qui a ses propres spécificités, pour cela et afin de respecter les exigences de la réglementation thermique 2012, les concepteurs utilisent les logiciels de thermique dynamique pour modéliser le bâtiment et effectuer des choix performants en termes de conception et de technologie. Il est ainsi défini une consommation conventionnelle du bâtiment suivant une multitude d'hypothèses : la météo, l'occupation des différentes pièces et les charges internes. De même, la modélisation du bâtiment se fait à partir de la définition des caractéristiques des matériaux et d'une mise en œuvre adéquate.

En phase d'exécution, de nombreux facteurs peuvent perturber les estimations de consommations énergétiques [Spitz 2012]. La consommation conventionnelle permet d'effectuer une comparaison entre les différents bâtiments, mais ne constitue pas une base pour définir les économies potentielles. La définition d'une consommation prévisionnelle est primordiale. Se basant sur des hypothèses plus réalistes comme la météorologie du site d'étude, l'occupation définie, l'intégration des postes de consommation non-réglementaires…), la consommation prévisionnelle peut s'approcher de la réalité[12]. Mais durant la phase d'exploitation, une mauvaise exploitation des systèmes peut entraîner des écarts importants de consommation énergétique et de confort.

Les bâtiments B.B.C. répondent en majeure partie à la problématique du confort d'hiver. En effet, les consommations de chauffage impactent de manière directe la consommation énergétique dans des bâtiments non performants. Diverses solutions ont été développées pour réduire cette consommation. [Maugard 2013] expose les difficultés rencontrées face au confort d'été et de demi-saison dans son rapport sur les retours d'expériences des bâtiments

[11] Source : Le site de L'ADEME : Les lois Grenelle et Transition énergétique pour la croissance verte, Janvier 2017, Rubrique réglementations

[12] Source : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, et Institut Français pour la Performance énergétique du bâtiment : Mieux comprendre les notions de consommations réglementaires, prévisionnelles et réelles, 2012, Annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

performants. Les problèmes liés au niveau d'étanchéité à l'air semblent plus importants, car si les systèmes de ventilation ne sont pas bien conçus, la qualité de l'air peut alors être impactée mais aussi le confort thermique puisque l'air chaud à l'intérieur des logements n'est pas ventilé. Des mesures sur le terrain montrent que les consommations mesurées sont supérieures à celles prévues d'un facteur moyen 2,5 et pouvant aller jusqu'à 8 [Thellier et al. 2012].

1.4. Le confort thermique dans le bâtiment

Le confort thermique dans le bâtiment représente une exigence essentielle. Une meilleure prise en compte du confort thermique dès la conception augmenterait la précision des prévisions de consommation énergétique [Vorger 2014]. Par exemple, des effets rebonds (qui se manifestent à travers une exigence d'une température interne plus élevée notamment) observés dans des bâtiments basse énergie n'apparaissent que dans les situations où les occupants ne sont pas satisfaits du confort [Greening et al. 2000]. Ceci nécessite une meilleure compréhension du phénomène de confort thermique. Le corps humain interagit avec son environnement à travers des échanges de chaleur (latents et sensibles) et régule sa température par « des processus thermo-physiologiques involontaires qui modulent la production et le transfert de masse et de chaleur, internes et externes » [Thellier et al. 2009]. En parallèle, si par cette adaptation inconsciente, le corps humain peine à maintenir sa température centrale à 37°C, la sensation d'inconfort persistante pousse l'individu à modifier son comportement et à agir sur son environnement pour y remédier [Frontczak et Wargocki 2011]. Dans cette partie nous abordons le confort thermique dans les bâtiments, nous présentons en premier lieu le bilan thermique du corps humain dans son environnement et l'aspect psychologique du confort, puis deux méthodes d'évaluation du confort, l'approche rationnelle et l'approche adaptative.

1.4.1. Le bilan thermique

Le métabolisme est l'ensemble des transformations moléculaires et énergétiques qui se déroulent de manière ininterrompue dans l'organisme vivant. Dépendant de l'activité, l'énergie correspondante est transformée en travail et en chaleur.

La thermorégulation est un phénomène dynamique qui repose sur des thermorécepteurs internes et cutanés sensibles au chaud ou au froid. Le cerveau traite les informations recueillies et, face à un déséquilibre, déclenche des mécanismes de lutte inconscients (vasodilatation,

© 2018 Tous droits réservés. lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

transpiration ou au contraire vasoconstriction et frissons) ou conscients (comportementaux)[Candas 1998].

Le corps est en état de neutralité thermique si les réactions pour atteindre l'équilibre thermique sont minimales [Parsons, 2003]. Cette situation idéale correspond à une température d'ambiance comprise entre 20° et 26°C selon l'habillement [Allab, 2017]. Si au contraire les réactions thermo-physiologiques ne parviennent pas à établir l'équilibre thermique et que sa température corporelle centrale devient supérieure à 38°C ou inférieure à 35°C, alors le corps est dans une situation d'hyper ou d'hypothermie, potentiellement dangereuse [Narçon, 2001].

Le corps humain et son environnement échangent de la chaleur sensible et latente suivant différents modes de transferts. L'importance relative des différents modes d'échange dépend de plusieurs paramètres (habillement, température de l'air, température radiative, vitesse et humidité de l'air)

La chaleur métabolique produite dans le corps peut être stockée dans celui-ci, induisant une élévation de la température interne, ou dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire. Le bilan thermique du corps s'écrit de la façon suivante [ASHRAE 1997] :

$$M - W = Qsk + Qres + S \qquad 1.4$$

$$= (C + R + K + Esk) + (Cres + Eres) + Ssk + Sc$$

Avec :

M = taux du métabolisme,

W = travail externe,(W/m²)

Qres = flux de chaleur échangé par voie respiratoire,(W/m²)

Qsk = flux de chaleur échangé à la surface cutanée, (W/m²)

Cres = flux de chaleur échangé par convection respiratoire,(W/m²)

Eres = flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire,(W/m²)

C = flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface du peau, (W/m²)

R = flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface du peau, (W/m²)

K = flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface du peau,(W/m²)

Esk = flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface du peau,(W/m²)

Scr = taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, (W/m²)

Ssk = taux de chaleur stockée dans la peau, (W/m²)

[ASHRAE 1997] définit le confort thermique comme « un état de satisfaction du corps vis-à-vis d'un environnement thermique donné ». Cette définition insiste à juste titre sur le caractère éminemment subjectif du confort thermique, au-delà des aspects purement physiques intervenant dans la définition du confort thermo-physiologique.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Rohles [Rohles 1981] a observé dans le cadre de ses études en chambres climatiques, que le sentiment de confort ne dépend pas uniquement des conditions physiques. Sous des conditions climatiques identiques, les sujets ont plus chaud dans une pièce décorée que dans une pièce vide. De même, ils ont plus chaud si on leur indique, à tort ou à raison, que le chauffage est allumé. Par ailleurs, si on leur indique que la température est de 23°C, alors les sujets ressentent sensiblement la même chose, que la température réelle soit de 23, 22, 21 ou 20°C.
Plusieurs études indiquent que le sentiment de contrôle accroît la sensation de confort. [Leaman et Bordass 1999] observent une tolérance supérieure des occupants dans les bâtiments qui proposent de bonnes opportunités de contrôle aux occupants. A contrario, quand les opportunités d'adaptation sont restreintes, tout éloignement des conditions de confort entraîne de l'insatisfaction et du stress [Bodart et Evrard 2011]. Les résultats de ce type, simultanément à [Haldi et Robinson 2011] plaident plutôt en faveur d'une approche adaptative du confort comme nous le verrons par la suite. En effet, l'approche rationnelle ou analytique ne prend pas en considération les opportunités dont dispose l'occupant pour modifier son environnement. Son objectif est de quantifier le confort thermique sous des conditions instantanées parfaitement connues du climat de l'environnement ainsi que de l'habillement et de l'activité de l'occupant.

1.4.2. Evaluation du confort thermique

1.4.2.1. Approche analytique

L'approche analytique permet de déterminer analytiquement le confort thermique en termes de transferts thermiques physiques et physiologiques. Le modèle PMV « Predicted mean vote », proposé par [Fanger 1967] est le plus connu ; il est utilisé dans la réglementation française (notamment par la norme ISO 7730, 1994). Le modèle est basé sur la corrélation du bilan thermique et le vote de confort moyen dans des conditions thermiques données. Les corrélations sont obtenues grâce à des expériences sur près de 1300 sujets, parfaitement décrits en termes de métabolisme et d'activité, sont exposés à un environnement maîtrisé en chambre climatique. Ils sont emmenés à choisir sur une échelle composée de 7 expressions (de « très froid » à « très chaud » en passant par « confortable ») celle qui caractérise le mieux leur sensation. A chacun de ces termes est associée une valeur entière allant de -3 pour « très froid » à +3 pour « très chaud » en passant par 0 pour « confortable »[AFNOR 1995]. Des abaques du PMV ont été réalisés. Le standard ASHRAE utilise six variables pour caractériser l'équilibre thermique [Olesen 2004] :

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

- Les facteurs liés à la personne : Le métabolisme du corps lié à l'activité et la vêture
- Les variables environnementales : la température de l'air, la température des parois, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air

Pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique, le PMV est lié à l'indice PPD. Proposé également par Fanger. Les personnes insatisfaites sont considérées celles dont le vote de sensation est extérieur à l'intervalle [-1,1]. Cet indice fournit une information complémentaire de celle du PMV puisque des votes de signes contraires peuvent « effacer » des insatisfactions. Le PPD n'atteint jamais 0 %, illustrant le fait qu'aucune condition n'est jugée optimale par l'intégralité de la population. Fanger a calculé une valeur minimale de 5 %, mais [Brager 1992] puis [Nicol and Humphreys 2009] proposent des valeurs supérieures à 10% (de l'ordre de 12 % et 14 % respectivement).

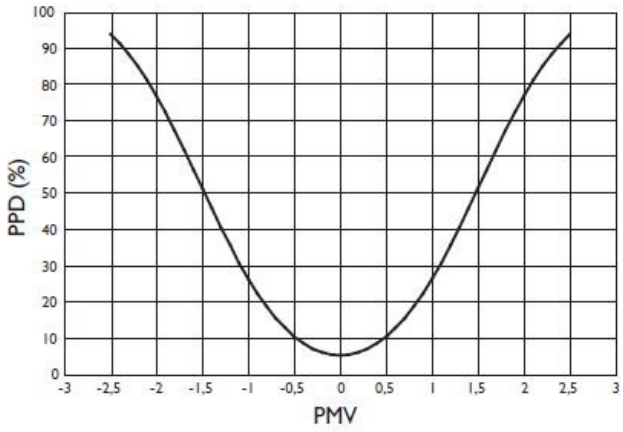


Figure 1.6: Pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) en fonction du vote moyen prédit (PMV) sur l'échelle de l'ASHRAE ISO7730

La méthode analytique a été validée dans de nombreuses configurations.[Nicol and Humphreys 2002] estiment que le vote de confort n'est pas mieux prédit, en pratique, par les indices rationnels que par des indices simples tels que la température seule. En addition, il est délicat de connaitre l'activité et l'habillement des occupants qui sont des données indispensables pour obtenir les indices PPD et PMV. Certains paramètres de l'environnement sont difficiles à mesurer en temps réel. Les deux chercheurs insistent sur la différence entre les bâtiments ventilés naturellement (qui ont des plages de confort plus larges) et ceux équipés de l'air conditionné. [Taleghani et al. 2013] comptabilisent treize études faisant état de différences dans les températures de confort entre ces deux types de bâtiments. Le modèle est statique et selon de [De Dear and Brager 1998], il regarde les occupants comme des récepteurs passifs de leur environnement, tandis qu'eux suggèrent que les occupants devraient pouvoir agir pour modifier l'environnement selon leurs préférences. [Nicol and Humphreys 2002] constatent des

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

plages de confort en réalité plus larges que celles prévues par l'approche PMV, en déduisent également que cela est dû à une adaptation des sujets à leur environnement.

1.4.2.2. Approche adaptative

L'hypothèse fondamentale de l'approche adaptative peut-être énoncée ainsi : « si un changement arrive dans un environnement en provoquant un inconfort, les personnes répondront par des réactions qui tendent à rétablir le confort » [Humphreys, et al. 2007] . Les méthodes adaptatives prennent en compte les facteurs physiologiques, physiques, et psychologiques et ont été élaborés suite à des enquêtes et des études menées sur le terrain. Elles se basent sur le fait que l'être humain est un élément actif face à son environnement thermique. Il reçoit des informations thermiques parvenant des différents capteurs situés sur le corps et réagit en conséquence pour trouver sa température de confort. Les méthodes adaptatives ne prévoient pas une réponse de confort mais plutôt des conditions statiques qui déclenchent des réponses physiologiques modifiant l'état de confort ou d'inconfort de l'individu. La disparité entre les résultats donnés par les indices et ceux donnés par les enquêtes de terrain a amené à la notion de démarche adaptative. Il s'agit d'une méthode empirique focalisée sur les températures intérieures et extérieures et basée sur des enquêtes de terrain dans lesquelles les jugements thermiques sont mesurés par le biais de questionnaires pendant que les occupants effectuent leurs activités habituelles. Les votes des occupants sont souvent relevés sur des échelles de vote type ASHRAE ou Bedford. Les variables des ambiances intérieures et extérieures sont mesurées lors de ce type d'enquête. L'adaptation des occupants comprend trois catégories [De Dear and Brager 1998] . Selon l'échelle de temps considérée, elle peut être comportementale, psychologique ou physiologique. Les réactions comportementales sont quasi instantanées. Elles peuvent être de deux types :

- Celles par lesquelles l'occupant s'ajuste à l'environnement pour améliorer son confort par changement de posture, déplacement, modification de la vêture et consommation de boissons chaudes ou froides
- Celles par lesquelles l'occupant modifie son environnement thermique par ouverture/fermeture des fenêtres et des portes, action sur occultations (stores, rideaux…), utilisation de l'éclairage artificiel, modification de la consigne de chauffage ou de climatisation et usage de ventilateurs.

Ces ajustements comportementaux jouent un rôle important dans l'acceptabilité des ambiances et le maintien du confort thermique.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Tableau 1.2: Echelle de caractérisation de la sensation thermique

L'échelle de Bedford	L'échelle de l'Ashrae
1 : Très froid	-3 : Très froid
2 : Froid	-2 : Froid
3 : Confortablement froid	-1 : Légèrement froid
4 : Confortable (ni froid, ni chaud)	0 : Neutre (ni chaud, ni froid)
5 : Confortablement chaud	+1 : Légèrement chaud
6 : Chaud	+2 : Chaud
7 : Très chaud	+3 : Très chaud

Température de confort en fonction de la température extérieure

Le modèle adaptatif annonce une température de confort, qui est définie par [Nicol et Humphreys 2009] comme « la température opérative à laquelle soit la personne moyenne serait neutre thermiquement, soit la majorité d'un groupe de personnes serait confortable », en fonction d'une moyenne glissante ou d'une moyenne mensuelle de la température extérieure. Les actions d'adaptation de l'occupant (posture, vêture, contrôles…) sont supposées dépendre de la température extérieure [Nicol et al. 1999]. C'est la rétroaction entre le climat et ces actions adaptatives qui permettent de ne prendre en compte que la température extérieure [Nicol et Humphreys 2002] Cependant, et c'est la limite majeure de ce modèle, les températures intérieure et extérieure sont découplées dans les bâtiments dont l'ambiance est fortement contrôlée. La relation entre température de confort et température extérieure est bien plus complexe.

Le confort adaptatif a été principalement modélisé par deux études internationales. Il s'agit du projet RP-884 mené par [De Dear, Brager, et Cooper 1997] , et du projet européen SCAT's (Smart Control And Thermal Comfort) réalisée par [McCartney et Nicol 2002] qui est aujourd'hui la base de la réglementation européenne EN 15251 [AFNOR 2007].

1er modèle adaptatif intégré dans le standard ASHRAE

[De Dear et Brager 2002] ont proposé un modèle PMV adaptatif dans lequel la température de confort est exprimée en fonction de la moyenne mensuelle de la température extérieure effective en distinguant deux catégories de bâtiments : chauffés et climatisés, ou non. Le modèle pour

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

les bâtiments à environnement contrôlé utilise une correction sémantique puisque dans ces bâtiments, les occupants ont une préférence pour les températures inférieures plus que la température de neutralité thermique en été et supérieures en hiver. Deux zones d'acceptabilité (80 % et 90 % de satisfaction), correspondant à des encadrements de la température de confort, sont déterminées d'après l'expression du PPD en fonction du PMV telle que proposée par [Fanger,1967] dans la méthode analytique. Celles des bâtiments naturellement ventilés et dépourvus de système de climatisation sont plus larges (d'environ 70 %) que celles des bâtiments climatisés, ce qui confirme l'hypothèse adaptative.

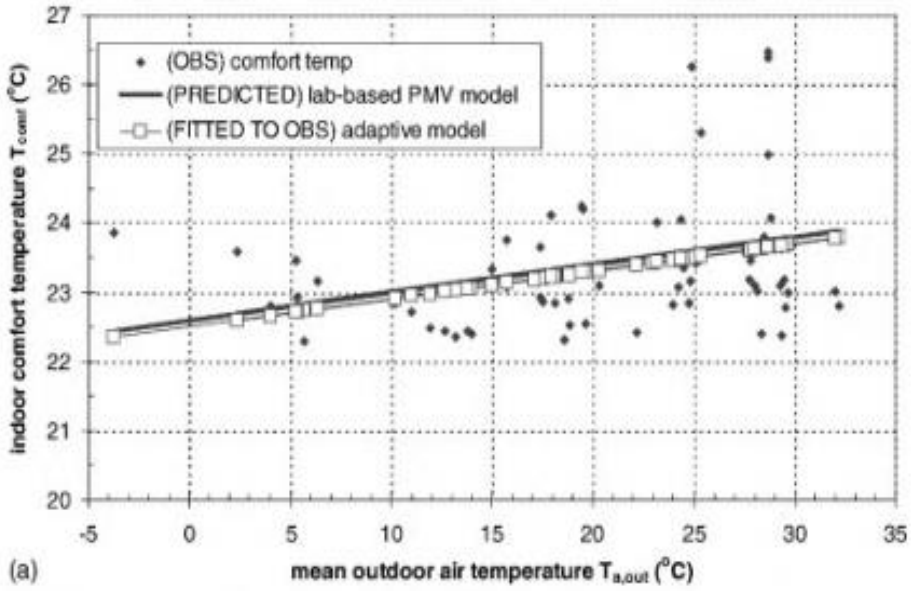


Figure 1.7: Comparaison des résultats obtenus par l'indice PMV et des observations issues d'enquêtes de terrain (a) bâtiment climatisés

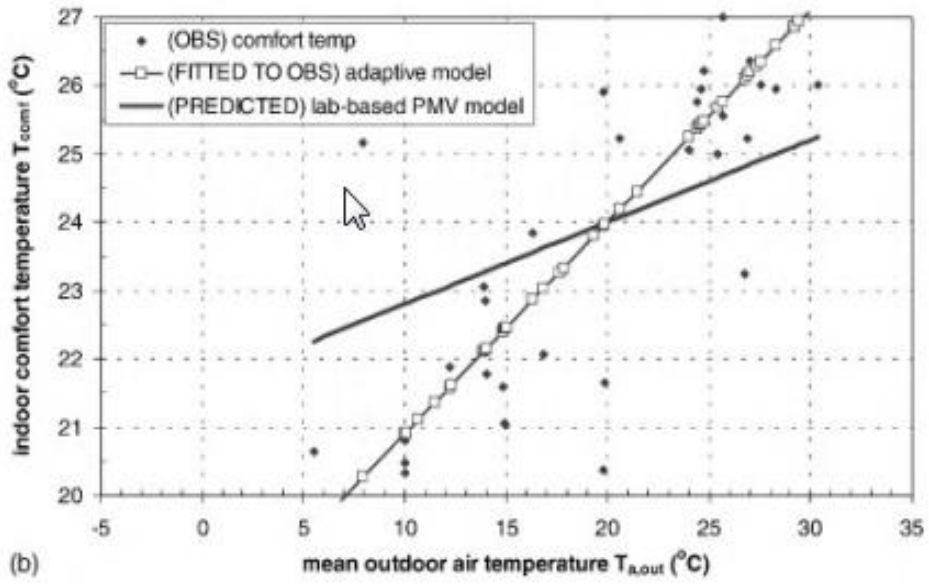


Figure 1.8: Comparaison des résultats obtenus par l'indice PMV et des observations issues d'enquêtes de terrain (b) bâtiments naturellement ventilés [De Dear & Bragger]

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

2ème modèle adaptatif intégré dans le Standard CEN (norme EN15251)

Le projet européen SCATs a porté sur l'étude du confort de 26 bâtiments de bureaux principalement situés en Europe et dont certains étaient naturellement ventilés. Les résultats du projet ont servi de base à la norme européenne EN 15251 dont les critères recommandés pour l'ambiance thermique s'inspirent des travaux de [McCartney et Nicol 2002] pour définir les températures opératives nécessaires pour que des conditions de confort thermique soient respectées dans des bâtiments non climatisés. Les deux réglementations font une différence de confort entre les bâtiments naturellement ventilés et ceux qui sont climatisés/chauffés. Le climat extérieur conditionne le comportement des individus. Ainsi en hiver, les individus sont plus vêtus et ont tendance à manger plus chaud. Le confort adaptatif relie donc la température intérieure de confort à la température extérieure, qui peut être modulée avec celle des jours précédents. [Bonte 2014] montre qu'il existe de nombreuses études qui tentent de définir une température de confort sur la base de l'équation suivante :

$$\boldsymbol{TC} = \alpha \times Text + \beta \qquad 1.5$$

TC : Température intérieure de confort optimal, °C ·

Text : Température extérieure, °C ·

α et β *: Constantes, respectivement sans unité et °C.*

[McCartney et Nicol 2002] ont adapté l'équation précédente en vue de définir la température de confort dans les bâtiments naturellement ventilés en Europe. Il en ressort une relation différente pour chaque pays. Pour la France l'équation suivante a été proposée :

$$Pour\ TRM7 \leq 10\ °C \quad TC = 0{,}049 \times TRM7 + 22{,}58 \qquad 1.6$$
$$Pour\ TRM7 > 10°C\ TC = 0{,}206 \times TRM7 + 21{,}42$$

TC : Température intérieure de confort optimal, °C ·

TRM7 : Température extérieure en moyenne glissante journalière sur 7 jours calculée selon l'équation [Éq. 7], °C

Pour le calcul de la température extérieure en moyenne glissante journalière sur sept jours (TRM7), l'équation suivante est proposée :

$$TRM7 = [\theta{-}1 + 0{,}8.\ \theta{-}2 + 0{,}6.\ \theta{-}3 + 0{,}5.\ \theta{-}4 + 0{,}4.\ \theta{-}5 + 0{,}3.\ \theta{-}6 + 0{,}2.\ \theta{-}7\ ]/3{,}8 \qquad 1.7$$

TRM7 : Température extérieure en moyenne glissante journalière sur 7 jours, °C ·

θ -1 à θ-n : Température moyenne journalière des jours J-1 à J-n, °C

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

1.5. L'occupant et sa relation avec le bâtiment

La littérature compte de nombreuses recherches qui mettent en évidence la relation occupant - bâtiment. [Calì et al. 2016] ont mené une recherche sur des bâtiments au sud de l'Allemagne construits à la fin des années 1950, qui ont été rénovés avec sept méthodes différentes. Les résultats de ce travail ont montré que des modèles du comportement de l'occupant peuvent mener à une meilleure prédiction de la performance énergétique du bâtiment. En 2017, dans la même direction [Sun and Hong 2017] introduisent une approche de simulation pour estimer le taux d'économies d'énergie potentielles à travers les mesures du comportement des occupants. Les principaux résultats de cette étude montrent que l'ajustement des équipements peut réaliser jusqu'à 41% d'économie d'énergie. L'étude menée par [Ahn et Park 2016] n'a pas montré de forte corrélation entre le comportement de l'occupant et la consommation d'énergie, sauf dans le cas où les équipements sont contrôlés par les occupants. Autrement dit la consommation énergétique est influencée par l'action de l'occupant pour contrôler les systèmes de chauffage et de refroidissement.

La relation entre le comportement de l'occupant et la consommation de l'énergie est complexe. En conséquent, la plupart des recherches sur cette thématique adoptent les méthodes probabilistes. [Fabi et al. 2013] soulignent que l'écart entre la consommation énergétique simulée et réelle est un résultat des méthodes déterministes utilisées dans les simulations. En 2001, l'idée de construire des modèles comportementaux probabilistes dans des logiciels de simulation de bâtiment a été introduite par [Nicol 2001]. Les résultats de plusieurs enquêtes lui ont permis d'établir des corrélations entre les conditions climatiques extérieures et l'utilisation de certains contrôles (chauffage, ventilateurs et fenêtres). Ces corrélations prennent en compte l'acclimatation de l'occupant, cela crée un problème majeur : Le fait de corréler des actions avec le climat aboutit à l'omission totale des caractéristiques du bâtiment que l'on souhaite simuler. Ces corrélations sont le plus souvent marquées par de faibles coefficients. Néanmoins, plusieurs travaux ont repris cette logique inductive. En 2005, un algorithme de simulation basé sur des mesures réelles a été proposé par [Reinhart, 2005]. Nommé Lightswitch-2002, il permet de prédire les interactions des personnes avec l'éclairage et les stores de leurs bureaux. Les entrées de l'algorithme sont les profils annuels d'occupation de ces usagers et l'éclairage du plan de travail. Un an après, dans le cadre de ses travaux de thèse, [Bourgeois, 2005] aboutit au premier modèle comportemental multi-physique combinant thermique et éclairage grâce au logiciel de simulation Esp-r. Cet algorithme appelé SHOCC (Sub Hourly Occupancy Control)

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

se base sur la combinaison de 3 modèles existants : le premier est le modèle adaptatif de [Nicol 2001] basé sur les opérations sur les fenêtres, le deuxième est le modèle de [Reinhart 2004] permettant de prédire les opérations sur l'éclairage, et celui de [Tabak et al. 2006] en troisième, relatif à la modélisation de l'occupation.

En 2007, [Page 2007] établit une série de modèles visant à prédire la présence d'occupants ainsi que leurs interactions avec leurs logements et leur impact sur la consommation d'énergie. Ces modèles sont basés sur des lois probabilistes reposant sur l'utilisation de chaînes de Markov inhomogènes autrement dit sur les probabilités de transitions d'états dépendant du temps. Les lois de probabilités sont déterminées à partir de données collectées sur plusieurs années de mesures, et plusieurs centaines d'habitations. Elles servent ensuite à prédire la présence des occupants, l'utilisation générale d'appareils et du système d'éclairage, l'ouverture des fenêtres et la production de déchets à l'échelle de quartiers.

En 2004, [Endravadan et al. 2004] élaborent un modèle déterministe de comportement adaptatif baptisé GBR model (Global Behavioural Regulator model). La sensation thermique d'un occupant est calculée dans le logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS, en se référant à l'indice PMV de Fanger. En fonction de la valeur de ce dernier, l'occupant peut opérer sur la température de consigne du chauffage et ajuster sa vêture. L'objectif de cet algorithme est de prédire la consommation de chauffage résultant du comportement de l'occupant selon qu'il soit soucieux ou pas de sa consommation d'énergie.

En 2011, [Andrews et al. 2011] présentent un Framework basé sur l'ABM. Il est destiné à prédire la performance énergétique d'un bâtiment en tenant en compte les comportements réels des occupants. Ils modélisent les opérations sur l'éclairage de plusieurs occupants ayant des profils différents tels que "activiste écologique" ou "utilisateur normal", qu'ils ont déterminés grâce à des questionnaires dans une enquête préliminaire. En 2013, [Langevin et al. 2013] modélisent divers profils d'occupants en se basant sur leur utilisation de plusieurs contrôles. Afin de prédire l'utilisation du chauffage, de ventilateurs et des fenêtres, ils calibrent leur système à partir d'observations expérimentales. Ils distinguent 3 approches pour la modélisation du comportement de l'occupant : La plus ancienne est celle qui lie le comportement au climat extérieur, ensuite celle qui lie le comportement à l'ambiance intérieure du bâtiment telles que [Haldi et Robinson 2011] et enfin l'approche la plus récente qui considère l'occupant comme pilier de base, et repose sur la modélisation des différences interindividuelles et prend en compte le confort comme moteur d'action pour agir sur la consommation d'énergie. Nous constatons que les modèles comportementaux récents omettent les spécificités du bâtiment modélisé : la majorité des modèles sont issues des données expérimentales.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

1.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté une synthèse bibliographique sur les problématiques du logement social en France. Cette analyse montre tout l'intérêt de ce secteur à la fois social, économique et environnemental. En effet, ce secteur représente près de 19% de logement en France. Tout en hébergeant différentes catégories sociales, il s'adresse en particulier aux locataires à faibles revenus. Compte tenu de l'ancienneté de ce secteur, il souffre des problèmes liés à la surconsommation d'énergie et au cadre de vie. La précarité énergétique est particulièrement importante.

Le confort de l'usager constitue un aspect important, et peut être une source d'insatisfaction ou de mauvais usage des équipements. Ceci pose aussi la difficulté d'interaction occupant – logement.

Afin de pouvoir optimiser les consommations d'énergie dans le logement social tout en assurant le confort réglementaire, il est nécessaire de suivre les paramètres de confort et de consommation dans des bâtiments occupés. On propose dans les chapitres suivants de présenter une synthèse d'une expérimentation réalisée avec Lille Métropole Habitat pour bien comprendre les paramètres de confort, et par la suite d'évaluer les économies potentielles à réaliser.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Chapitre 2

Suivi des conditions de confort et des consommations dans des logements occupés : Présentation du site d'étude

2.1. Introduction

Afin de comprendre les économies potentielles à réaliser dans un parc de logement social tout en assurant les conditions de confort, nous avons réalisé une expérimentation dans un parc de logement social pour suivre les paramètres de confort dans des logements occupés ainsi que la consommation d'énergie. Nous présentons dans ce chapitre le site d'expérimentation avec un focus sur le diagnostic thermique et les consommations énergétiques. Nous détaillons par la suite les critères du dispositif expérimental ainsi que le protocole mis en place pour suivre les paramètres de confort dans trois appartements occupés.

2.2. Présentation générale du site d'expérimentation

L'étude a été réalisée dans une résidence du bailleur social LILLE METROPOLE HABITAT (LMH) à Villeneuve d'Ascq, dans le nord de la France. La ville est soumise à un climat tempéré océanique, les amplitudes thermiques saisonnières y sont faibles. Cette résidence a été retenue pour sa simplicité et la disponibilité des informations techniques. La résidence a été mise en service en 1973. Par la suite, elle a fait l'objet des travaux de rénovation. La plus importante a eu lieu entre septembre 2011 et avril 2012.

La résidence choisie, abrite cinquante logements collectifs (du T2 au T4). Elle est composée de deux bâtiments avec deux entrées distinctes : Le premier bâtiment (R+3) est composé de quinze logements ; le deuxième (R+8) comporte trente-cinq logements.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Figure 2.1: Localisation du site expérimental

2.2.1. La résidence avant la réhabilitation

Les façades et le plancher sont en béton armé avec des épaisseurs de 25 cm et de 20 cm, respectivement. Le rez-de-chaussée est conçu sur un vide sanitaire de 5 cm. Les façades et le plancher bas ne sont pas isolés, contrairement à la toiture qui est isolée avec une couche de 6 cm de polyuréthane.

1973 **2012**

Figure 2.2: Photographies de la Résidence TENNIS avant et après la réhabilitation

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Le système de chauffage est assuré par une chaudière à gaz collectif d'eau chaude sanitaire. Les logements sont équipés par des radiateurs avec des robinets simples et ventilés par des VMC auto réglables.

Plusieurs travaux ont été réalisés au sein de la résidence avant l'importante réhabilitation effectuée en 2012. Le tableau 2.1 présente une synthèse des travaux réalisés.

Tableau 2.1: Travaux réalisés avant la réhabilitation

Date	Travaux réalisés
1985 & 1990	Remplacement des menuiseries bois par PVC
1992	Réfection des peintures des parties communes
2000	Remplacement des portes palières logements
2004	Remplacement des groupes VMC, nettoyage complet du réseau horizontal et vertical
	Réfection des étanchéités des terrasses
2005	Remplacement complet des sanitaires et colonnes EU/EV
	Réfection complète de l'installation électrique des logements
	Remplacement des portes accès immeubles et du contrôle d'accès
	Réfection des peintures parties communes du bâtiment 1
	Remplacement des batteries de boîtes aux lettres

2.2.2. Réhabilitation 2012

Durant les travaux de réhabilitation, les bâtiments ont été isolés par l'extérieur avec la laine minérale 60 *(•=0,032W/m² -R=1,875m²K/W)*. La chaudière a été remplacée par une chaudière collective à condensation de type Viessmann Vitocrossal 200 CM2-311/285 kW *(Pn=285 kw)* avec un système de régulation à combustible liquide ou gazeux permettant un suivi des consommations et des gains énergétiques grâce à des compteurs de chaleur. Les logements ont été équipés par des radiateurs de chaleur douce munis de vannes thermostatiques. Toutes les ouvertures vitrées ont été dotées du double vitrage 4/16/4 : vitrage peu émissif avec du gaz argon avec les caractéristiques suivantes *Uw = 1,5 W/m²K - Ujn = 1,3 W/m²K*. Des volets roulants ont été placés sur tous les châssis des rez-de-chaussée et toutes les chambres des étages.

Des grilles de ventilation ont été créées. Une mise en conformité des installations électriques et gaz des logements et une réfection de l'éclairage des parties communes en LED ont eu lieu. Des panneaux solaires pour la production d'eau chaude ont été mis au toit munis de 15 capteurs tubulaires de type

© 2018 Tous droits réservés. lilliad.univ-lille.fr

Vitosol 200 T 3m² avec une orientation Sud-Est sans masque (Inclinaison 45°). Les travaux ont duré quatorze mois et ont couté aux alentours de 2 250 000.00 euros HT.

2.2 3. Diagnostic thermique

Le diagnostic thermique effectué a permis d'identifier les principaux postes de consommation d'énergie:

- Les parois (murs et loggias)
- Les sols
- Les menuiseries PVC
- La production d'ECS
- La toiture

Avant les travaux, le coefficient d'énergie primaire a été estimé à Cep = 296 kWh/m^2/an. L'appel d'offre a été lancé en octobre 2010 pour un objectif visé de 104 kWh/m^2/an. Le résultat de cet appel d'offres a permis à LMH d'investir sur de nouveaux postes afin d'optimiser la consommation énergétique de la résidence TENNIS, pour atteindre le niveau BBC, soit un objectif de 65 kWh/m2.an. Après une période d'études complémentaires, LMH a lancé au courant du 2ème trimestre 2011 un appel d'offres « lot chauffage / panneaux solaires », permettant le remplacement de la chaudière existante par une chaudière à condensation, le remplacement de l'ensemble des radiateurs avec installation de vannes thermostatiques et l'installation de panneaux solaires. Grâce à ces travaux complémentaires, la résidence TENNIS a atteint un niveau de performance énergétique de 63.7 kWh/m2 an soit un gain de 78.48%.

2.2.3.1. Thermographie

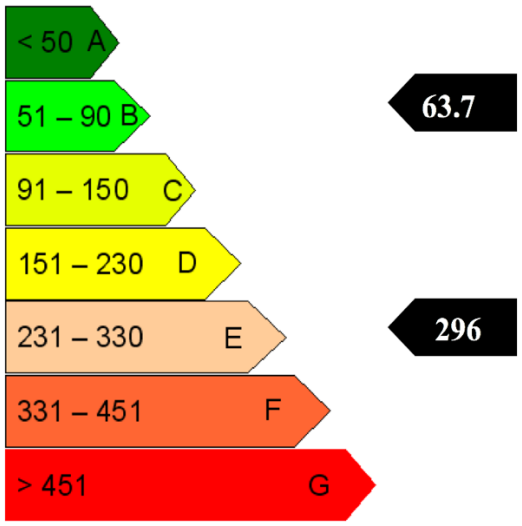


Figure 2.3: Classes de performance énergétique (kWh)

© 2018 Tous droits réservés.

Après l'achèvement des travaux, un test d'étanchéité à l'air a été réalisé. La perméabilité à l'air est le débit de fuite d'air rapporté à l'aire de l'enveloppe à la pression différentielle d'essai de référence à travers l'enveloppe du bâtiment. L'aire de l'enveloppe considérée est la surface des parois déperditives du bâtiment ou du logement hors plancher bas (ATBat). La pression de référence est prise à 4 Pa. L'indicateur est nommé Q4 Pa-Surf en (m3/h)/m². A titre informatif, l'échelle ci-dessous reprend les indices de performance suivant différent label de qualité et pour les différentes réglementations thermiques dans le cadre du collectif neuf. Des tests réalisés par le CEREMA ont montré une étanchéité à l'air de 0,99 pour le logement intermédiaire et 0,42 pour le dernier étage soit un excellent résultat.

Tableau 2.2: Les indices de performance suivant les différents labels de qualité

Minergie-P/ maison passive	**Effinergie +**	**BBC-Effinergie/Démarche qualité RT2012**	**Démarche qualité RT 2005**	**Par défaut sans justification RT 2005**
0.32	0.8	1	1.2	1.7

Dans le cadre de ce travail de thèse, le LGCgE a réalisé une analyse thermographique des bâtiments. La thermographie infrarouge permet de localiser les déperditions liées à différents défauts ou même simplement à la typologie de l'enveloppe du bâtiment. Elle s'effectue dans le but d'évaluer qualitativement le niveau global des performances de l'enveloppe, de rechercher des malfaçons constructives répétitives ou/et de détecter d'éventuelles anomalies ponctuelles.

Le travail a été effectué le 31 Mai 2017 de 6h à 7h dans une température avoisinant les 14°C et une humidité relative de 50%. Le diagnostic s'est déroulé au moyen d'une caméra thermique de marque Flir B360 avec une sensibilité de 0.05°C, une plage de température allant de -20°C jusqu'à 120°C avec un taux de précision de 2%. Elle a pour principe la visualisation des rayonnements infrarouges émis par des matériaux ou des corps et qui varient en fonction de la température. Ces rayonnements sont représentés par des codes couleurs qui s'étendent du bleu (froid) au rouge (chaud).

Les résultats des mesures sont illustrés dans les figures 2.4 à 2.7. Ces figures montrent dans l'enemble une variation de la qualité d'isolation. En effet, certains murs sont bien isolés, d'autres moins bien isolés. On note notamment une mauvaise isolation des fênetres et de l'entrée.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

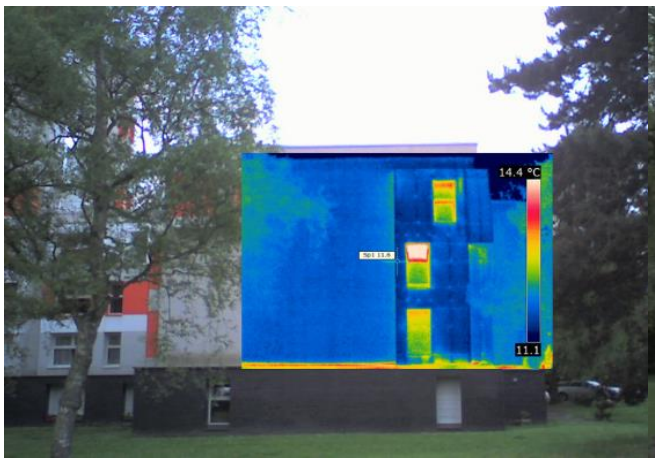


Figure 2.4: Façade Sud-Est

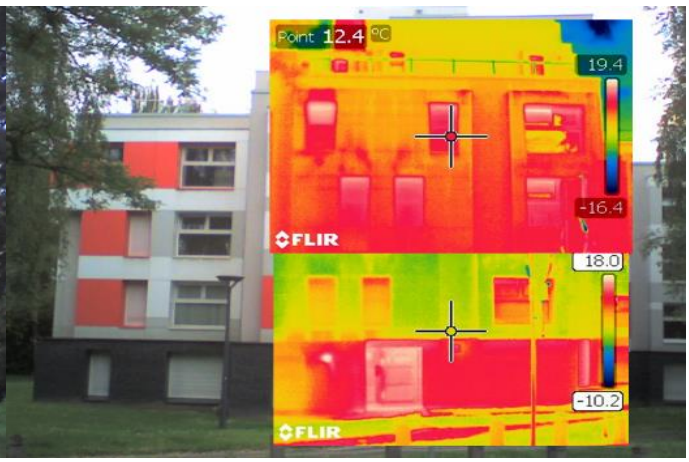


Figure 2.5: Façade Sud

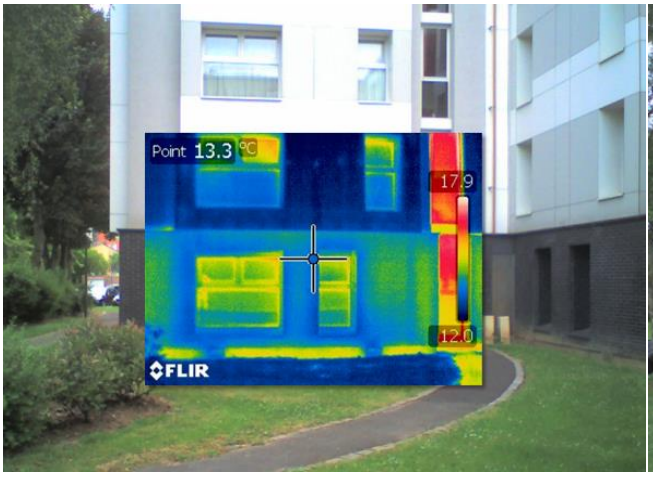


Figure 2.7: Façade Nord

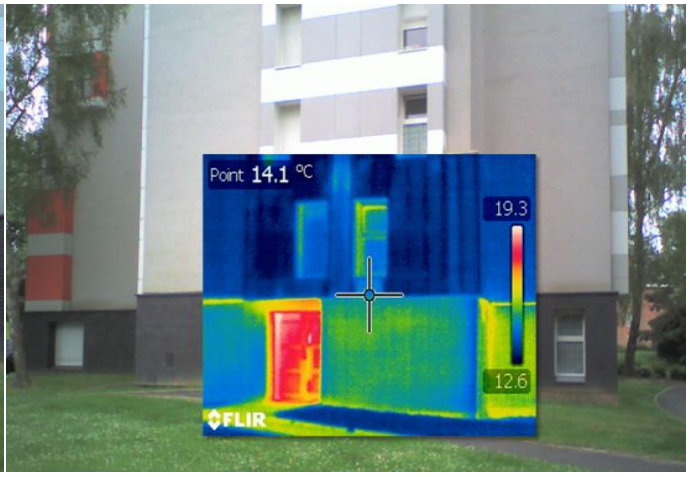


Figure 2.6: Façade Nord-ouest

2.2.3.2. Consommation annuelle

Les tableaux 2.3 et 2.4 donnent les consommations de gaz avant et après la réhabilitation, respectivement. On note que les consommations et dépenses de gaz ont été largement réduites après les travaux. La consommation de chauffage est passée de 432468 kWh en 2011 à 294188 kWh en 2014, ce qui présente une baisse de 32%. On note une augmentation de près de 13% de la consommation de gaz en 2015 par rapport à celle enregistrée en 2014.

Tableau 2.3: Consommations et dépenses de gaz avant la réhabilitation

Année	Montant des dépenses ECS en euro	Consommation en KWh	Montant des dépenses en chauffage en euro	Consommation en KWh
2010	11743	166811	24457	497112
2011	11411	162099	21277	432468

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Tableau 2.4: Consommations et dépenses de gaz après la réhabilitation

Année	Montant des dépenses ECS en euro	Consommation en KWh	Montant de dépenses en chauffage en euro	Consommation en KWh
2014	14065	199800	14474	294188
2015	10311	146468	16368	332702

La consommation de gaz pour l'ECS a la même allure que celle du chauffage : elle a augmenté en 2014 jusqu'à atteindre 199800 kWh et a chuté en 2015 avec une réduction de 27%.

La consommation de gaz dans la résidence TENNIS est divisée entre deux postes majeurs :

- Le chauffage qui consomme plus de 69% annuellement.
- L'eau chaude sanitaire qui consomme plus de 30% annuellement.

La figure 2.8 confirme ce que nous avons vu dans le chapitre précèdent concernant le chauffage comme source principale de consommation d'énergie.

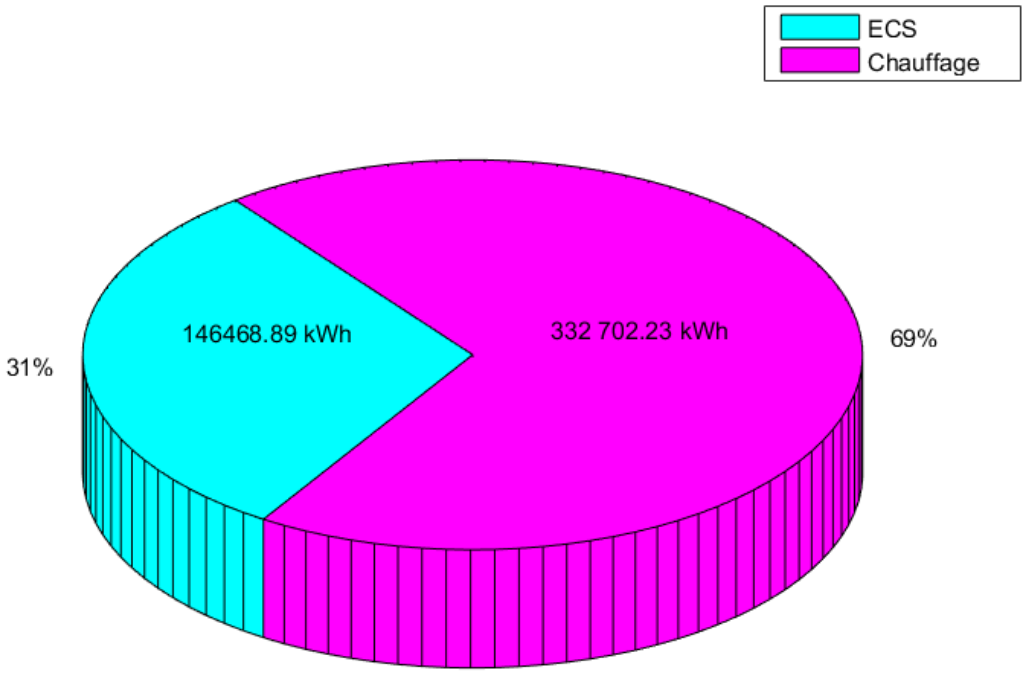


Figure 2.8: Distribution de la consommation de gaz

Jusqu'en 2012 les charges de chauffage et d'ECS sont réparties en fonction du volume de chauffe même si deux chaufferies distinctes existent déjà. A partir de 2013, les locataires ont été facturés en fonction de la consommation de la chaufferie qui dessert leurs appartements afin de bien leur imputer la baisse de charges liée aux travaux. La facture entre 2012 et 2014 est passée de 23653 à 14474 euros ; soit une baisse de 39% de la facture annuelle.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

2.2.3.3. Choix des appartements

Après plusieurs échanges avec les locataires, les appartements choisis pour l'instrumentation sont localisés dans le deuxième bâtiment et répartis sur différents niveaux. Les trois appartements sont caractérisés par de différentes typologies et orientations :

- Un T2 au rez-de-chaussée orienté vers l'Est,
- Un T3 au troisième étage orienté vers le Sud-Est
- Un T2 au quatrième étage orienté vers le sud-ouest.

L'entrée du bâtiment a aussi été instrumentée.

2.3. Système d'instrumentation

2.3.1. Cahier de charge

Les données de météo France ont été choisies pour caractériser les conditions externes. Afin de choisir les données météorologiques les plus représentatives du site de l'expérimentation, nous avons choisi la station météorologique la plus proche du site d'étude. Météo-France dispose d'un poste de mesures thermométriques automatique à Lille-Lesquin, avec des mesures horaires, et qui sera considéré par la suite et pour comparaison comme le poste de référence météorologique. Il se situe à 47 m d'altitude avec des coordonnées de 50.58° vers le nord, 3.01° vers l'est et à 9km de la résidence Tennis.

Pour établir le cahier de charge du dispositif d'instrumentation, une concertation a été conduite avec les locataires et les personnels de LMH pour cerner leurs attentes. La concertation a montré le besoin d'un système de contrôle innovant, qui peut aider les locataires à réduire leurs consommations d'énergie tout en assurant leur confort. Le système doit assurer le suivi en temps réel des consommations d'eau et d'électricité, des paramètres de confort (température, humidité, luminosité, acoustique, qualité de l'air) et l'ouverture et fermeture des fenêtres (Cf Figure 2.9). Le système doit stocker et analyser les données. Les utilisateurs ont accès à leurs données par le biais d'une interface assurant le suivi des données en temps réel tout en garantissant la protection des données personnelles.

Le système d'instrumentation est construit autour d'un Raspberry connecté aux capteurs et aux interfaces d'accès.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

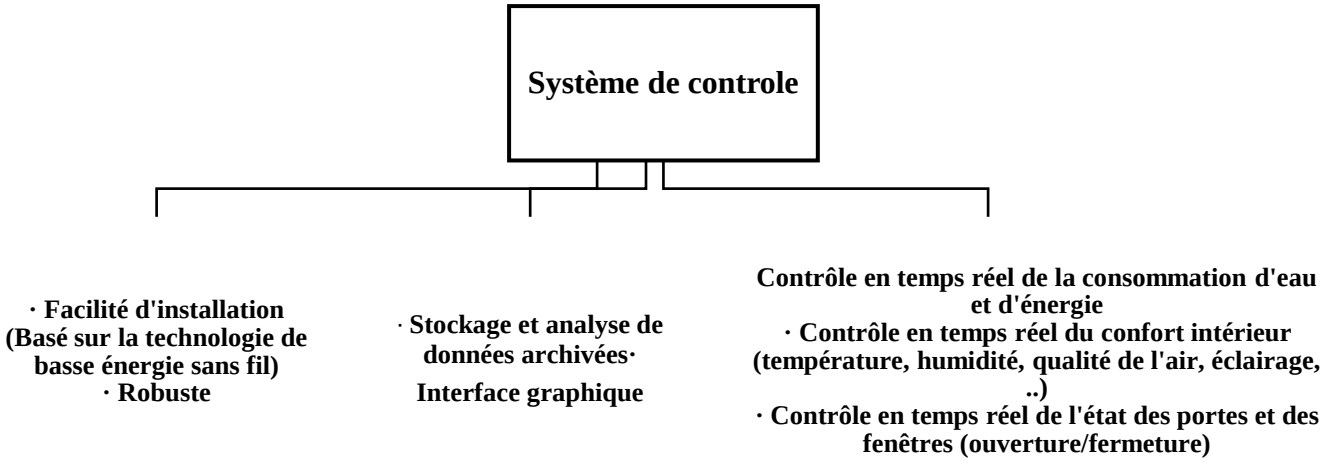


Figure 2.9: Caractéristiques du système de contrôle

2.3.2. Architecture du dispositif

La figure 2.10 illustre l'architecture du dispositif d'instrumentation utilisé. Il est composé d'unité centrale, de capteurs sans fil et de l'interface dédiée aux utilisateurs. L'unité centrale assure la gestion du système de monitoring de l'appartement. Elle communique avec les capteurs en utilisant la radiofréquence (RF) et héberge un logiciel gratuit et ouvert pour le stockage, l'analyse et l'affichage de données. Le système est composé d'un Raspberry Pi, un petit ordinateur sans écran ou clavier, qui utilise la fonction d'exploitation Linux open-source. Le stockage est assuré par une Carte SD.

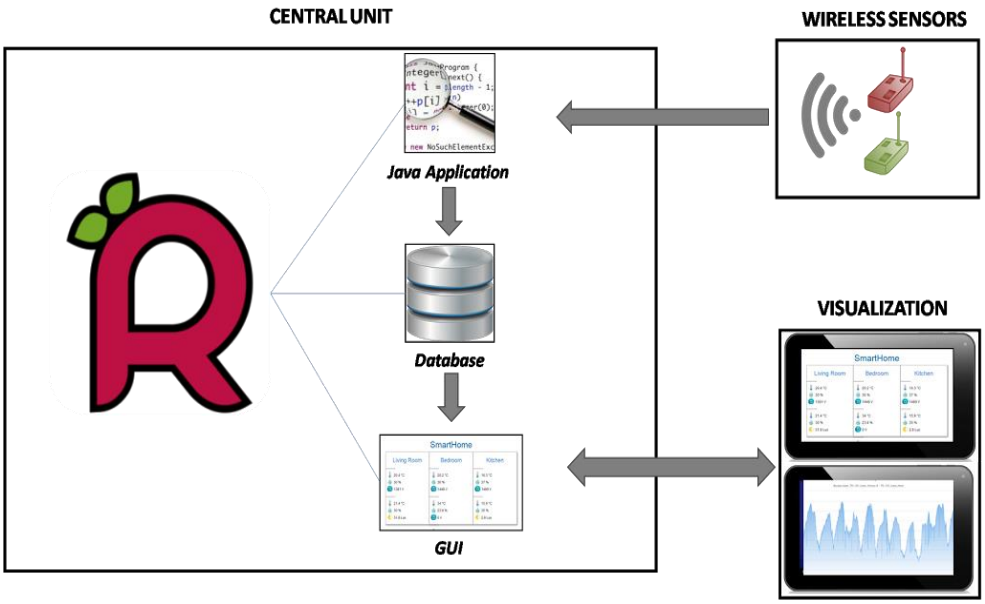


Figure 2.10: Composition du système de communication

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Lors de l'installation du système dans un appartement, les adresses uniques de chaque capteur sont enregistrées dans la base de données avec les détails de son emplacement dans l'appartement. Les données reçues sont classées et archivées dans la base de données liée à l'appartement concerné. La conception de la base de données permet de faire correspondre facilement les adresses physiques des capteurs avec leurs valeurs sémantiques et de référencer les valeurs mesurées dynamiques concernant le temps. MySQL, le SGBDR gratuit et open-source, est utilisé pour la gestion de données.

L'unité centrale offre la possibilité de créer un réseau Wifi local, qui permet aux locataires d'accéder aux informations stockées dedans en s'y connectant. Le réseau étant local, le système ne nécessite donc pas de connexion Internet. Un serveur web Apache hébergé dans l'unité centrale, permet l'affichage des données à travers une interface web accessible uniquement dans l'appartement. En s'inscrivant dans la politique du respect de la vie privée, les données restent exclusives aux locataires.

2.3.2.1. Les capteurs

Afin de faciliter l'installation, des capteurs sans fil ont été utilisés, c'est-à-dire alimentés par des piles et communicants avec l'unité centrale via une liaison RF. Ceci évite la présence de câbles dans les logements. Afin d'augmenter l'autonomie énergétique des capteurs, une carte électronique intégrant plusieurs capteurs a été développée pour envoyer l'intégralité des paramètres mesurés en une seule trame. En effet, les opérations émission/réception sont les plus énergivores. La carte utilise un module de communication PanStamp, qui est optimisé pour réduire la consommation d'énergie : 1 uA en repos et 2.5 mA en transmission.

L'humidité relative et la température sont mesurées en utilisant des capteurs SI7021. La température est mesurée avec une plage de mesure de [– 10° à 85°C] et une précision de 0.4 %, tandis que l'humidité relative est mesurée avec une plage de mesure de [0 à 80 %] et une précision de 3 %.

Les capteurs de température, d'humidité, de luminosité sont intégrés dans la même carte électronique, qui est alimentée par une batterie (pile) AA et utilisant le module de communication sans fil PanStamp.

Les détecteurs de contact magnétiques sont utilisés pour déterminer l'état des portes et fenêtres (ouverts ou et fermés). Ils sont également associés à une carte électronique utilisant le module de communication PanStamp. Il a cependant paru plus judicieux de ne pas les intégrer à la carte multi-capteurs du fait que leur position n'est pas optimale pour mesurer les paramètres de confort et de consommation dans le logement.

Le module de communication PanStamp utilise le protocole Simple Wireless Abstract Protocol (SWAP) qui est open-source et conçu pour être relativement simple et consomme peu de batterie. Il utilise les

© 2018 Tous droits réservés. lilliad.univ-lille.fr

bandes de fréquences gratuites Industrielles de 868/905/915/918 MHz. Le système précité utilise la fréquence de 868 MHz, sa portée dans une zone dégagée est d'environ 200 mètres.

La pile logicielle SWAP assure :

- L'écoute et le décodage des paquets SWAP entrants.
- La retransmission ou la réponse aux requêtes ou commandes reçues dans ces paquets entrants.
- La gestion des registres, qui sont les zones mémoires où sont stockées les données des différents capteurs, à travers la mise à jour de ces données.
- L'envoi des données mises à jour.

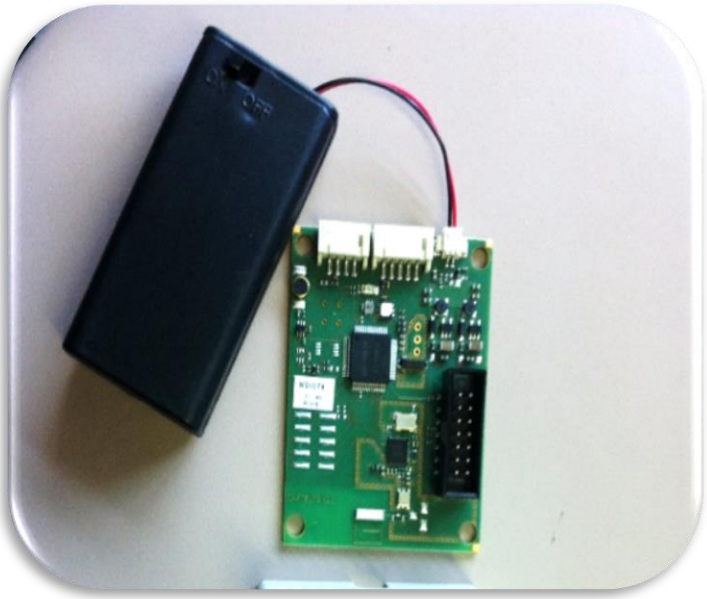


Figure 2.11: Photographie du capteur de température et humidité

Pour chaque carte multi-capteurs, les paramètres de configuration de la carte et les valeurs mesurées par chaque capteur sont stockés dans des registres, qui sont l'unité du Protocol SWAP. Chaque registre possède une adresse comme identifiant unique et chaque carte multi-capteur possède également un identifiant unique. La fréquence avec laquelle chaque registre est mis à jour et transmis à l'unité centrale peut être paramétrée. Il est aussi possible d'inclure des données de différents capteurs dans un seul et même registre sachant que sa taille peut atteindre les 55 octets. Les paramètres de communication, comme les options de sécurité ou l'adresse du périphérique, sont stockés dans des registres spécifiques et le développeur peut utiliser jusqu'à 245 registres personnalisés. Une trame SWAP inclut les adresses de la destination et les dispositifs source, les options de sécurité, la fonction du paquet, l'adresse et l'identifiant du registre et finalement la valeur du registre qui est la charge utile.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

2.3.2.2. Précision des capteurs

Afin d'analyser la précision des capteurs utilisés, nous les avons placé sur un mur façade dans le laboratoire (8 capteurs) et sur les deux planches (6 capteurs sur chaque planche) (Cf Figure 2.12): la première posée sur un bureau et la deuxième au fond du bâtiment et nous avons enregistré les mesures toutes les 30 minutes pendant quinze jours (du 16 au 30 Janvier 2017). Globalement les capteurs ont donné des mesures très proches. La figure 2.13 montre les résultats des capteurs ayant donné l'écart maximal. On note que l'écart maximal est de 0.8°C entre le capteur 2 et le capteur 3. En prenant en compte le taux de précision déclaré sur la notice technique qui est de 0.4%, nous constatons que les mesures sont fiables.

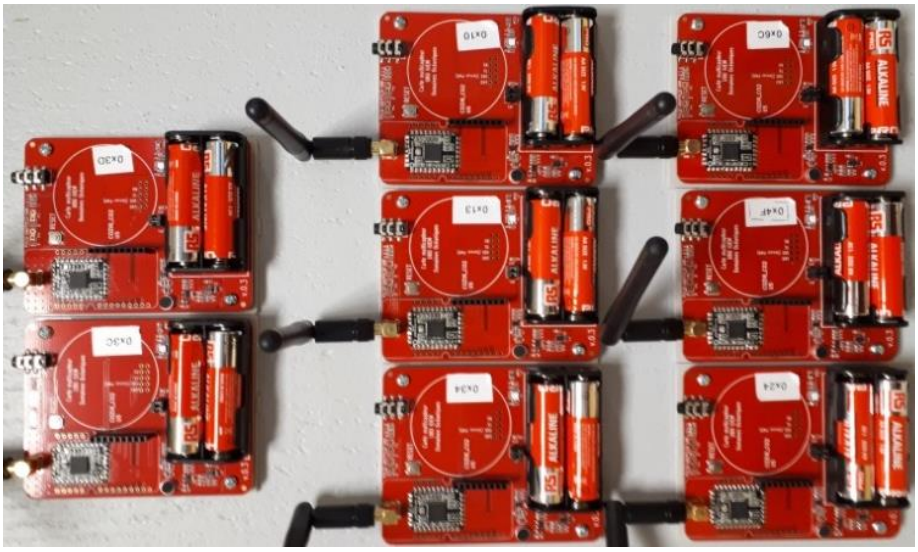


Figure 2.12: Capteurs pour test de précision

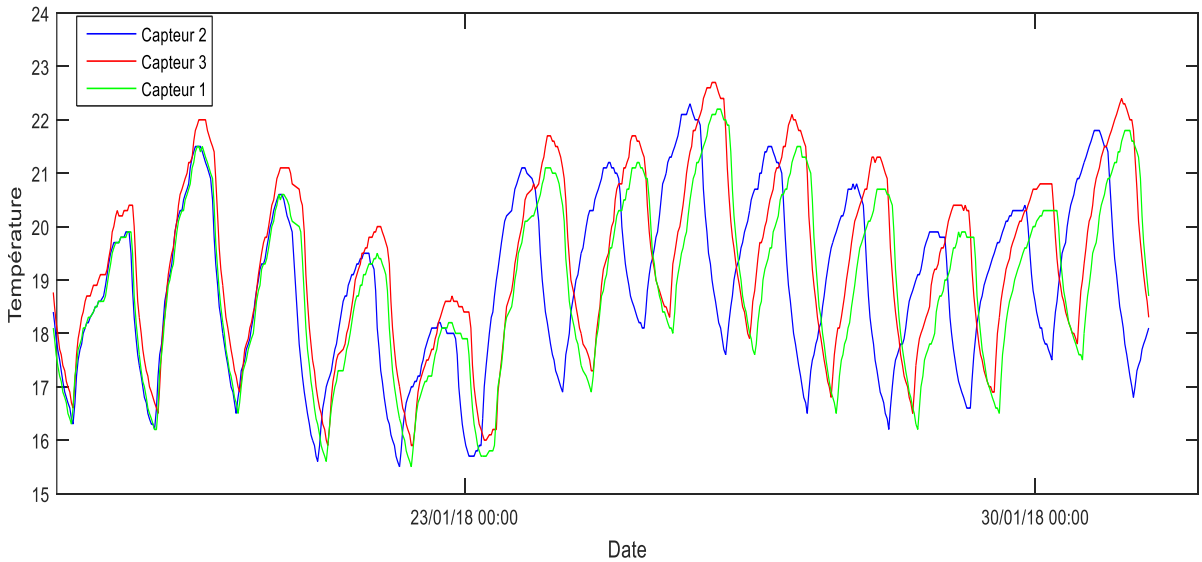


Figure 2.13: Courbes de températures des différents capteurs choisis

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

2.3.2.3. Interface graphique

Une interface Web a été conçue pour permettre aux utilisateurs d'accéder à leurs données (Cf. Figure 2.14). L'unité centrale contient un serveur Web Apache, qui permet aux utilisateurs d'accéder aux données en temps réel et aux données archivées via une interface web. Cette interface est implémentée en HTML, CSS et JavaScript pour permettre l'affichage en temps réel des données et de l'historique de chaque capteur sur des graphiques interactifs. PHP est utilisé pour communiquer avec la base de données afin de rassembler les valeurs des capteurs.

La page d'accueil de cette interface comporte toutes les dernières valeurs des capteurs, organisées par pièce de l'appartement. L'utilisateur peut, en cliquant sur chaque valeur, accéder à l'historique complet de ce capteur.

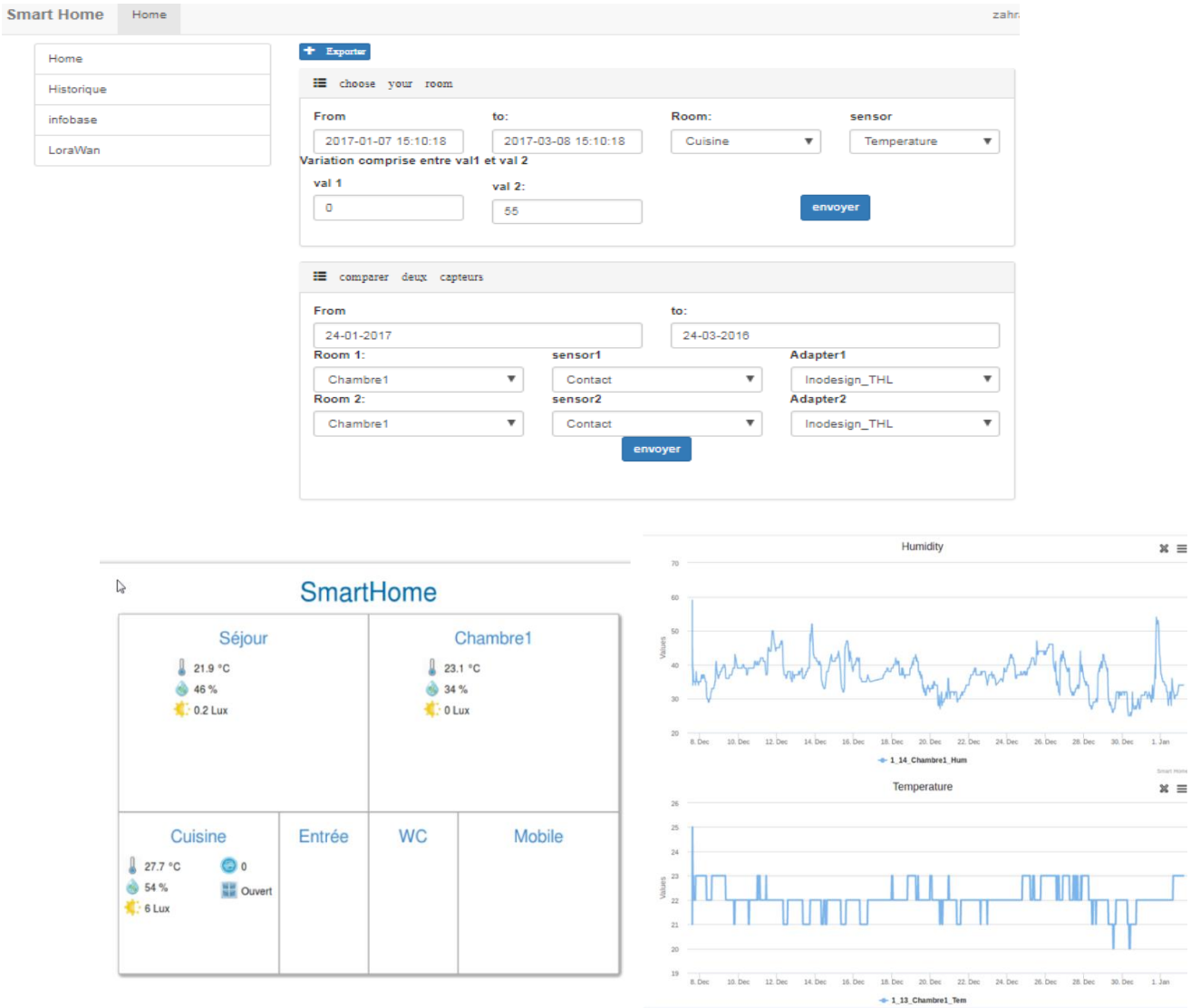


Figure 2.14: Valeurs des paramètres étudiés en temps réel et visualisation des courbes

© 2018 Tous droits réservés.

2.4. Instrumentation des appartements

2.4.1. Procédure d'instrumentation

L'instrumentation d'un logement se déroule de la façon suivante : les boîtiers contenant les capteurs sont disposés dans l'appartement et associés à l'unité centrale en étant enregistrés dans la base de données. Une tablette est fournie aux locataires afin de leur permettre d'accéder à l'interface graphique.

Les capteurs envoient les valeurs des paramètres de l'appartement à une fréquence de 30 minutes à l'unité centrale. La tablette est automatiquement connectée au réseau Wifi local créé par l'unité centrale, et le locataire n'a plus qu'à aller sur l'URL de l'interface graphique afin de suivre les paramètres de son logement.

Du 24 au 25 mai 2016, les appartements ont été équipés de quatre boîtiers de capteurs : le « capteur séjour », le « capteur chambre » et le «capteur contact ». Nous avons choisi d'instrumenter le séjour par deux capteurs car, c'est la pièce dont le taux d'occupation est le plus important au cours de la journée. Le tableau 2.5 donne les détails de l'instrumentation des logements. Le premier capteur installé dans le séjour est positionné dans un coin de la pièce, dans un environnement stable et protégé des rayonnements du soleil et des mouvements d'air. Le second capteur est installé dans la cuisine qui est ouverte sur le salon avec une petite cloison entre les deux pièces. Le capteur contact est mis en place pour relever l'état des fenêtres (ouvert/fermé). Il est donc positionné sur le bord de la fenêtre du séjour.

Les parties communes ont été instrumentées le 02 octobre 2015.

Tous les quinze jours, lors du relevé des données enregistrées et de l'entretien des boîtiers de capteurs, nous échangeons avec les locataires sur leurs pratiques, habitudes et également nous essayons de comprendre leurs manières d'agir dans certaines situations. Nous avons réalisé un suivi de consommations d'énergie (électricité et gaz) grâce à l'échange de données avec le bailleur social.

Tableau 2.5: Récapitulatif de l'instrumentation des appartements choisis

Lieu instrumenté	Instrumentation	Type
Parties communes	4 capteurs température et humidité 1 capteur luminosité 1 capteur contact 1 capteur qualité d'air	Panstamp
Appartement A	3 Capteurs T, H, L	Inodesign

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

	1 capteur contact	Panstamp
Appartement B	3 Capteurs T, H, L 1 capteur contact	Inodesign Panstamp
Appartement C	3 Capteurs T, H, L 1 capteur contact	Inodesign Panstamp

2.4.2. Instrumentation de l'appartement A

La figure 2.15 montre le schéma d'instrumentation de l'appartement A réalisée le 24 mai 2016. La figure 2.16 montre les périodes de fonctionnement des capteurs. On note une interruption de tous les capteurs entre les mois de juillet et de décembre 2016. Cette interruption est due à un problème technique dans le système installé.

Figure 2.155: Instrumentation de l'appartement A

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

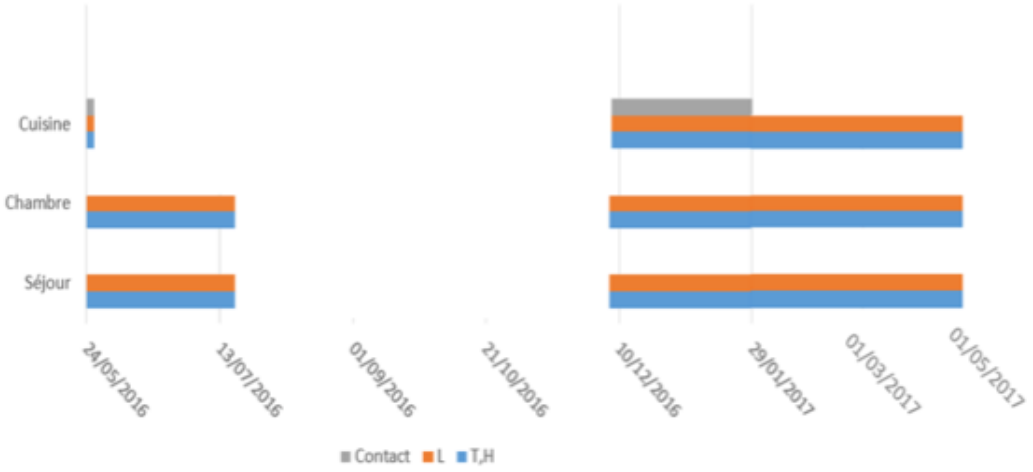


Figure 2.166: Fonctionnement des capteurs - Appartement A

2.4.3. Instrumentation de l'appartement B

La figure 2.17 montre le schéma d'instrumentation de l'appartement B réalisée le 24 mai 2016. La figure 2.18 montre les périodes de fonctionnement des capteurs. On note une interruption des capteurs de la chambre et de la cuisine entre le 13 juillet et le 21 octobre, cette interruption est due à la cession de batterie de l'ancien système. Ce système a été par la suite remplacé par un système plus performant en termes d'économie d'énergie.

Figure 2.177: Instrumentation de l'appartement B

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

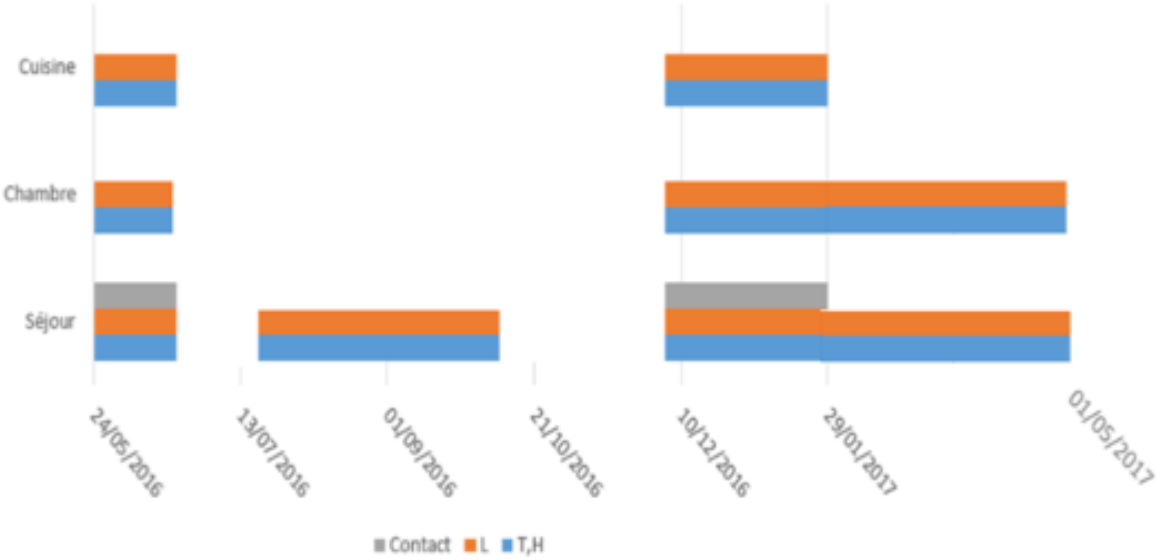


Figure 2.188: Fonctionnement des capteurs - Appartement B

2.4.4. Instrumentation de l'appartement C

La figure 2.19 montre le schéma d'instrumentation de l'appartement C réalisée le 24 mai 2016. Quelques jours après, les capteurs de température, humidité et luminosité installées dans la cuisine et la chambre ont montré un dysfonctionnement. Cependant les deux autres capteurs ont fonctionné normalement. En septembre 2016, le système s'est arrêté pour une durée de deux mois à cause d'une panne technique produite par une interruption d'électricité au sein de la résidence. Le rasberry Pi n'a pas pu redémarrer automatiquement. Nous avons effectué par la suite des mesures dans les 3 pièces pendant la période allant du 10 décembre 2016 au 21 janvier 2017.

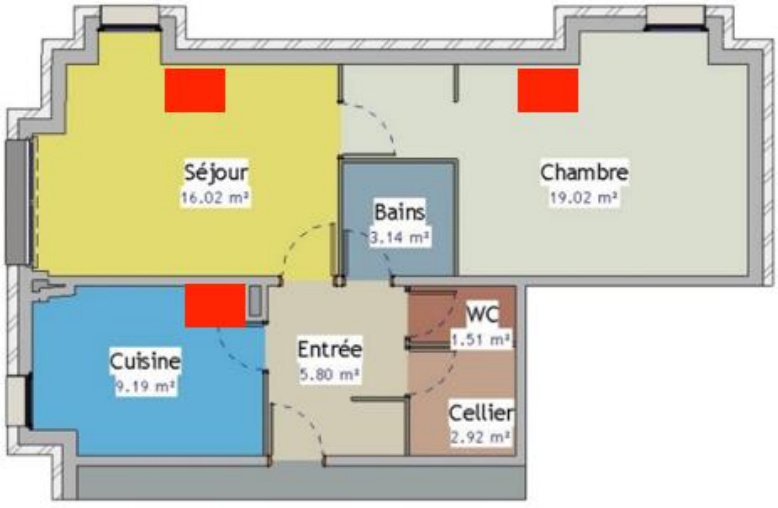


Figure 2.19: Instrumentation de l'appartement C

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

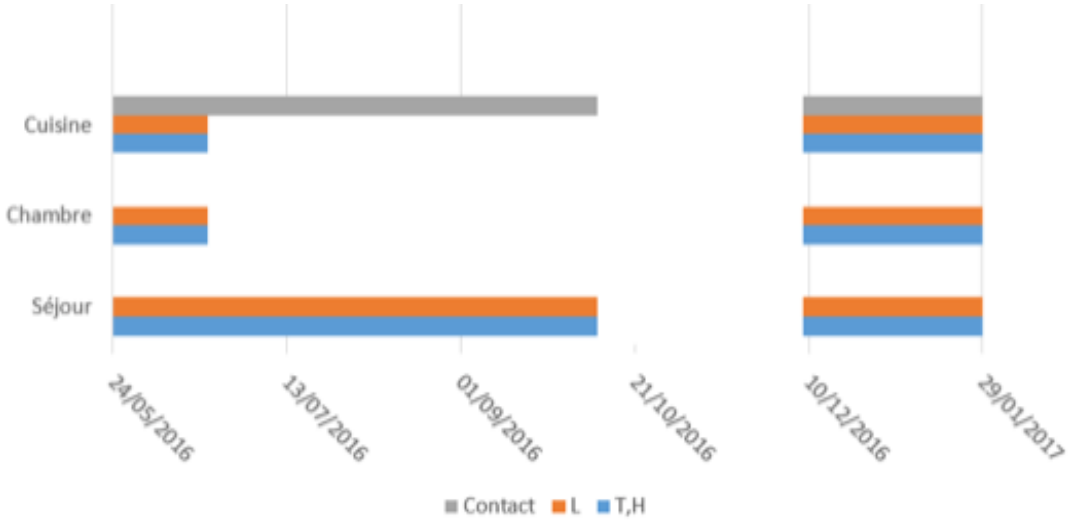


Figure 2.20: Fonctionnement des capteurs - Appartement C

2.4.5. Exemples de mesure

La figure 2.21 présente la variation de la température dans le séjour de l'appartement A durant la période allant de janvier en mars 2017. On note que la température varie entre une valeur minimale de 18.8°C et une valeur maximale de 29.3°C avec une température moyenne de 24°C. L'humidité relative (Cf. figure 2.22) fluctue entre 17% et 61%. La variation présente plusieurs pics, qui peuvent être relatifs à l'activité dans l'appartement. La figure 2.23 montre la variation de la luminosité. On note de faibles valeurs durant les nuits et des valeurs élevées durant les journées, sachant que l'emplacement du capteur est à côté de la fenêtre qui est muni d'un rideau transparent, ce qui laisse passer facilement la lumière du jour.

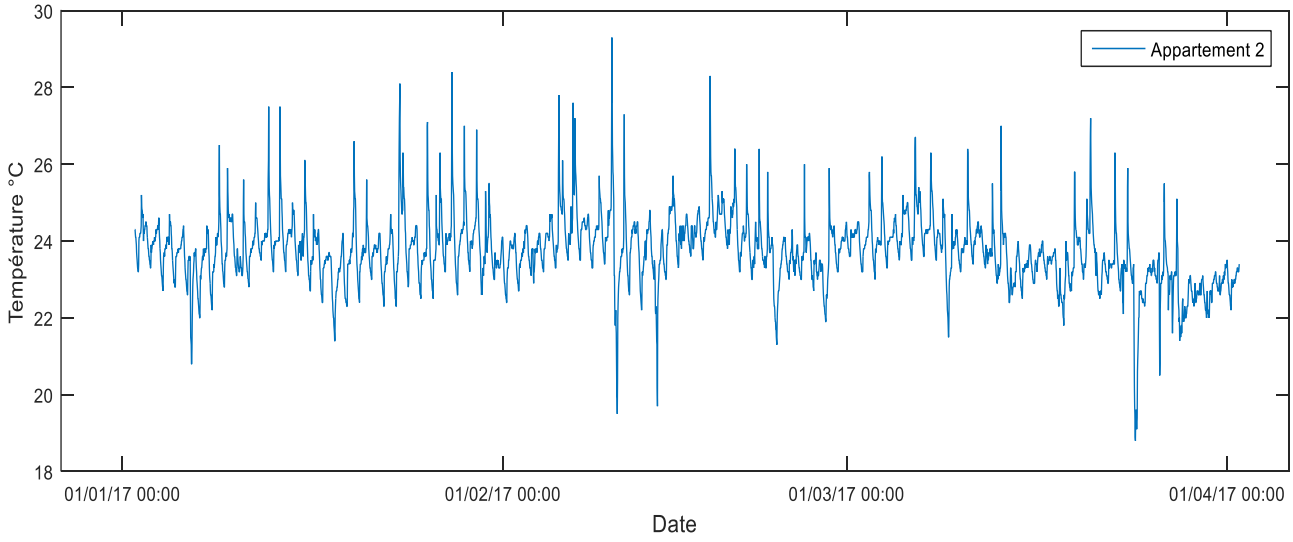


Figure 2.21: Variation de la température intérieure dans le séjour de l'appartement A

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

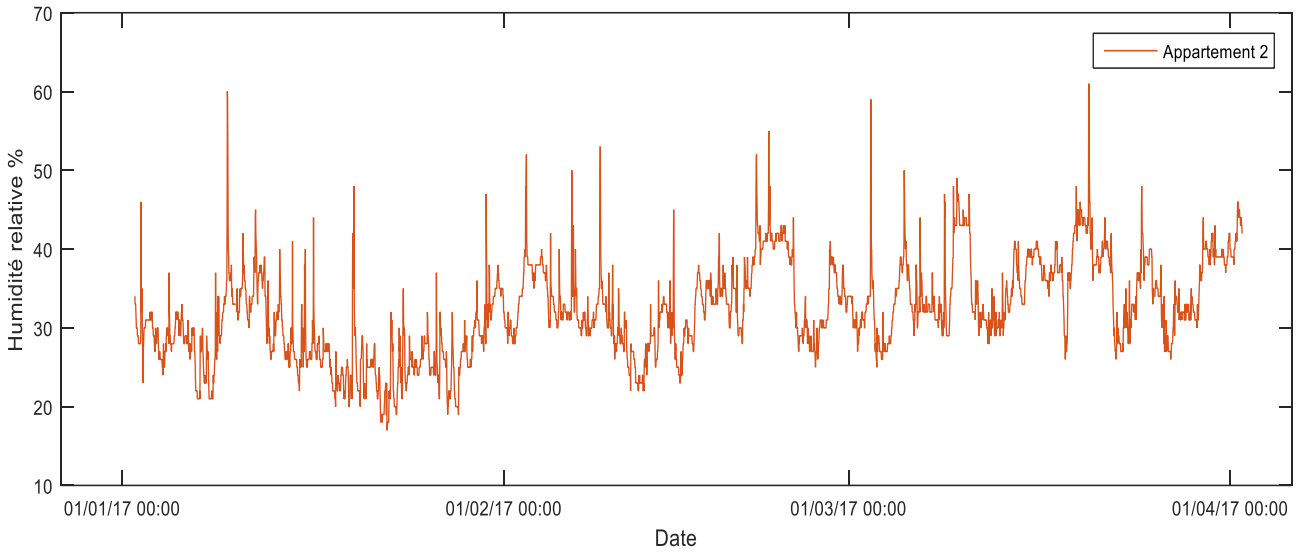


Figure 2.22: Variation de l'humidité relative dans le séjour de l'appartement A

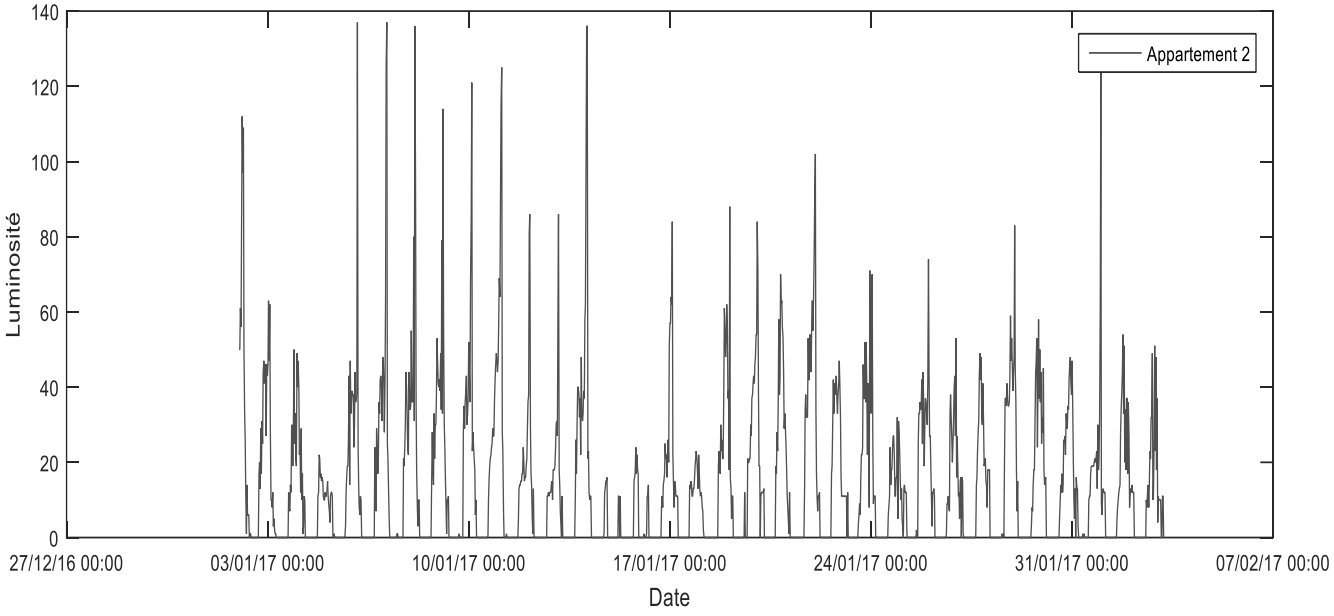


Figure 2.23: Variation de la luminosité dans le séjour de l'appartement A

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le site d'expérimentation utilisé dans ce travail de thèse. Il s'agit d'une résidence de Lille Métropole Habitat (LMH), construite en 1973 et réhabilitée en 2012. En concertation avec les occupants et les services de LMH, trois appartements ont été instrumentés. Un dispositif spécifique a été construit autour d'une unité centrale (Raspberry) avec des capteurs de température, d'humidité, de luminosité et de contact (ouverture/fermeture). Les capteurs sont connectés

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

via un système de communication sans contact. Les équipements d'eau et d'électricité n'ont pas permis d'installer des capteurs sans contact, les consommations ont été fournies par LMH.

La campagne de mesure a été réalisée entre mai 2016 et mai 2017 avec une interruption d'environ trois mois, avec des mesures toutes les 30 minutes. Des difficultés ont été rencontrées lors de cette expérimentation avec des arrêts des mesures ou des pertes de données. Ces difficultés sont dues à divers facteurs, notamment (i) un dysfonctionnement dans le premier dispositif, qui a causé une surconsommation d'énergie ou des difficultés de redémarrage après une panne électrique, (ii) des difficultés d'accès aux logements occupés pour un contrôle de l'état du dispositif d'instrumentation.

Malgré ces difficultés, nous avons enregistré une très grande quantité de données en été et en hiver, qui seront analysées dans les chapitres suivants afin d'explorer le confort intérieur et les économies potentielles que nous pouvons réaliser

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Lat, Université de Lille, 2018

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Chapitre 3

Analyse des mesures réalisées dans la résidence Tennis

3.1. Introduction

Le deuxième chapitre a présenté l'instrumentation des appartements occupés dans la résidence Tennis de LMH qui a été mise en œuvre dans le but de suivre les paramètres de confort. Dans ce chapitre, nous présentons une analyse des mesures effectuées ainsi que les économies potentielles que nous pouvons réaliser dans la consommation du chauffage. L'objectif étant de définir les situations de surchauffe et de caractériser leur impact sur le confort et sur les consommations de chauffage. Cette analyse nous permet de définir les différentes ambiances intérieures qui serviront de base aux futures simulations de thermique dynamique.

3.2. Analyse des données de l'appartement A

Grâce à nos capteurs, nous avons pu mesurer la température intérieure et l'humidité relative au sein des appartements sur la période d'observation qui s'étend du 24 mai 2016 jusqu'au 07 juin 2017. Ici, il sera question d'analyser les répartitions des différents paramètres au cours de deux périodes : période de chauffe et période sans chauffage.

3.2.1. Période de chauffe

3.2.1.1. Température intérieure

Cette section présente l'analyse des données collectées entre le 01 décembre 2016 et 14 avril 2017. La figure 3.1 illustre la variation de température dans le salon. Nous constatons que la température intérieure est légèrement variante tout au long de la saison hivernale malgré les fluctuations de la température extérieure. Le mois de janvier est le mois le plus froid de l'année

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

avec la valeur de température extérieure la plus basse -5°C, cependant la température intérieure moyenne est de 23°C soit +4°C au-dessus du seuil réglementaire.

La température la plus élevée est de 29.3°C mesurée durant la dernière semaine du mois de décembre de l'année 2016. Cette valeur est supérieure de 10°C du seuil réglementaire. La température moyenne intérieure saisonnière est de 23,8 ° C, avec peu de variabilité d'un mois à l'autre.

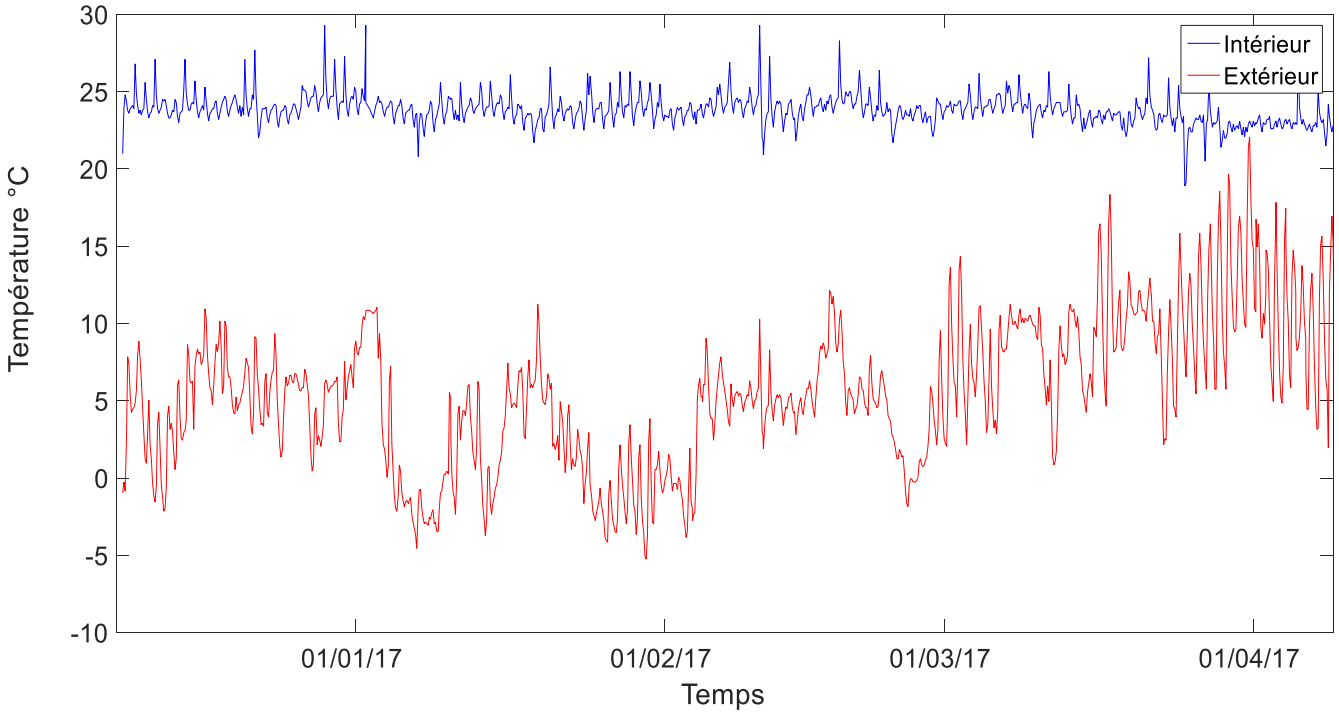


Figure 3.1: Variation de la température dans le salon durant la période de chauffe

Tableau 3.1: Températures mensuelles intérieures et extérieures durant la période de chauffe

	Minimales		Moyennes		Maximales	
	Intérieure	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**
Décembre	21,00	-2,15	24.19	5.18	29,30	10,95
Janvier	20,80	-5,25	23.83	1.3	26,60	11,25
Février	20,90	-3,85	23.97	5.02	29,30	14,35
Mars	18,90	0,85	23.53	8.7	27,20	18,35
Hiver	18,90	-5,25	23.88	5.05	29,30	18,35

La figure 3.2 présente la variation de température pendant quatre jours de la période de chauffe du 08/02/17 au 12/02/17. Nous constatons que la température est constante aux alentours de 24°C durant la matinée du premier jour. Elle remonte durant la journée avec de légères variations. La température augmente soudainement à 20h pour atteindre 25.9°C puis 27.5°C

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

pendant l'heure suivante, pour finir la soirée avec un maximum de 29.3°C à 21h37. La température commence à décroitre lentement durant le reste de la soirée. De plus faibles valeurs sont enregistrées durant la matinée du 9 février avec une température minimale de 19.5°C mesurée à 7h. La température demeure stable aux alentours de 23°C durant toute la journée. Ensuite, elle commence à augmenter vers de plus hautes valeurs jusqu'à atteindre 27.7°C à 21h. La température durant les jours du 10 et 11 février était légèrement stable avec de légères fluctuations en fin d'après-midi.

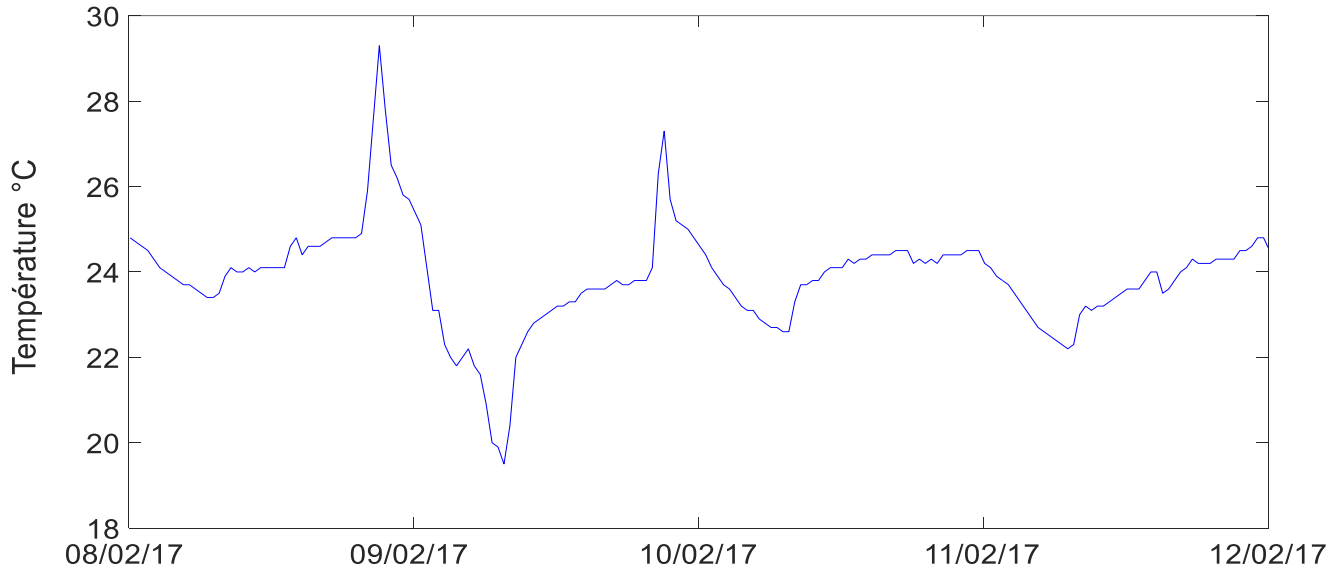


Figure 3.2: Variation de la température dans le salon durant 4 jours

La figure 3.3 présente la répartition de la température intérieure durant la période de chauffe. Nous constatons que la température varie entre 20°C et 28°C, avec une valeur majoritaire de 24°C durant 44% du temps de l'observation hivernale soit 66 jours. Une valeur plus élevée de l'ordre de 26°C est décelée sur une période de 35% du temps de l'observation ce qui est équivalent à 53 jours. D'autres valeurs, sont enregistrées sur des périodes plus courtes : 25°C mesurée pendant 11% du temps et 28°C durant 7%. De plus faibles valeurs sont enregistrées durant le reste du temps de l'observation.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

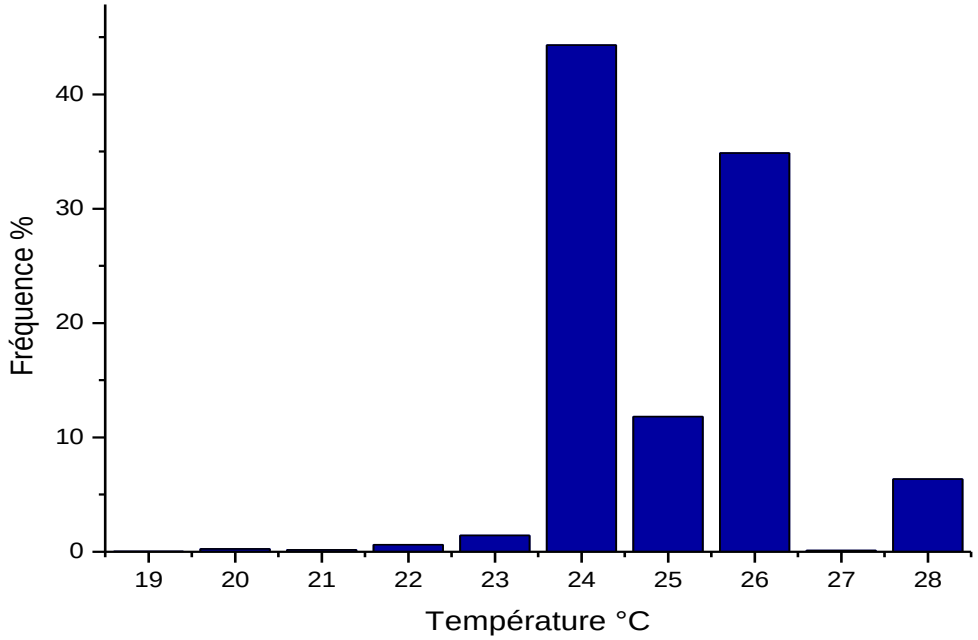


Figure 3.3: Répartition de la température dans l'appartement A durant la période de chauffe

Compte tenu, de la température moyenne de référence « extérieure » qui est de 5.05°C avec un Maximum de 18.35°C et un Minimum de -2.15°C, la température mesurée à l'intérieur de l'appartement semble ne subir aucunes variations thermiques extérieures.

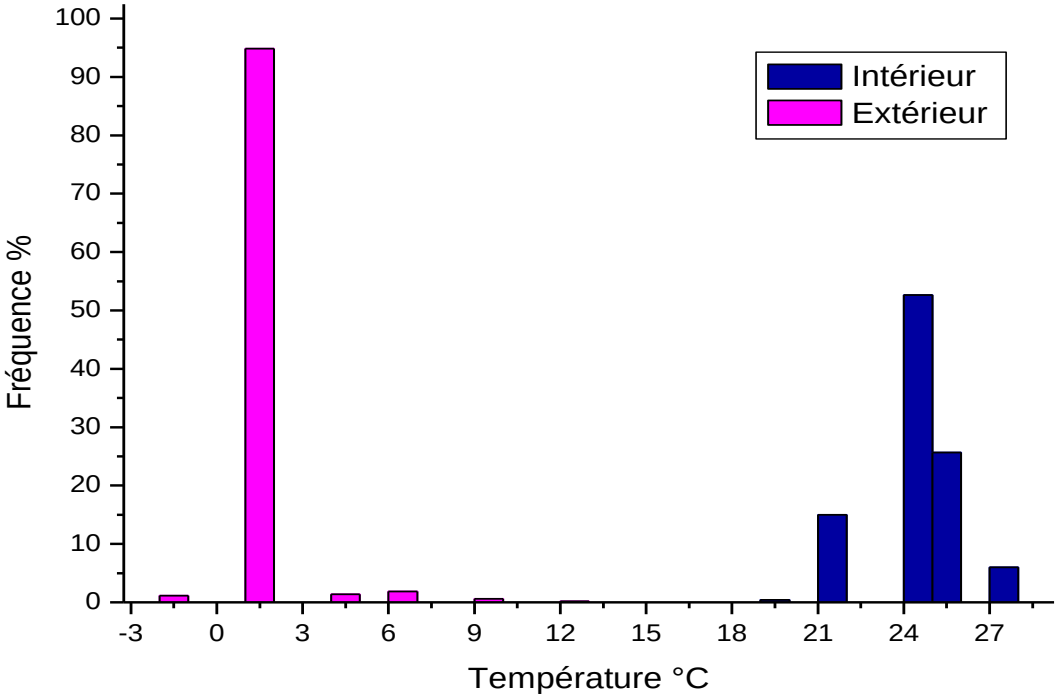


Figure 3.4: Répartition de la température dans l'appartement A et à l'extérieur durant la période de chauffe

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La figure 3.5 présente l'écart entre la température intérieure et la température de référence dite « extérieure ». La répartition montre une variation des mesures entre 4°et 28°, c'est ainsi que les températures mesurées à l'intérieur de l'appartement sont généralement supérieures à celles de référence pendant la période de chauffe. Conformément à ces mesures, le climat extérieur n'a pas beaucoup d'influence sur l'environnement intérieur.

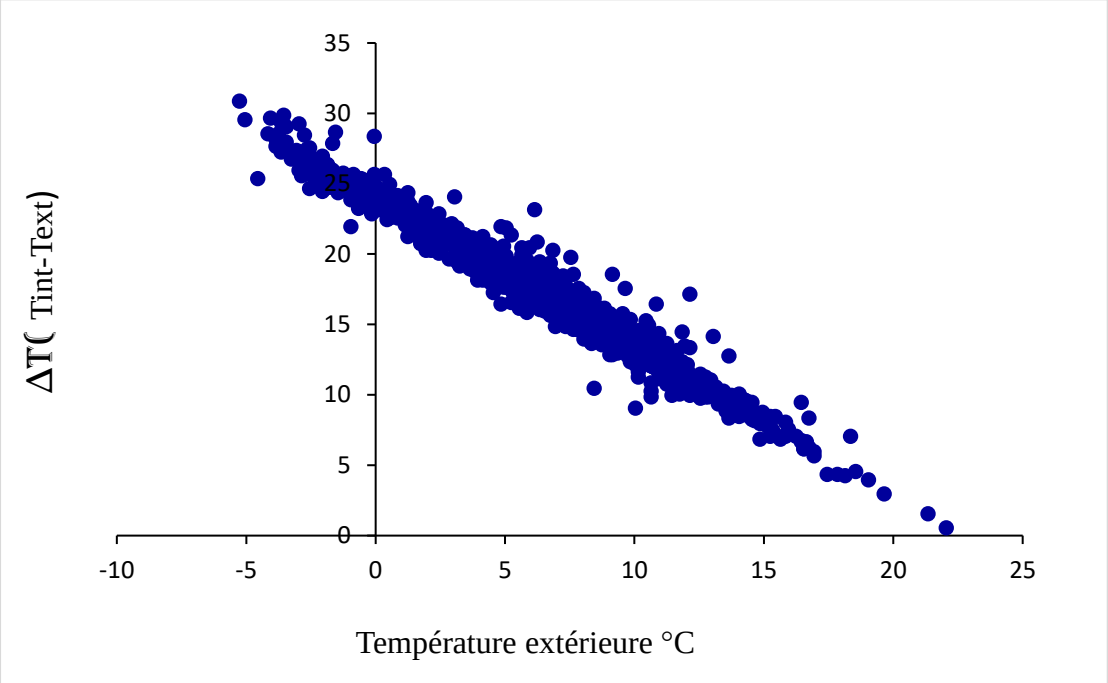


Figure 3.5: Ecart entre température extérieure et intérieure pendant la période de chauffe

Influence des jours de la semaine sur la variation de température

La figure 3.6 présente la répartition de température selon les weekends, les mercredis et les lundis durant la période de chauffe. On constate une valeur majoritaire de 24°C durant les quatre jours étudiés. La température intérieure enregistrée pendant les lundis est répartie sur plusieurs valeurs allant de 21°C jusqu'à 28°C. La température passe par 23°C pendant 32% du temps d'observation, par 24°C pendant 37% du temps et ensuite 25°C pendant 15%. Nous mesurons de plus hautes valeurs de l'ordre de 26°C, 27°C et 28°C pendant de courtes durées. Les températures mesurées pendant les mercredis, sont de l'ordre de 24 °C la plupart du temps, ensuite 23°C durant 32% du temps d'observation, d'autres valeurs sont enregistrées sur des périodes moins importantes. Durant les samedis et dimanches, les valeurs de températures plus élevées sont d'une fréquence plus importante. Pendant les samedis, on note un passage de 50% du temps d'observation aux alentours de 24°C, et de 13% autour de 25°C et de 31% au voisinage

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

de 23°C. Lors des dimanches, on mesure 30% à 23°C, 39% à 24°C et 17% à 25°C. La fréquence des hautes températures est légèrement moins importante durant les lundis.

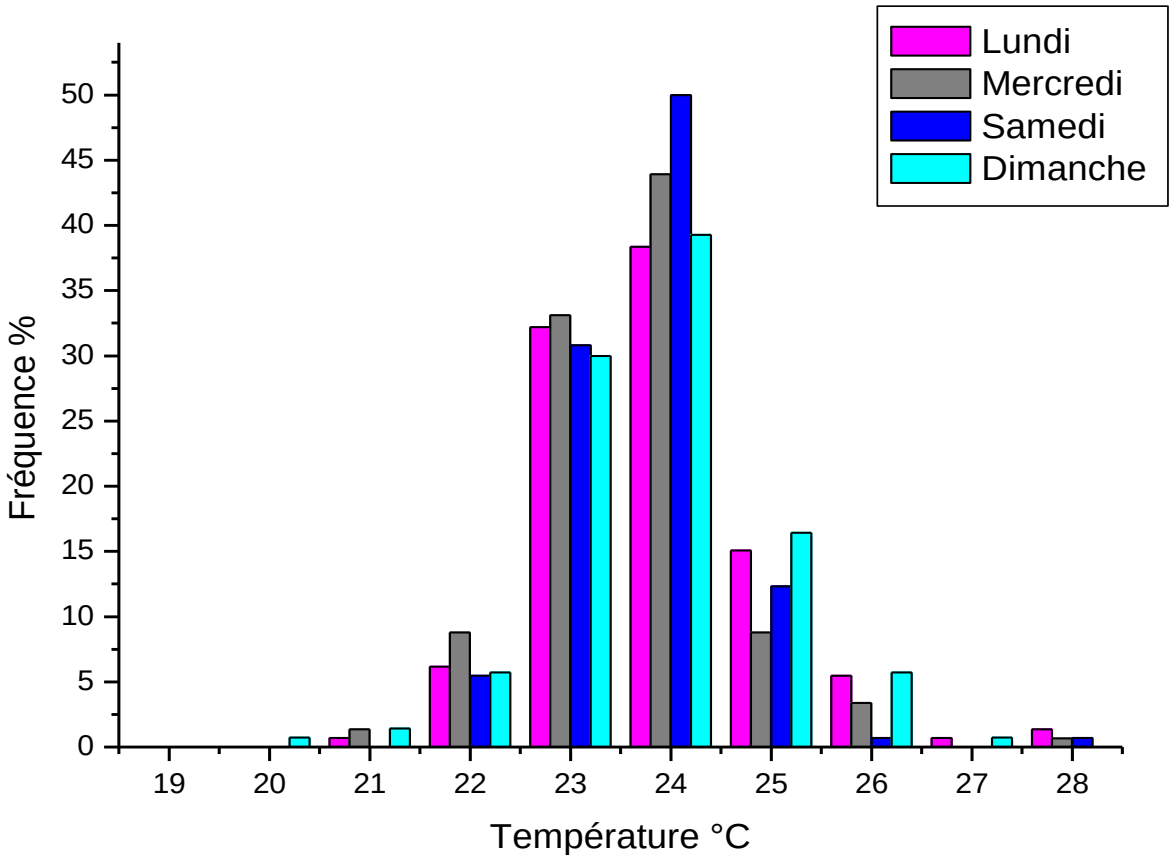


Figure 3.6: Variation de la température selon les jours de la semaine durant la période de chauffe

Tableau 3.2: Températures selon les jours de la semaine durant la période de chauffe

Température	Lundi	Mercredi	Samedi	Dimanche
Minimale	21.4	21	22.1	20.5
Maximale	29	27.1	27.1	26.4
Moyenne	25.2	24.05	24.6	23.4
Ecart-type	0.75	0.57	0.54	0.70

Influence des créneaux horaires de la semaine sur la variation de température

La figure 3.7 représente la distribution des températures en fonction des répartitions horaires. On constate que durant les soirées d'hiver de 18h à 22h, les températures intérieures arrivent jusqu'à 26°C, il s'agit de plus de 7°C au-dessus des critères imposés par la réglementation et ce pendant 60% du temps d'observation qui représente plus de 2 mois. Sur la même période en

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

début de matinée de 06h à 12h la température intérieure est généralement autour de 24°C, c'est-à-dire plus de 5°C au-dessus du seuil de chauffe pendant 76% du temps d'observation, soit l'équivalent est supérieur à 3 mois. La température est souvent plus proche de ces critères aux alentours de 22°C entre 12h et 18h et puis elle croît brusquement après 18h00.

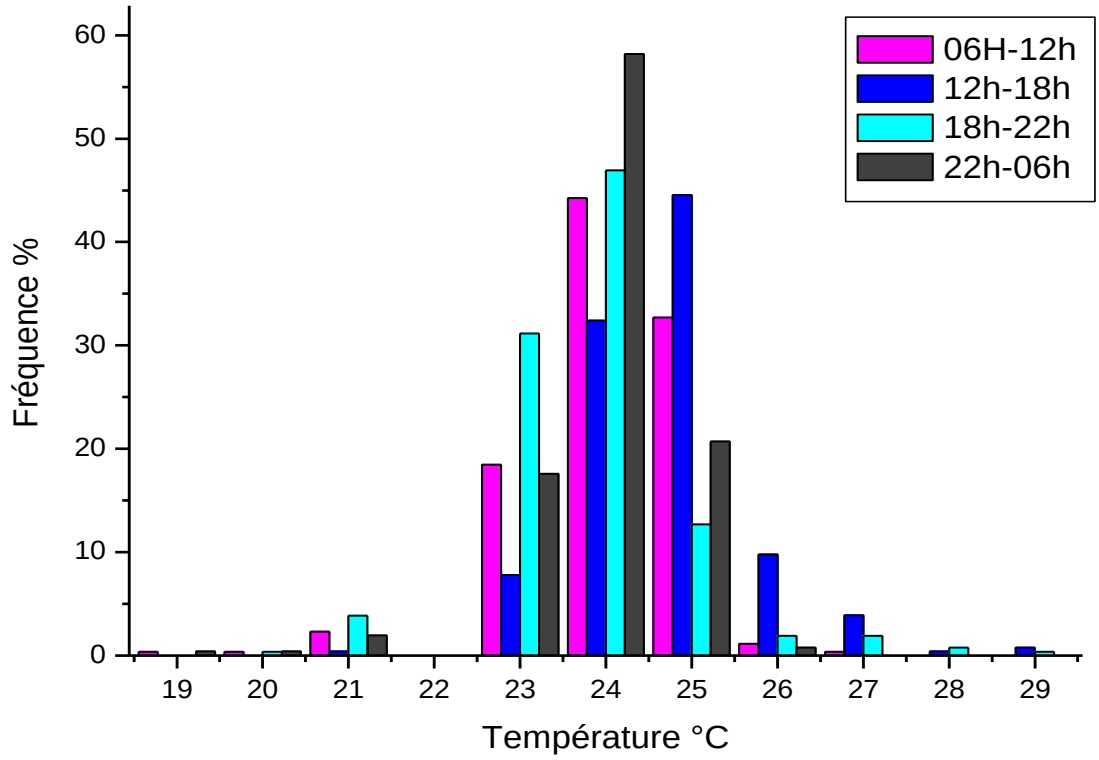


Figure 3.7: Distribution des températures selon les tranches horaires durant la période de chauffe

Tableau 3.3 : Températures selon les créneaux horaires durant la période de chauffe

Température	**06h-12h**	**06h-18h**	**18h-22h**	**22h-06h**
Minimale	18.8	18.8	21.3	20.9
Maximale	25.4	28.1	19.3	26.6
Moyenne	22.1	23.45	25.3	23.75
Ecart-type	0.53	0.63	0.80	0.63

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

3.2.1.2. Humidité relative

La figure 3.8 présente la variation de l'humidité relative qui s'étend du 01 décembre 2016 au 14 avril 2017. On constate que l'humidité relative présente une variation continue, représentative du climat intérieur en général. Cette variabilité se traduit par une évolution continue de l'humidité avec un minima de 18% mesuré le 21 janvier 2017 à 12h34 et un maxima de 61% mesuré le 14 du même mois.

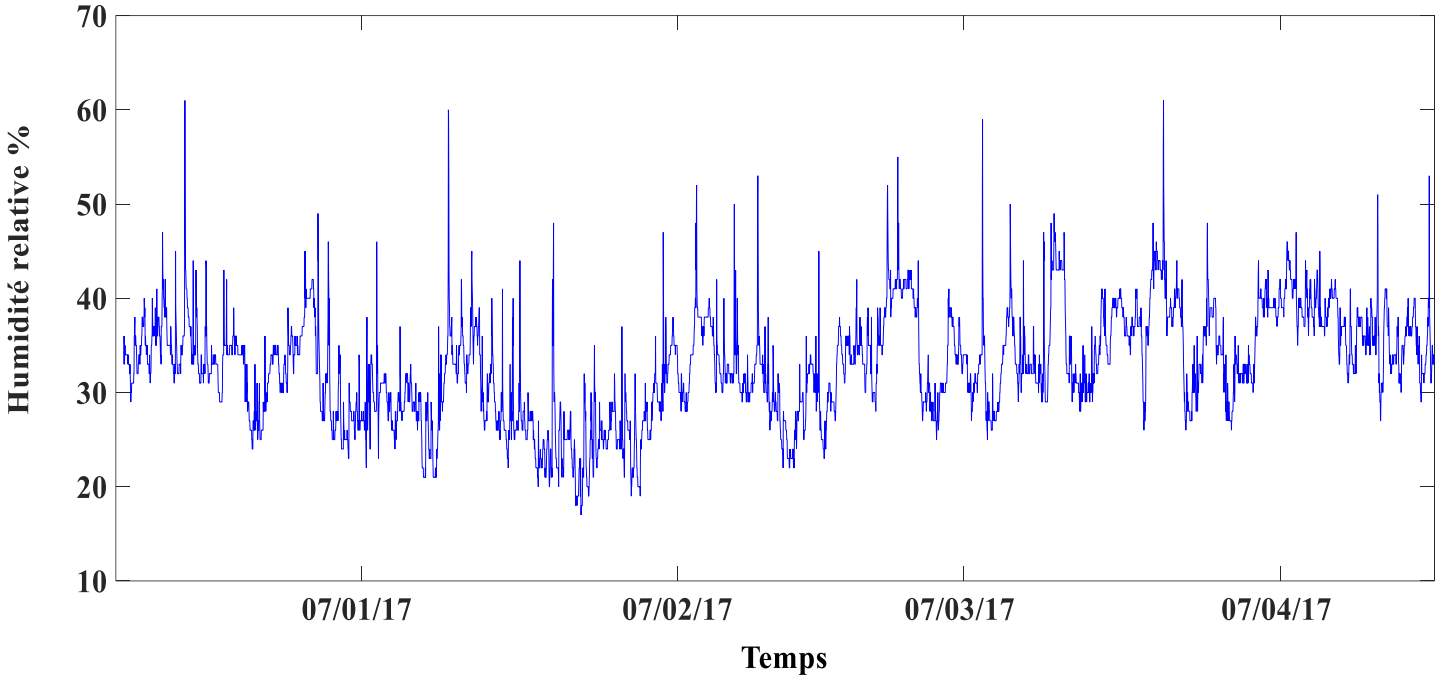


Figure 3.8: Variation de l'humidité relative pendant la période de chauffe

Tableau 3.4 : Valeurs de l'humidité relative mensuelle intérieure et extérieure durant la période de chauffe

	Minimales		Moyennes		Maximales	
	Intérieure	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**
Décembre	24	69	34.92	92.09	59	100
Janvier	18	54	35.07	87.67	61	100
Février	24	56	31.30	87.29	43	100
Mars	28	33	34.88	74.67	45	99
Hiver	24	33	34.04	85.43	61	100

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La figure 3.9 montre la répartition de l'humidité relative intérieure. On constate que les valeurs de l'humidité sont cernées entre 24% et 61% avec une valeur majoritaire de 32%. De petits changements sont prélevés d'un mois à l'autre, avec une valeur moyenne saisonnière de 34%. Les valeurs mesurées se répartissent sur plusieurs intervalles : un passage aux alentours de 32% à 35% du temps d'observation ce qui équivaut à 42 jours, un passage vers 35% à 24% du temps soit 29 jours, et vers de plus hautes valeurs durant de courtes périodes, le reste du temps d'observation. L'appartement étudié présente un environnement peu humide (HR ≤40%) durant la période d'hiver. De nombreuses preuves ont indiqué qu'un degré d'humidité de l'environnement intérieur aussi bas durant une longue période est étroitement lié aux problèmes de santé et influe directement la performance énergétique du bâtiment et sa durabilité.

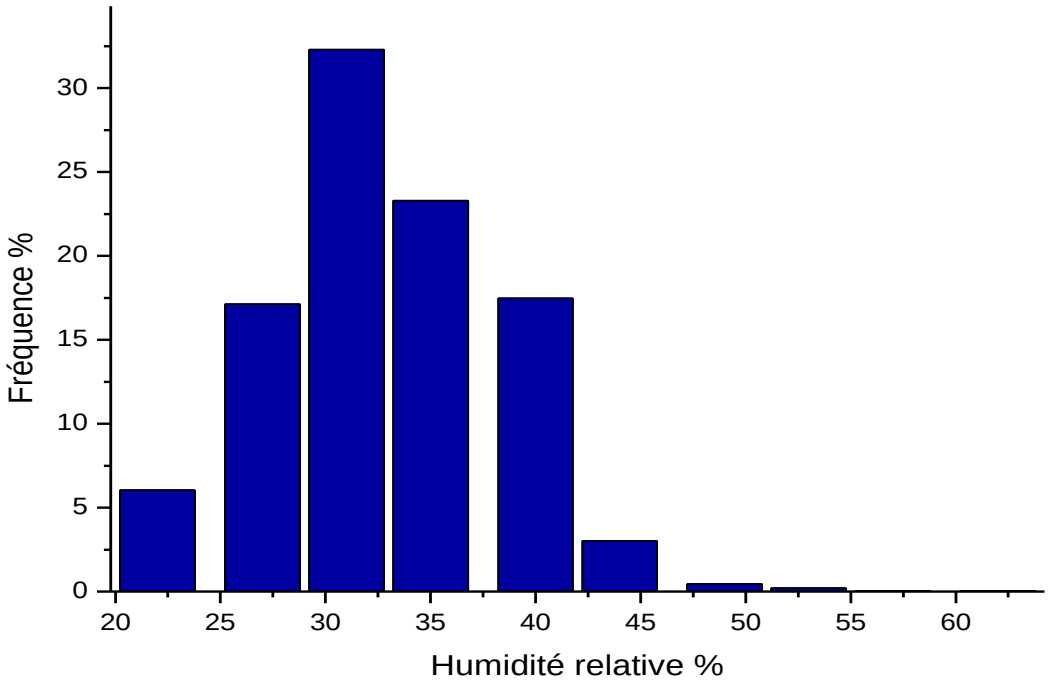


Figure 3.9: Répartition de l'humidité relative à l'intérieur de l'appartement A

La figure 3.10 présente la répartition de l'humidité relative à l'intérieur de l'appartement A ainsi qu'à l'extérieur. On constate que les valeurs extérieures restent assez élevées, étant donné que la saison d'hiver était très humide avec une valeur moyenne de 85%, un minimum de 33%, et un maximum de 100%. Compte tenu des variations intérieures, le climat extérieur n'influe pas l'environnement intérieur

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

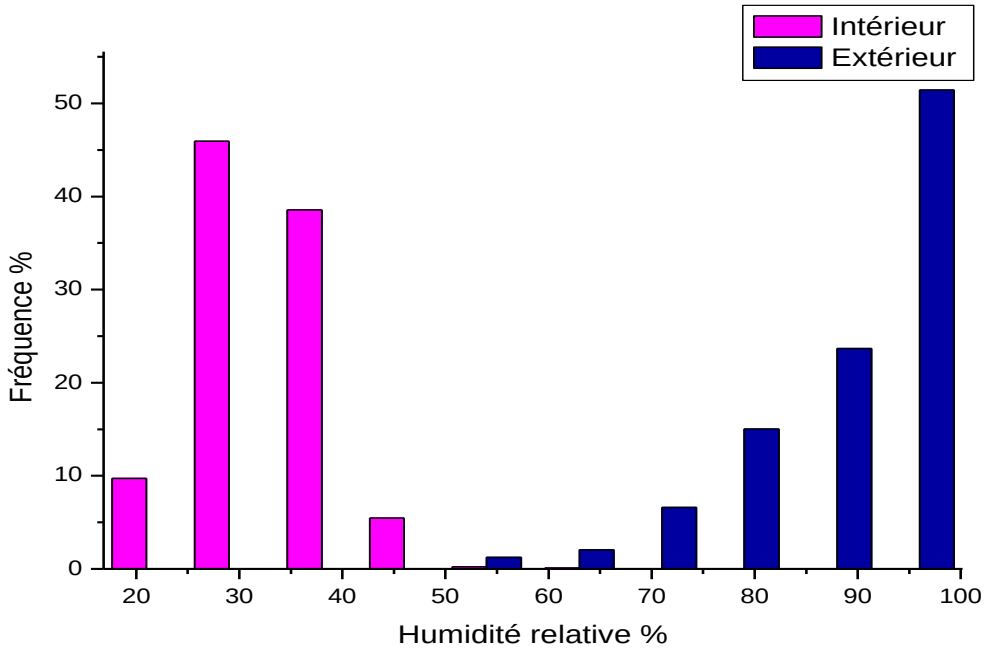


Figure 3.10: Répartition de l'humidité relative à l'intérieur et à l'extérieur de l'appartement A

3.2.1.3. Situation du mois de décembre

Nous avons choisi de se focaliser sur les données du mois de décembre car c'est le mois ou nous avons enregistré la plus haute moyenne de température intérieure. La figure 3.11 présente les variations de température et d'humidité relative durant le mois de décembre. On constate que les deux paramètres varient simultanément. La température intérieure varie entre une valeur minimale de 21°C et une valeur maximale de 29.3°C. La température moyenne est de 24.2°C, avec un écart type de 0.94. L'analyse des données montre que la première semaine du mois de décembre a été la semaine la plus froide durant le mois avec une température extérieure qui varie entre -2.85°C et 8.85°C.

La température intérieure augmente durant la troisième semaine jusqu'à atteindre un maximum de 29.3°C en dépassant de 10°C le seuil réglementaire. Sur cette période, l'humidité relative intérieure varie entre 24% et 59%. Cependant, l'humidité relative extérieure enregistre des valeurs assez élevées variant entre 69% et 100%, ce qui est illustré par le tableau 3.4, signe d'un climat très humide et d'un air saturé

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

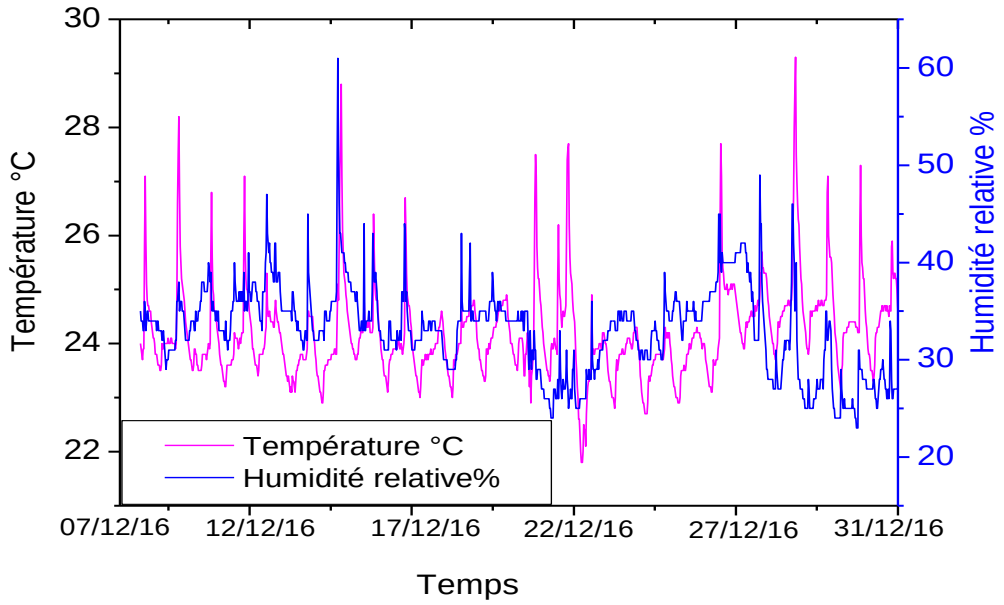


Figure 3.12: Variation de la température et de l'humidité relative durant le mois de décembre dans l'appartement A

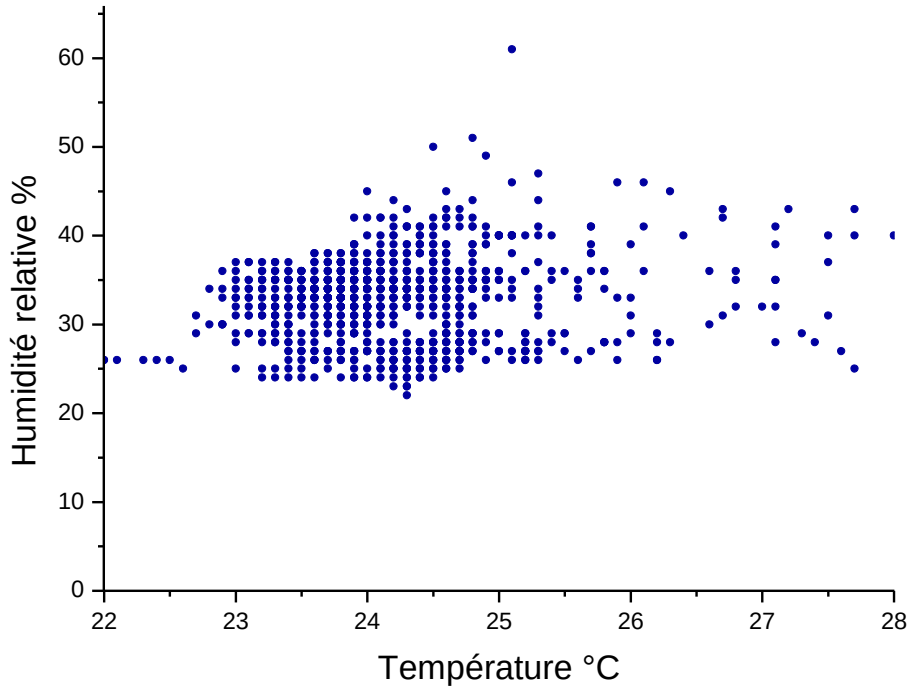


Figure 3.11: Variation de la température intérieure en fonction de l'humidité relative dans l'appartement A

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La figure 3.13 présente la position de l'appartement A sur le diagramme de confort hygrothermique sur la période allant du 08 jusqu'au 12 décembre 2016, la zone optimale de confort se situe entre 18°C et 25°C pour la température et entre 30% à 70% pour l'humidité relative. La représentation des données recueillies dans l'appartement A met en évidence que les conditions climatiques du séjour de l'appartement étudié se situe fréquemment dans la zone de confort. Toutefois, on note quelques passages vers de très basses valeurs d'humidité relative inférieures à 30%, propice au développement de bactéries et de champignons.

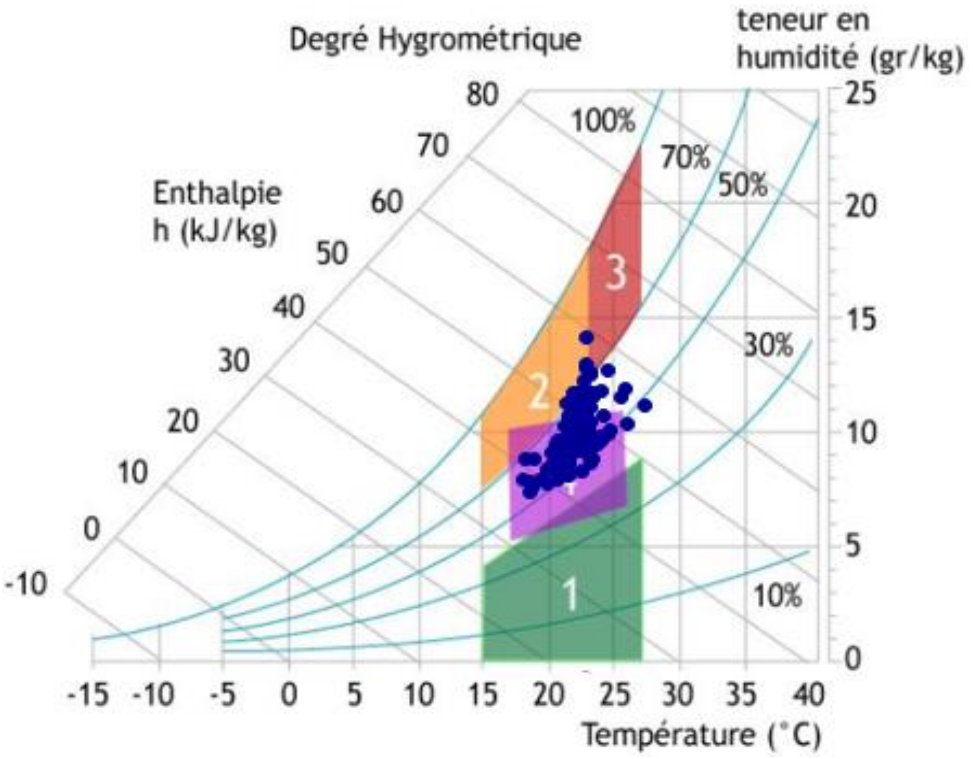


Figure 3.13: Position de l'appartement A sur le diagramme hygrothermique (Diagramme de GIVONI)

3.2.1.4. Comparaison des pièces

La figure 3.14 montre l'influence de la typologie des pièces de l'appartement sur la variation de la température. On constate que la température intérieure dans le séjour est d'une valeur majoritaire de 24°. Elle commence à augmenter pour atteindre de plus hautes valeurs de l'ordre de 25°C et 26°C sur des périodes avoisinant les 20% et 30% jusqu'à arriver à une valeur maximale de 28°C décelée sur une courte période de l'expérimentation de l'ordre de 9%, ce qui équivaut à 11 jours. Cependant, la température intérieure de la chambre demeure cernée entre 21°C et 24°C avec une valeur majoritaire de 23°C mesurée durant 54% du temps

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

d'observation ce qui est l'équivalent de 65 jours. Compte tenu, des températures de référence dites extérieures, on constate que la température mesurée à l'intérieur de l'appartement semble subir aucunement les variations thermiques extérieures.

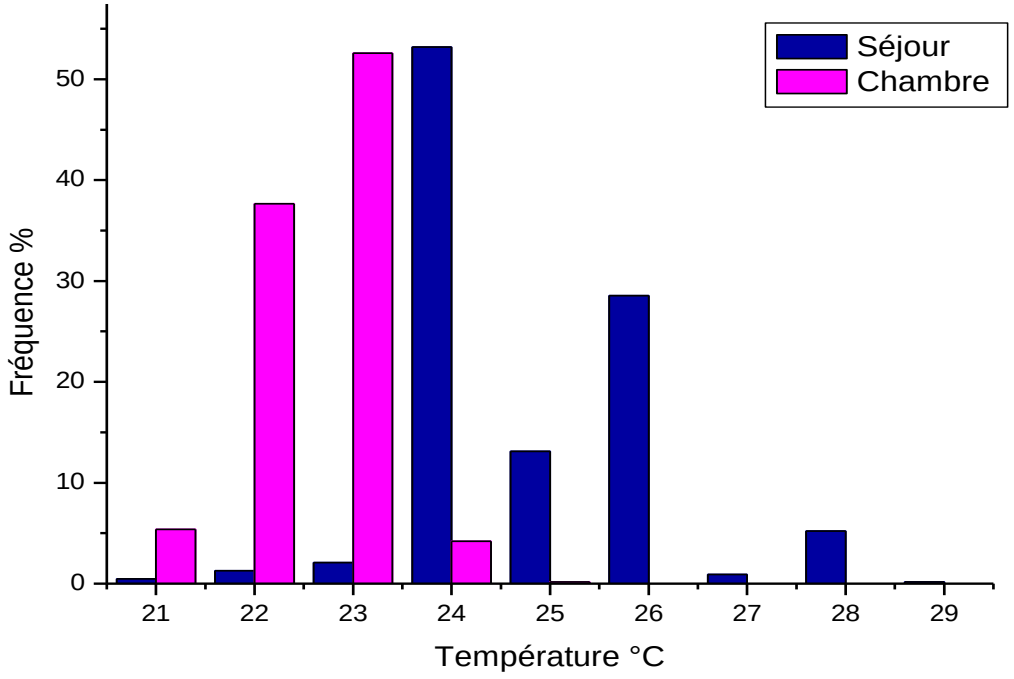


Figure 3.14: Répartition de la température dans deux pièces de l'appartement A

La figure 3.15 illustre la variation de l'humidité relative dans le séjour par rapport à l'humidité relative mesurée dans la chambre. On constate que les valeurs de l'humidité relative dans les deux pièces sont comprises entre 20% et 50 % pour la plupart du temps avec un passage au-delà de 50% sur des durées assez limitées.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

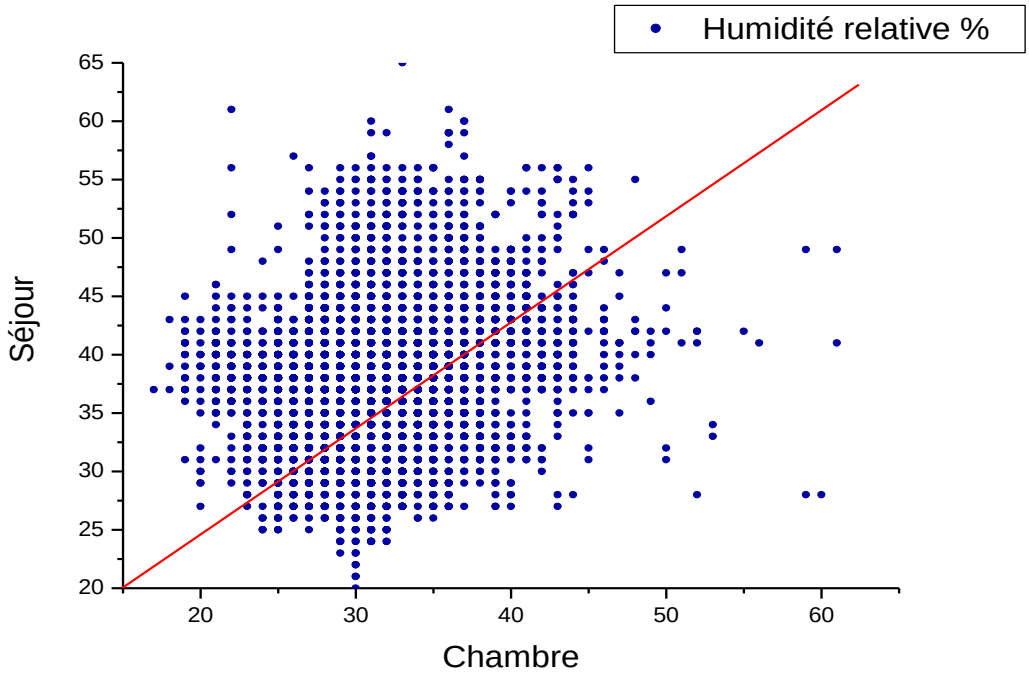


Figure 3.15: La répartition de l'humidité relative dans le séjour par rapport aux valeurs de l'humidité relative relevées dans la chambre

3.2.1.5. Consommation énergétique annuelle

Limites de températures dans les bâtiments collectifs :

Pour limiter les consommations énergétiques liées au chauffage dans les bâtiments, la réglementation prévoit des températures maximales dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. En effet, les articles R.241-25 à R.241-29 du code de l'énergie instaurent l'obligation de limiter la température de chauffage dans les bâtiments. Ainsi, l'article R.241-26 spécifie notamment que dans les locaux à usage d'habitation, les limites supérieures de température de chauffage sont fixées en moyenne à 19° C :

- Pour l'ensemble des pièces d'un logement.
- Pour l'ensemble des locaux affectés à un usage autre que l'habitation et compris dans le même bâtiment.

L'article R.241-27 précise les limites de températures moyennes de chauffage en période d'inoccupation pour les bâtiments collectifs. Ces limites se présentent en 16°C lorsque la durée d'inoccupation est égale ou supérieure à 24h et inférieure à 48h. Et de 8°C lorsque la durée d'inoccupation est égale ou supérieure à 48h.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La figure 3.16 représente la répartition de température ambiante dans l'appartement étudié. On constate que durant 93% du temps d'observation, la courbe de température est située au-dessus de la température de consigne, ce qui nécessite de l'énergie engendrant des frais supplémentaires.

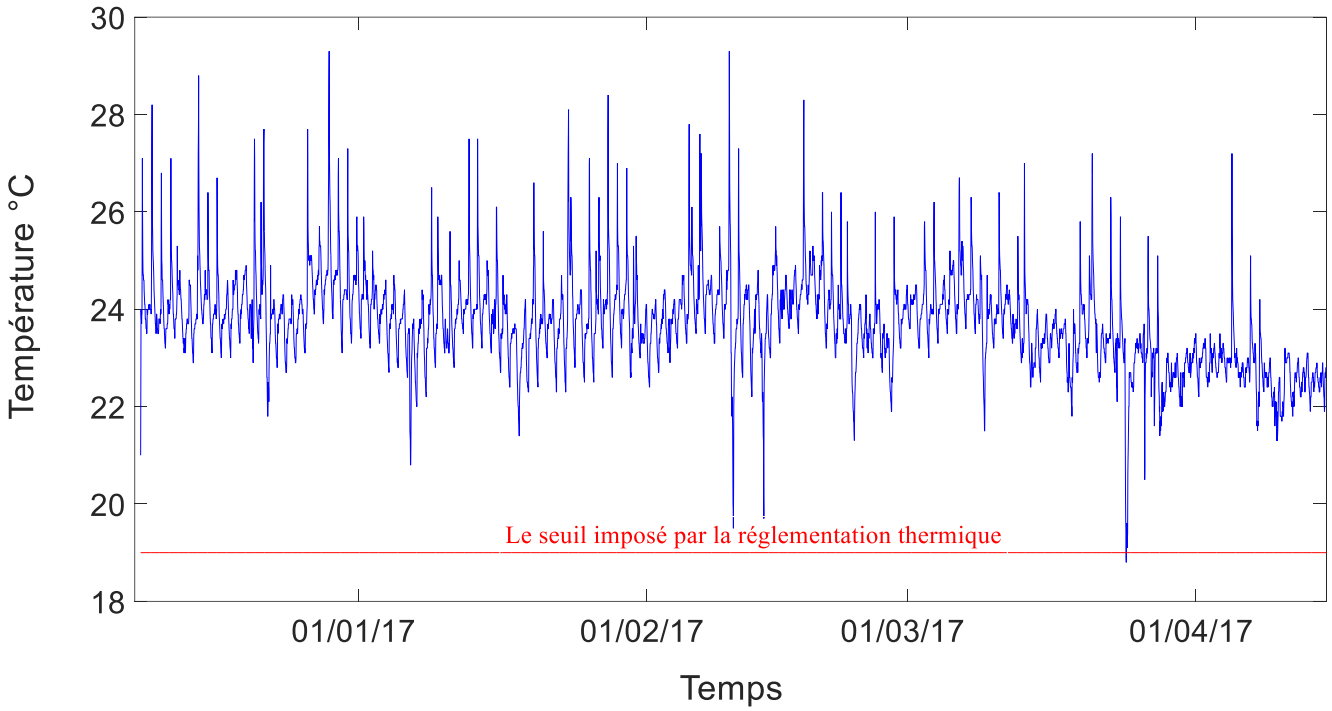


Figure 3.16: Variation de température dans l'appartement A

L'équation suivante permet de calculer le taux de surconsommation qui représente l'environnement intérieur :

$$Q = K \,.\, \Delta T \qquad 3.1$$

Tableau 3.5: Les données de la consommation d'énergie dans l'appartement A

Données énergétiques	**Appartement A**
Moyenne annuelle de consommation de chauffage (kWh/an)	6693.15
Moyenne annuelle des dépenses de chauffage (euro/an)	371
Moyenne annuelle de consommation de chauffage par m² (kwh/m².an)	95
Le coefficient de déperdition global de l'enveloppe W/(m².k)	Ubat=0.749

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

En se basant sur la température de consigne qui est de 19 °C, la consommation annuelle de chauffage ne doit pas dépasser un taux de 4925 kWh par an. Ce qui représente 27% en moins de la consommation d'énergie soit 1768 kWh, avec un ratio de 70.35 kWh/m² par an représentatif de la classe énergétique B comparé à un ratio réel calculé de l'ordre de 95.61kWh/m².an représentatif de la classe énergétique C. Ce ratio reflète le taux d'énergie consommé en surplus dans l'appartement A durant la période de chauffe.

3.2.2. Période de non-chauffe

3.2.2.1. Température intérieure

La figure 3.17 présente la variation de température durant la période d'extinction du chauffage collectif qui s'étend du 15 avril au 15 Juillet 2017. On constate que la température intérieure varie légèrement sur un intervalle allant de 20.9°C à 27.4°C. Cependant, la température extérieure varie continuellement sur un intervalle plus large allant de 0.2°C à 33.3°C. Conformément aux mesures de températures mensuelles, les températures moyennes durant la période de chauffe sont légèrement plus élevées que les mesures durant la période de non-chauffe (+0.5°), au cours de laquelle la température moyenne intérieure est de 24.15° en parallèle de 16.45° à l'extérieur.

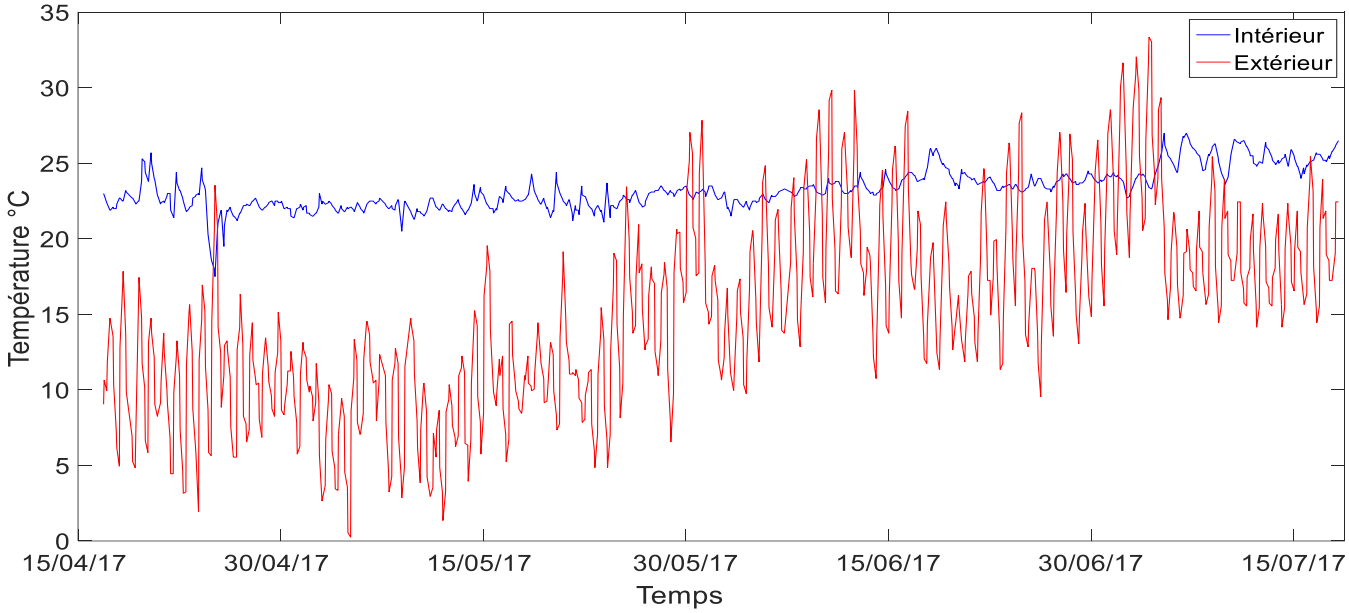


Figure 3.17: Variation de la température à l'intérieure dans l'appartement A

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Tableau 3.6: Températures moyennes mensuelles intérieure et extérieure durant la période de non chauffe

	Minimale		Maximale		Moyenne	
	Intérieure	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**
Avril	18	0.25	27.9	19.55	22.95	9.9
Mai	21.1	8.15	27	22.35	24.05	15.25
Juin	23.2	9.55	26.8	33.35	25	21.45
Juillet	21.3	10.95	27.9	27.45	24.6	19.2
Non-chauffe	20.9	0.25	27.4	33.35	24.15	16.45

La figure 3.18 illustre la répartition de la température à l'intérieur de l'appartement A durant la période de non-chauffe. On enregistre une valeur majoritaire de 23.5° durant 40% du temps d'observation ce qui est l'équivalent à cinquante-sept jours.

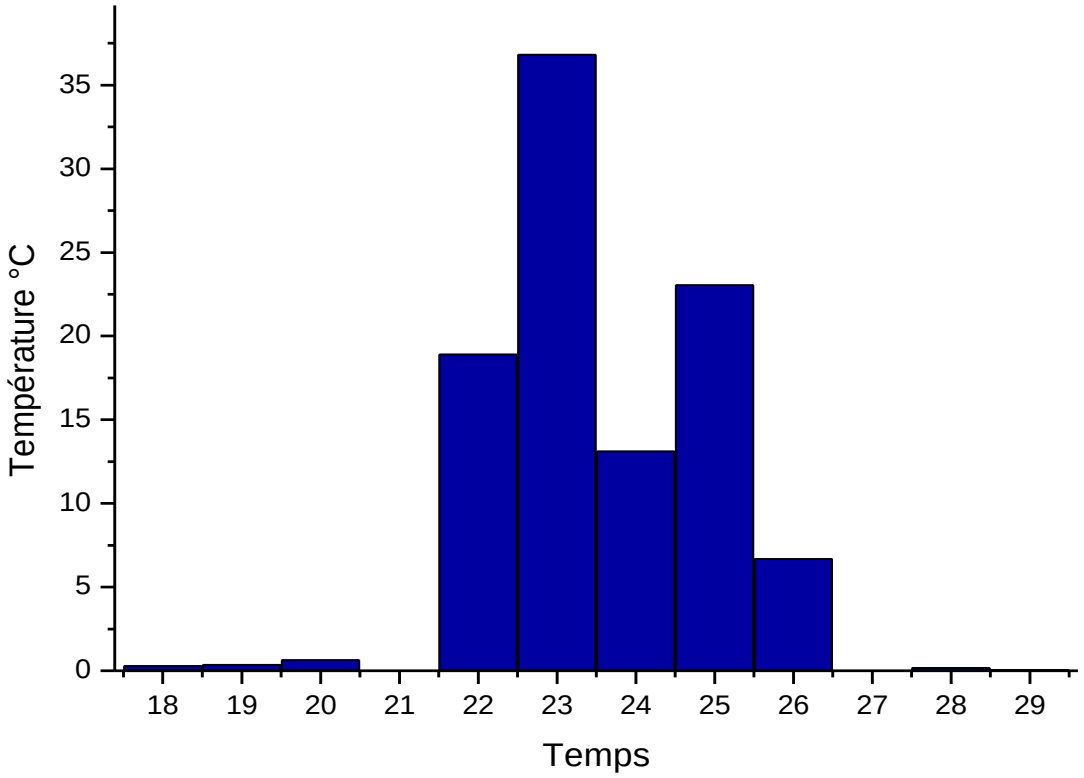


Figure 3.18: Répartition de la température dans l'appartement A durant la période de non chauffe

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La figure 3.19 présente la variation de température à l'intérieur de l'appartement A ainsi qu'à l'extérieur. On constate que les valeurs de température intérieure sont réparties majoritairement entre 23°C à 25°C. Néanmoins, les valeurs de température extérieure sont réparties sur un intervalle assez étalé allant de 5°C à 28°C avec une valeur prépondérante aux alentours de 18°C. La température intérieure semble ne subir aucunement à l'influence de la température extérieure.

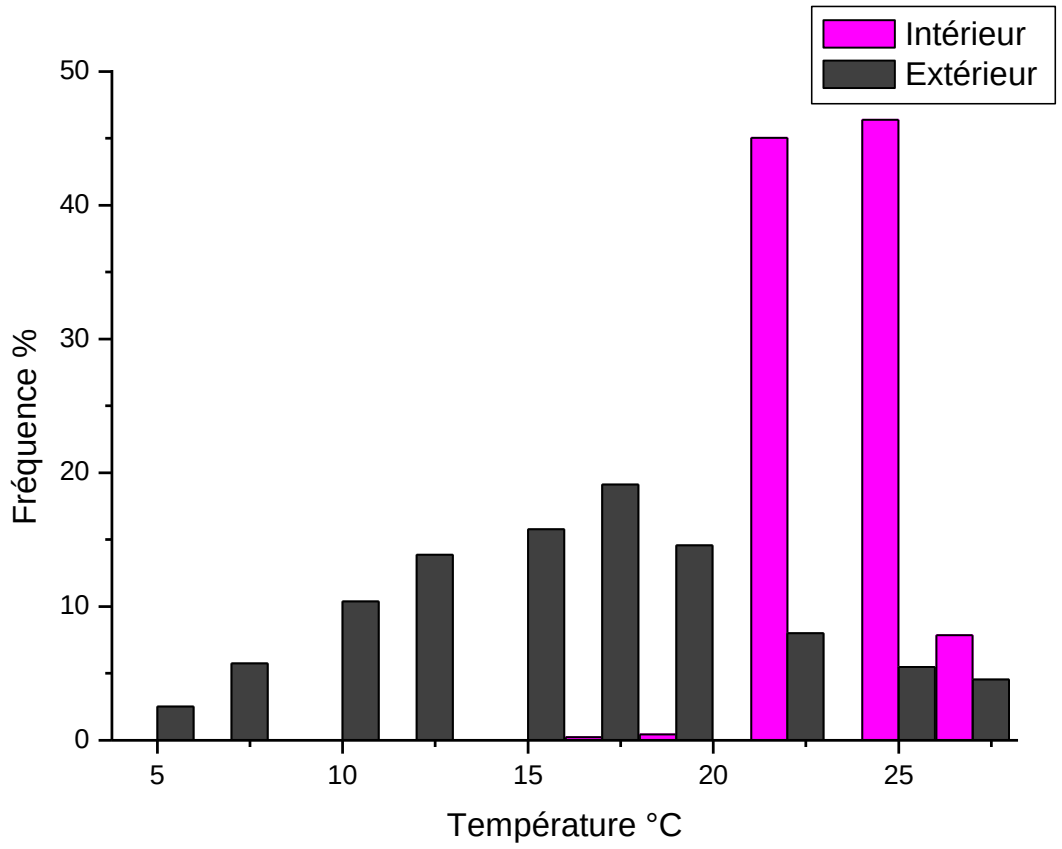


Figure 3.19: Répartition de la température dans l'appartement A ainsi qu'à l'extérieur durant la période de non chauffe

La figure 3.20 présente la répartition de l'écart entre la température intérieure et extérieure durant la période de non chauffe. La répartition est similaire aux résultats précédents avec des cas d'exceptions : la température extérieure est plus élevée que la température ambiante durant 4% du temps soit l'équivalent à 5h du temps d'observation, et le cas où la température intérieure est égale à la température de référence durant 17,14% du temps d'observation ce qui est équivalent à un jour environ.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

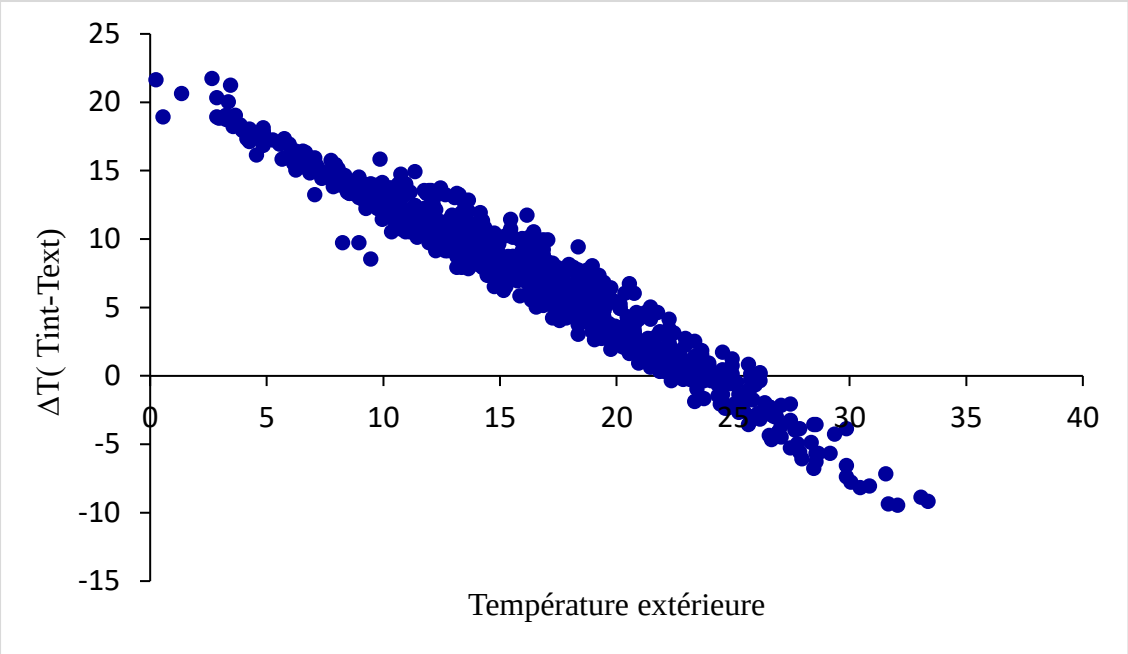


Figure 3.20: Écart de température extérieure et intérieure

3.2.2.1. Humidité relative

La figure 3.21 présente la variation d'humidité relative pendant la période de non-chauffe. On constate que la variation de l'humidité relative varie d'une manière continue et admet plusieurs fluctuations. L'humidité relative varie entre 20% et 65% avec une valeur saisonnière moyenne de 43%.

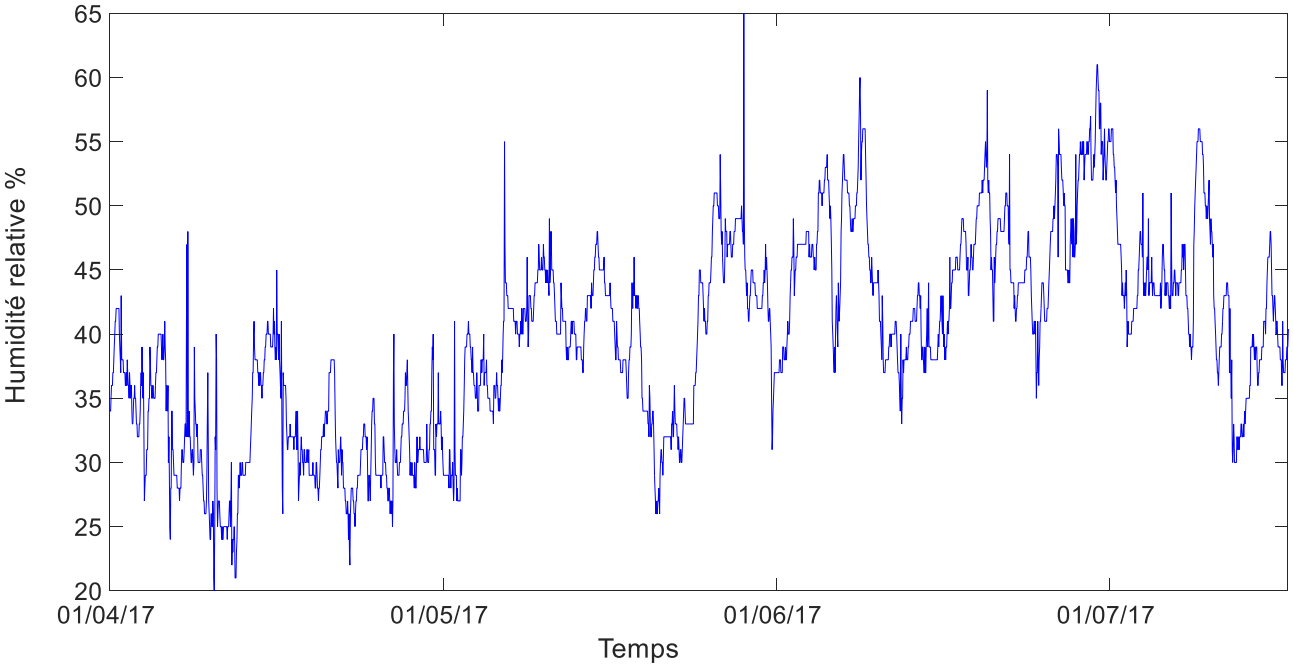


Figure 3.21: Variation de l'humidité relative durant la période de non-chauffe

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Tableau 3.7: Les valeurs mensuelles de l'humidité relative intérieure et extérieure durant la période de non chauffe

	Minimales		Maximales		Moyennes	
HR%	**Intérieure**	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**	**Intérieure**	**Extérieure**
Avril	20	46	48	100	34	73
Mai	26	39	65	97	45,5	68
Juin	30	28	56	99	43	63,5
Juillet	37	31	62	100	49,5	65,5
Eté	20	28	65	100	43	67.5

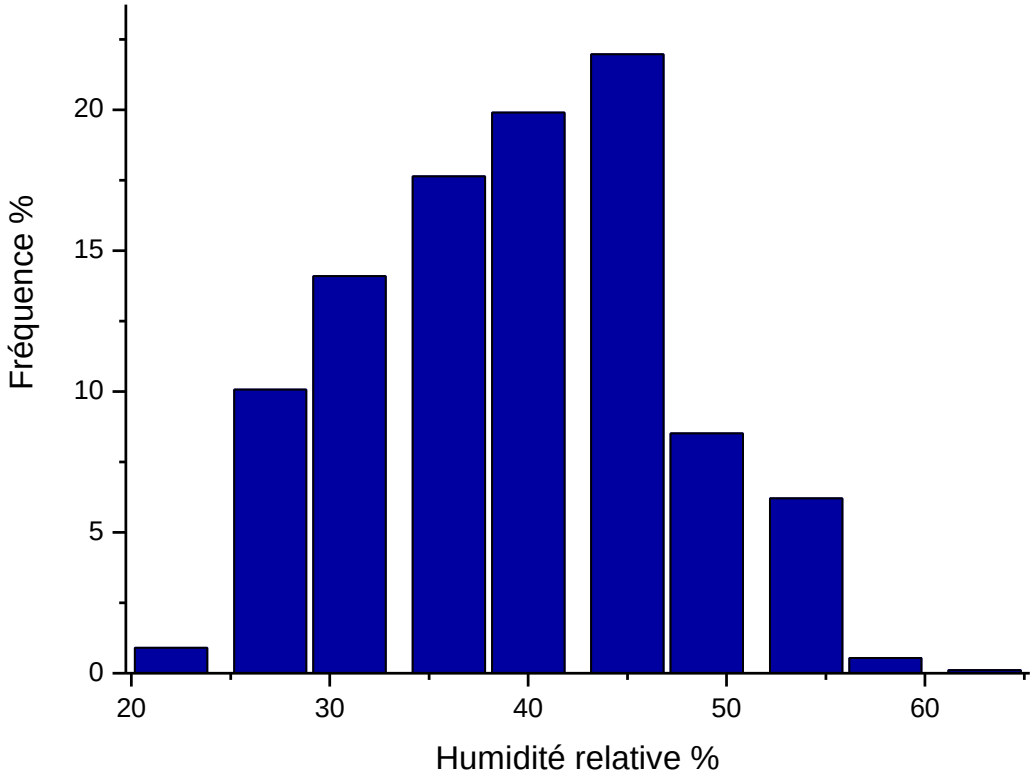


Figure 3.22: Répartition de l'humidité relative dans l'appartement A

La figure 3.23 présente la répartition de l'humidité relative à l'intérieur de l'appartement ainsi qu'à l'extérieur. On constate à l'intérieur de l'appartement une valeur majoritaire de 40% mesurée pendant 38% du temps d'observation. L'humidité relative intérieure passe par de basses valeurs (HR ≤40%), ce qui peut être à l'origine de plusieurs problèmes liés au confort. Tandis que l'humidité relative extérieure varie entre de plus hautes valeurs entre 50% à 94% avec une valeur majoritaire de 94% pendant 38% du temps de la période estivale, ce qui est l'équivalent à quarante-cinq jours. L'humidité relative intérieure est d'une moyenne saisonnière

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

de 43%. Ces données indiquent que le climat extérieur n'a pas d'influence sur l'environnement intérieur.

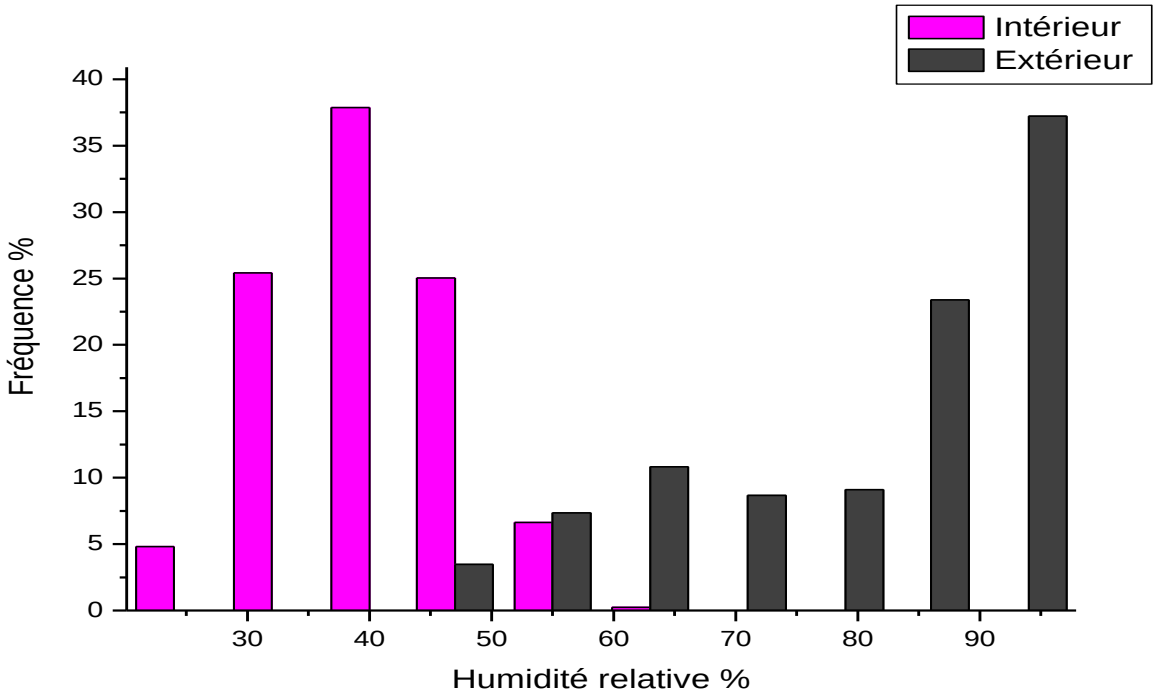


Figure 3.23: Répartition de l'humidité relative dans l'appartement A ainsi qu'à l'extérieur durant la période de non chauffe

3.3. Comparaison entre les appartements

3.3.1. Période de chauffe

3.3.1.1. Température intérieure

La figure 3.24 présente la variation de température dans les différents appartements étudiés. La température varie d'une manière continue à l'intérieur des trois appartements. Elle varie entre 18.9° et 29.3° à l'intérieur de l'appartement A, et entre 21.3° et 25.7° à l'intérieur de l'appartement B. Cependant l'appartement C, admet des fluctuations plus importantes. La température a une allure croissante tout au long de la saison hivernale, elle varie entre 19.2° et 31.3°C. Les plus hautes valeurs sont enregistrées durant les mois de février et mars. Quant à l'appartement B, on enregistre une valeur majoritaire de 23° pendant 56% du temps d'observation, 25° pendant 37% du temps et 22° durant moins de 10% de la période observée ce qui est approximativement similaire aux valeurs enregistrées dans l'appartement A avec de légères variations. Ceci est illustré par la figure 3.25.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

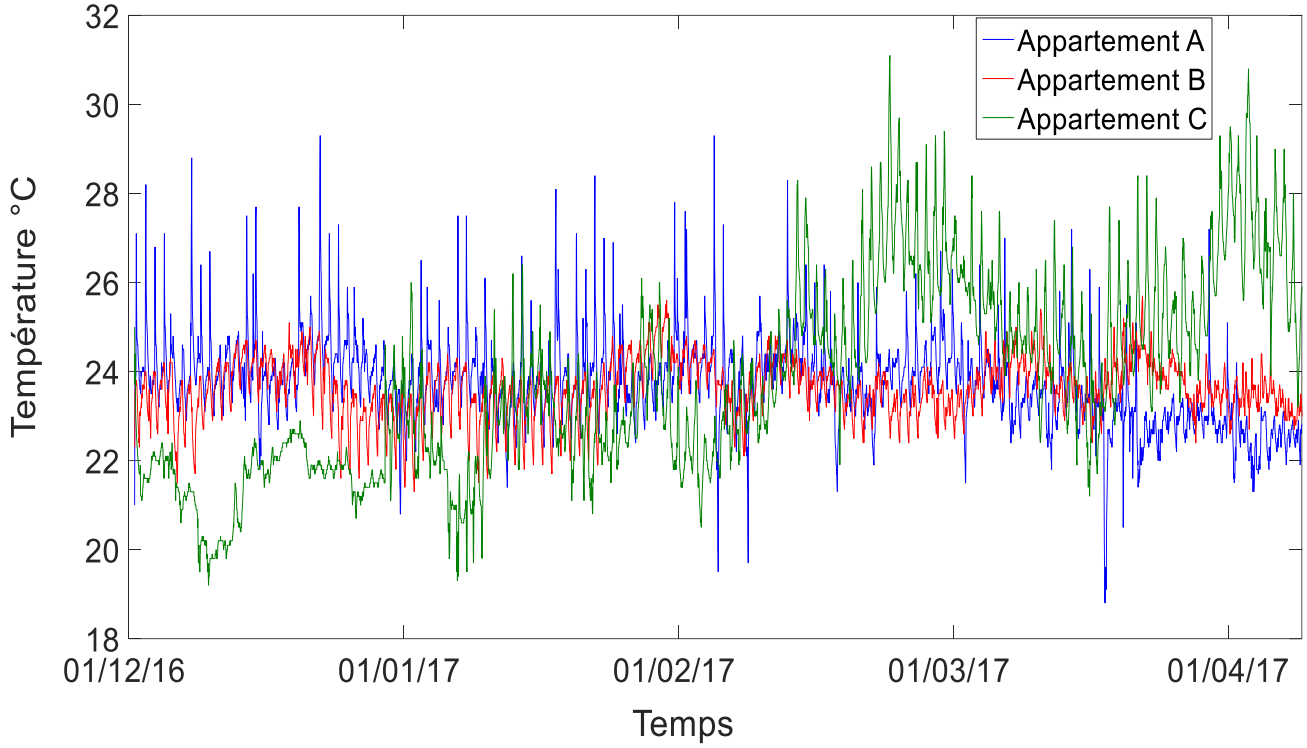


Figure 3.25: Variation de la température dans les différents appartements

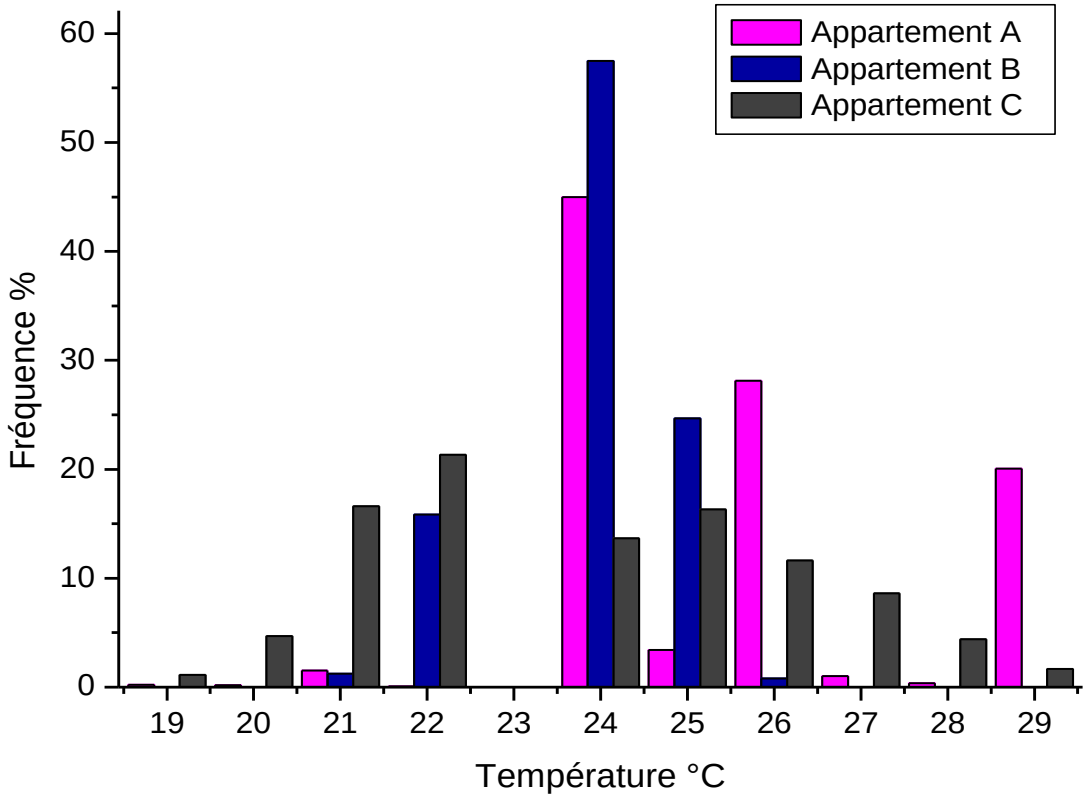


Figure 3.26: Fréquence de la température dans les appartements étudiés

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Tableau 3.8 : Les valeurs mensuelles de la température intérieure durant la période de chauffe dans les différents appartements

Mois	Valeurs	Appartement A	Appartement B	Appartement C
Décembre	Min	21	21.5	19.2
	Max	29.3	25.1	25
	Moyenne	24.1	23.6	21.5
	Ecart-type	0.84	0.66	0.81
Janvier	Min	20.8	21.3	19.3
	Max	28.4	24.8	23.4
	Moyenne	23.8	23.2	22.5
	Ecart-type	0.79	0.66	1.13
Février	Min	19.5	22.1	20.5
	Max	29.3	25.6	31.1
	Moyenne	23.9	23.8	24.1
	Ecart-type	0.86	0.60	1.78
Mars	Min	18.8	22.4	21.2
	Max	27.2	25.7	29.7
	Moyenne	23.4	23.7	25.22
	Ecart-type	0.90	0.56	1.41
Hiver	Min	18.9	21.3	19.2
	Max	29.3	25.7	31.3
	Moyenne	24.1	23.6	23.4
	Ecart-type	0.89	0.66	1.94

La figure 3.26 montre la variation de température à l'intérieur des appartements étudiés pendant le mois de décembre 2017. On constate plusieurs pics sur la courbe de température à l'intérieur de l'appartement A. On enregistre des valeurs maximale allant jusqu'à 29°C. La température varie continuellement dans l'appartement B, avec une valeur moyenne de 24°. A l'inverse des appartements précités, la température à l'intérieur de l'appartement C décroit durant les deux premières semaines du mois de décembre jusqu'à atteindre une valeur de 19°, puis commence à accroitre lentement et puis stagne aux alentours de 22° pendant les cinq derniers jours du mois étudié.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

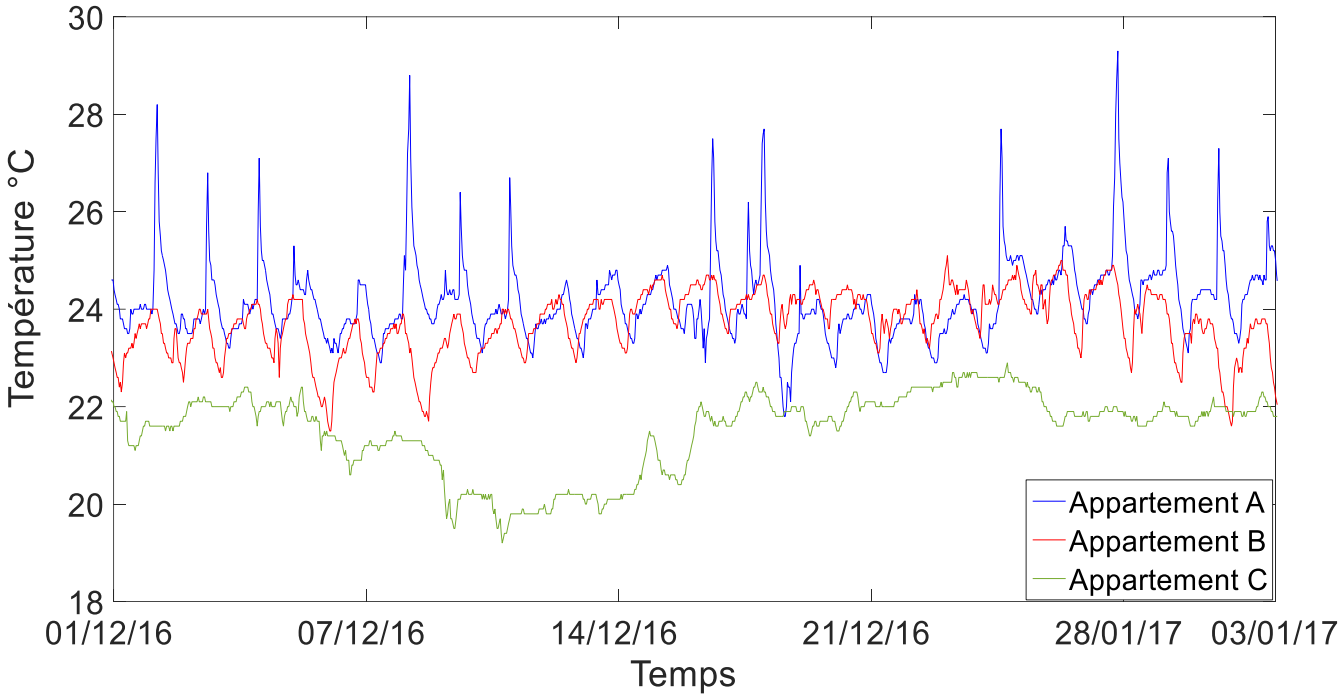


Figure 3.276: Variation de la température pendant le mois de décembre dans les différents appartements

Influence des jours de la semaine sur la variation de température

La figure 3.27 présente la variation de température dans les trois appartements durant les weekends. Dans l'appartement A, on constate une valeur majoritaire de 24 °C pendant 45% du temps d'observation ce qui est l'équivalent à 79 jours, suivie de 25 °C pendant 34 % du temps soit 60 jours. Dans l'appartement B, on enregistre des valeurs plus élevées. On note un passage supérieur à 50% du temps d'observation aux alentours de 24°C ce qui équivaut à une durée de 88 jours, de 25% autour de 25°C, et vers de plus hautes valeurs durant des courtes durées. L'appartement C, admet une valeur prédominante de 22°C durant les weekends pendant 28 % du temps d'observation égale à une durée de 49 jours. On enregistre d'autres valeurs allant de 20°C jusqu'à 29 °C réparties sur de courtes durées tout au long de la période d'observation.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

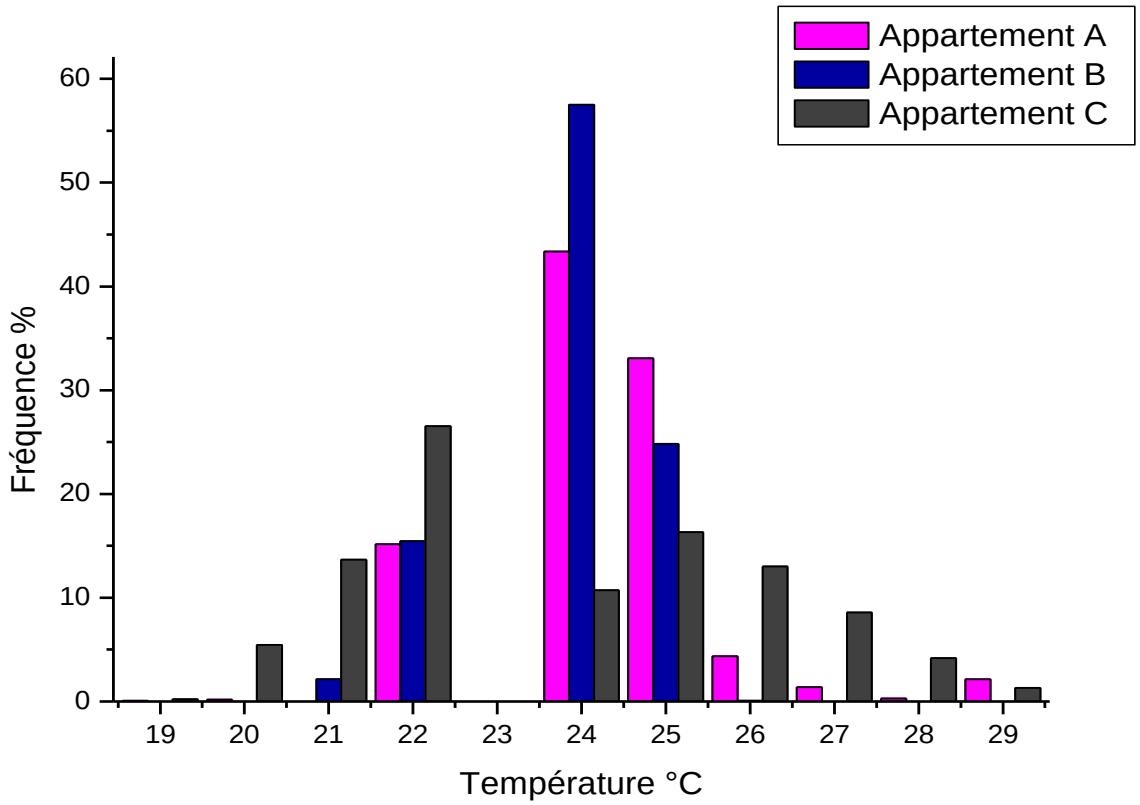


Figure 3.287: Fréquence de la température dans les appartements étudiés en fonction des jours de la semaine

3.3.1.2. Humidité relative

La figure 3.28 illustre la variation de l'humidité relative dans les appartements étudiés. On remarque une variation continue de l'humidité dans les trois appartements. L'humidité relative moyenne dans l'appartement A est aux alentours de 37%, représentatif d'un climat sec, on enregistre des valeurs allant jusqu'à 60% de temps à autre. L'appartement B admet une valeur moyenne de 40% tout au long de la saison hivernale. Cependant, des valeurs plus élevées variant de 40% à 73% sont prélevées dans l'appartement C.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

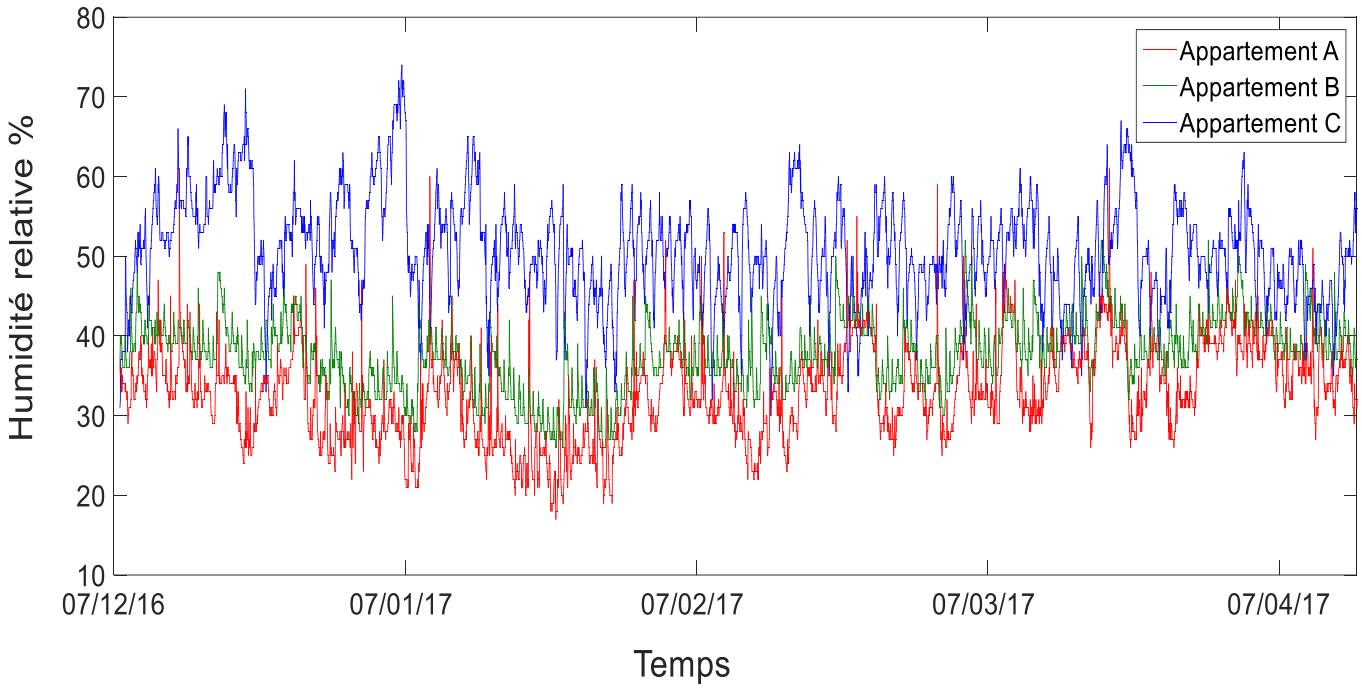


Figure 3.298: Variation de l'humidité relative dans les appartements étudiés

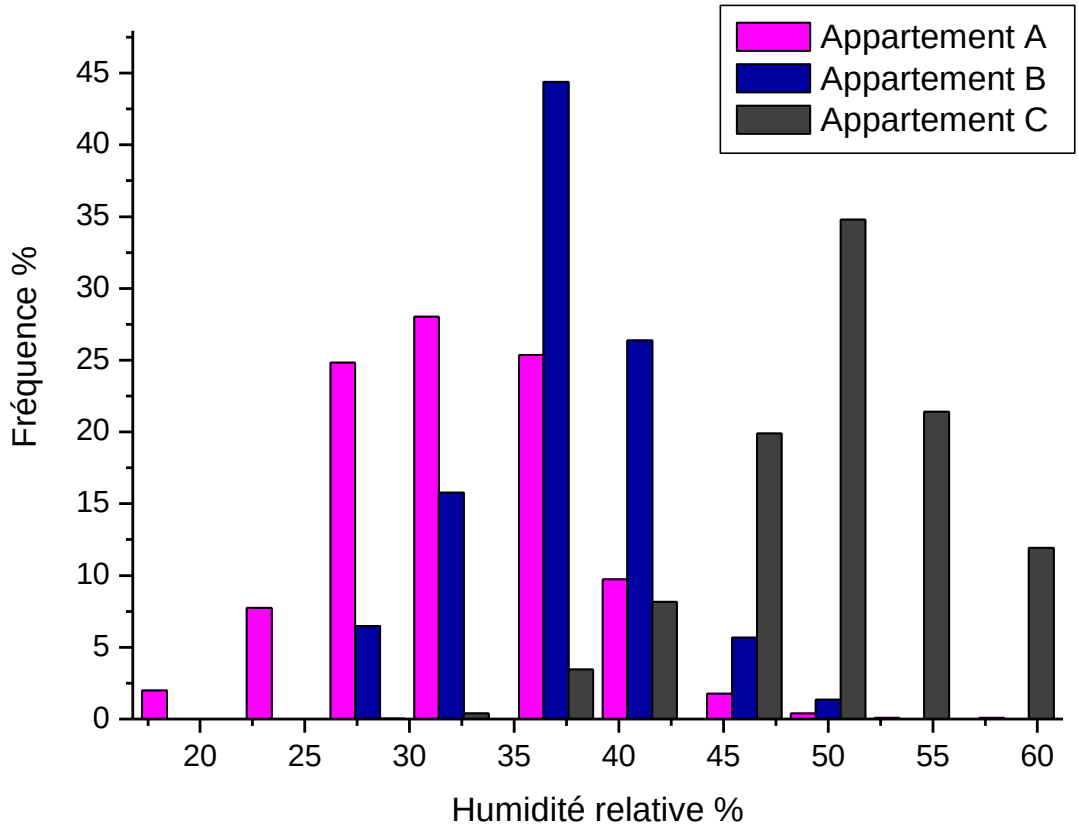


Figure 3.29: Répartition de l'humidité relative dans les appartements étudiés

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Tableau 3.9: Les valeurs mensuelles de l'humidité relative intérieure et durant la période de chauffe dans les différents appartements

Mois	Valeurs	Appartement A	Appartement B	Appartement C
Décembre	Min	22	30	31
	Max	61	48	71
	Moyenne	41.1	39	51
	Ecart-type	4.56	3.28	6.35
Janvier	Min	17	26	31
	Max	60	45	74
	Moyenne	38.5	35.5	52.5
	Ecart-type	4.91	3.93	7.32
Février	Min	22	31	30
	Max	55	50	64
	Moyenne	38.5	40.5	47
	Ecart-type	5.07	3.28	5.82
Mars	Min	25	30	35
	Max	61	52	67
	Moyenne	43	41	51
	Ecart-type	5.09	3.65	5.58
Hiver	Min	17	26	30
	Max	61	52	74
	Moyenne	39	39	52
	Ecart-type	5.67	4.32	6.94

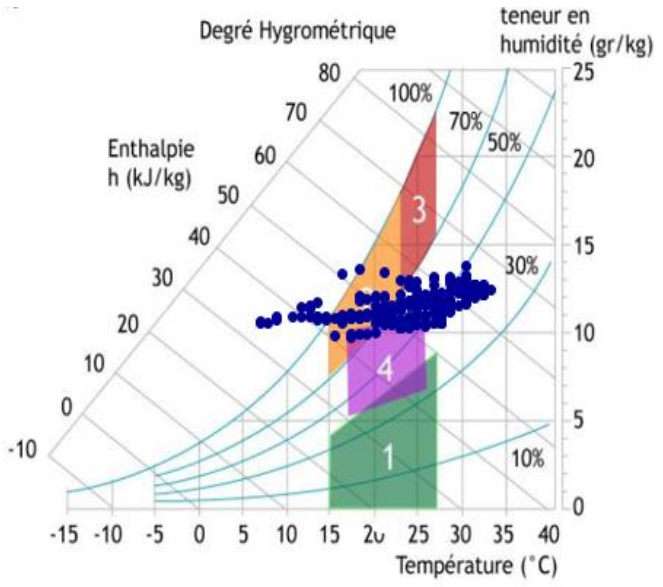


Figure 3.300: Position de l'appartement B sur le diagramme hygrothermique.

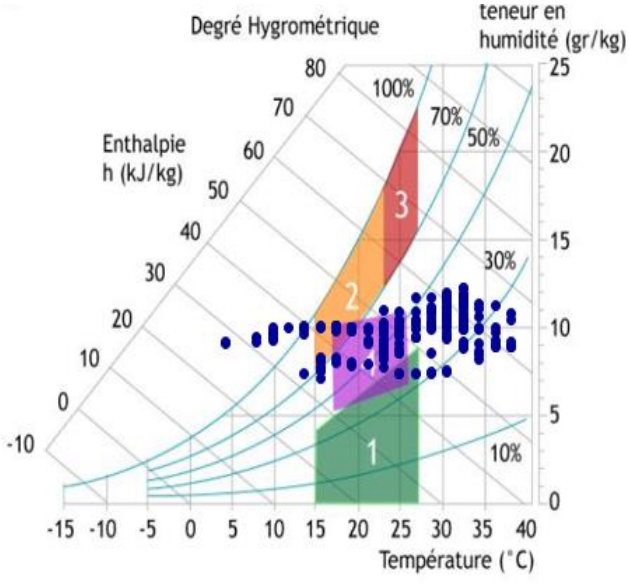


Figure 3.311: Position de l'appartement C sur le diagramme hygrothermique.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Les figures 3.31 et 3.32 montrent la position des appartements B et C sur le diagramme hygrothermique durant la période allant du 08 au 12 décembre 2016. On constate que l'appartement B passe par des périodes de confort thermique et d'autre favorisant le développement des bactéries et des acariens. L'appartement C est situé sur la zone de confort pendant de courtes périodes puis admet de basses valeurs d'humidité relative accompagnées de hauts degrés de température.

3.3.1.3. Consommation énergétique annuelle

En terme de consommation énergétique, l'appartement C présente un taux de consommation de l'ordre de 4517 kWh. Ce taux est plus petit comparé à 6701 kWh pour l'appartement A et 5998 kWh pour l'appartement B. Ceci reflète un usage économe des équipements techniques dans l'appartement C. Tous ces appartements sont équipés du double vitrage, des contours de fenetres en pvc et d'une isolation assez récente. Ils disposent tous du meme coefficient de déperdition global de l'envelppe qui est de Ubat= 0.749 W /(m².k). Si on applique la réglementation thermique qui impose une température de consigne de 19°C en cas d'occupation, l'appartement A ne doit pas dépasser un taux de consommation de 4915 kWh par an, l'appartement B un taux de 4445 kWh par an et l'appartement C un taux de 3326 kWh par an. Ceci engendre un surplus de consommation de 1768kWh par an pour l'appartement A, 1553 kWh par an pour l'appartement B et 1190 kWh par an pour l'appartement C.

Tableau 3.10: Les données énergétiques des appartements étudiés

Données énergétiques	**Appartement A**	**Appartement B**	**Appartement C**
Moyenne annuelle de consommation de chauffage (kWh/an)	6701.44	5998.73	4517.47
Moyenne annuelle des dépenses de chauffage (euro/an)	371.93	332.93	250.72
Moyenne annuelle de consommation de chauffage Avec température de consigne (kWh/an)	4915.13	4445.50	3326.88
Coefficient de déperdition global de l'enveloppe W/ (m².k)	0.749	0.749	0.749

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une analyse des paramètres de confort dans trois appartements durant deux périodes d'observation : Période de chauffe et période sans chauffage. Les données receuillies nous ont permis d'analyser le confort et les consommations énergétiques des logements étudiés. Nous avons choisi un appartement type (A) sur lequel nous avons effectué une analyse globale des paramètres de température et d'humidité relative, ensuite nous avons procédé à la comparaison entres les différents appartements.

Malgré les hautes valeurs de températures prélévées sur l'appartement A, celui-ci ne présente pas de période importante d'inconfort. Cependant, l'analyse montre un confort d'hiver moyennement dégradé dans l'appartement C. L'appartement B étant le plus énergivore.

En utilisant un modèle thermique simplifié, nous allons montrer qu'une économie d'énergie de chauffage de l'ordre de 27% peut être obtenue en respectant les consignes de température réglementaire. Ce résultat est très intéressant. Il sera analysé d'une manière plus détaillée au chapitre suivant.

© 2018 Tous droits réservés. lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Chapitre 4

Modélisation numérique et analyse des économies d'énergie

4.1. Introduction

Ce chapitre présente l'analyse des économies d'énergies que nous pouvons réaliser dans un appartement occupé à l'aide d'une modélisation numérique. Le logiciel de simulation thermique Archiwizard est utilisé dans cette analyse.

Le modèle thermique du bâtiment est validé par comparaison des consommations thermiques estimées avec les consommations réelles. A l'aide du logiciel, nous allons estimer les économies d'énergies que nous pouvons atteindre par l'application des consignes de températures réglementaires.

4.2. Modélisation thermique du bâtiment

Cette section présente la modélisation thermique de l'appartement A à l'aide du logiciel Archiwizard. Elle présente d'abord la construction du modèle numérique du bâtiment et ensuite le calage des paramètres du modèle sur les mesures présentées dans le chapitre précédent.

4.2.1. Outils de simulation dynamique

Les logiciels thermiques du bâtiment sont basés sur deux types de modèles : dynamique et statique. Certains logiciels comme TRNSYS permettent d'ajouter des modules complémentaires comme l'outil AdOCC (Adaptation de l'Occupant/Confort/Comportement) proposé par [MOUJALLED,2007], qui comporte une modélisation dynamique du confort thermique. Un autre type de logiciels est basé sur une approche déterministe avec une définition

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

préalable des scénarios d'usage. On citera par exemple Archiwizard, DesignBuilder, Pléiades+COMFIE et Clima-Win, qui sont utilisés par les professionnels du bâtiment. [MOUJALLED, 2007] propose un modèle de comportement testé dans des bâtiments tertiaires. Les mesures réalisées dans des appartements occupés permettent de mettre en évidence la relation entre la surconsommation énergétique et l'inconfort thermique. Nous avons identifié des états de surchauffe ayant des impacts différenciés sur le confort thermique des occupants. Leur répartition en fonction des différents appartements permet de générer des scénarios représentatifs de l'environnement réel. Dans notre démarche, nous avons choisi d'utiliser le logiciel **Achiwizard,** qui est basé sur une approche déterministe.

Le logiciel Archiwizard qui appartient aux logiciels GRAITEC, permet d'estimer les consommations énergétiques et le niveau de confort des occupants. Suivant les paramètres d'entrée, ce logiciel propose plusieurs solutions technologiques et architecturales. Avec l'application des nouvelles réglementations thermiques et des nouveaux dispositifs environnementaux, il est utilisé comme un outil d'aide à la décision.

Archiwizard permet de simuler le comportement énergétique d'un bâtiment en tenant compte des apports énergétiques extérieurs. Il effectue des calculs sur la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment et réalise le bilan énergétique global à travers l'évaluation des indices Bbio et Cep. Il assure la liaison avec les principaux modèles CAO/BIM. Lors de l'import d'un fichier 3D, une analyse géométrique est lancée pour détecter les éléments thermiques (pièces, parois, baies, ponts thermiques, éléments d'environnement) et pour la création automatique du modèle énergétique à partir de la maquette 3D.

Le logiciel effectue des simulations thermiques dynamiques couvrant l'enveloppe du bâtiment, les phénomènes d'inertie, les protections solaires, les vitrages et l'analyse du confort hygrothermique des occupants, à partir du même modèle 3D utilisé pour les simulations bioclimatiques et les calculs réglementaires RT 2012.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

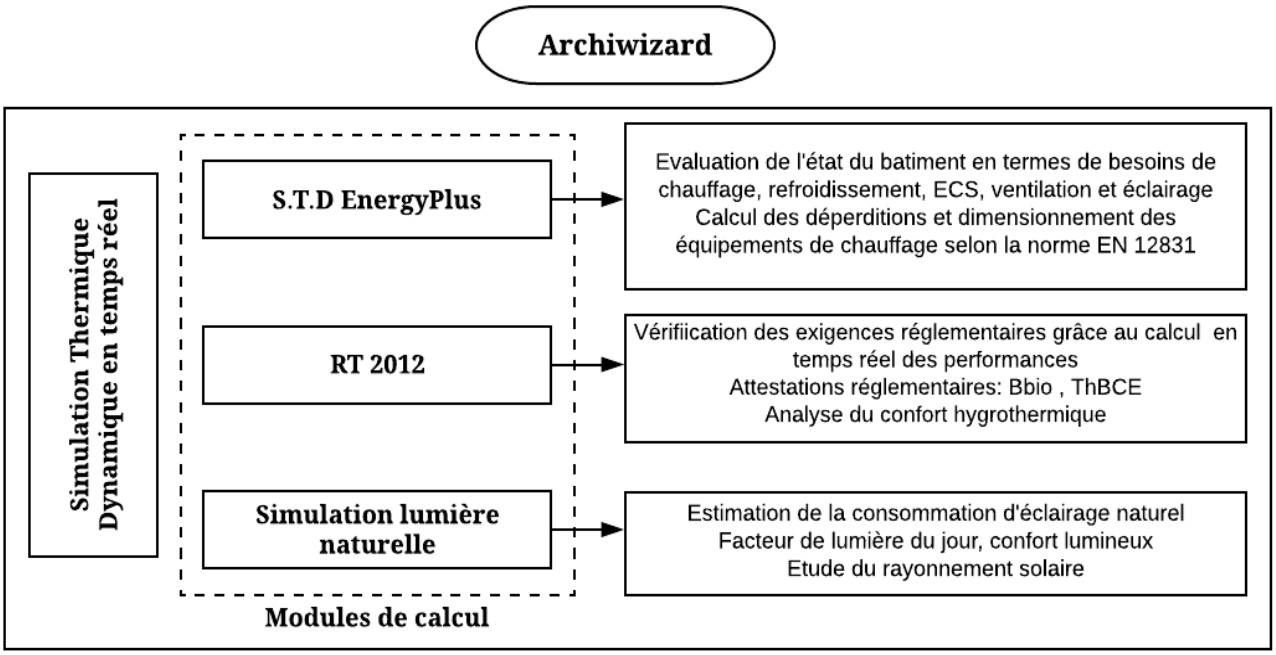


Figure 4.1: Caractéristiques du logiciel Archiwizard

Le logiciel contient un module qui permet de valider la pertinence des choix effectués en termes de confort thermique des occupants grâce à la simulation en temps réel et à la simulation thermique dynamique, mais aussi du confort lumineux grâce à la puissance du raytracing.

Pour réaliser une simulation thermique dynamique, Archiwizard a besoin de trois catégories d'entrées :

- Les caractéristiques architecturales et techniques du bâtiment.

- Les données météorologiques annuelles.

- Les scénarios horaires d'usage : consignes de température, puissance dissipée par les équipements.

Ces données permettent d'évaluer les consommations énergétiques du bâtiment ainsi que l'évolution de la température au pas de temps horaire sur l'année complète. Les besoins en chauffage et climatisation tiennent compte des scénarios suivants : occupation, apports internes, éclairage, ventilation et chauffage ou refroidissement.

Notre démarche est basée sur la méthode proposée par [Yan et al. 2015]. Elle comporte une modélisation du scénario de référence, nommé « réel », qui vise à évaluer la consommation de chauffage théorique du logement. Ensuite, on effectue une analyse de l'effet de paramètres sur la consommation de chauffage. Nous réalisons une variante, correspondant à la variation d'un

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

seul paramètre, tous les autres étant fixés à leur valeur d'origine. Un intérêt sera accordé à l'analyse de ce seul paramètre sur la consommation du chauffage.

4.2.2. Construction du modèle numérique

La résidence est construite en 1973. Elle a subi différentes rénovations, notamment en 2012. Trois modules-appartements ont été créés à travers l'outil Revit. Cet outil permet la saisie graphique et l'affichage 3D des appartements modélisés. L'étude de l'historique technique de la résidence et l'échange avec le bailleur social nous a permis d'identifier les rénovations entreprises depuis la construction et de connaître les caractéristiques constructives de la résidence pour la définition des résistances thermiques de chaque paroi. Les parois en contact avec d'autres appartements ou avec le reste de l'appartement sont considérées comme adiabatiques.

Le coefficient de transmission thermique du bâtiment « Ubât » a été calculé à partir des hypothèses constructives. Il est de 0,749 W/(m².K) et Ubât de référence est de 0.443W/(m².K)

Pour le détail du calcul de l'Ubât :

$$\boldsymbol{Ub\hat{a}t} = (\sum (\ .Ui) + \sum (L \ . \ \psi j))/ \sum Ai \qquad 4.1$$

Ai présente l'aire intérieure de la paroi déperditive i en m², le Coefficient de transmission thermique de la paroi déperditive (Ui) est en W/(m².°C), Lj est la longueur de la liaison du pont thermique et le Ψj est le Coefficient de transmission thermique linéique j, W/(m.°C).

Le plancher du rez-de-chaussée est considéré comme en contact avec un vide sanitaire. Les menuiseries en P.V.C. double vitrage ont un coefficient de transmission Uw de 1,8 W/(m².K). Le débit d'extraction d'air à la bouche de la cuisine est défini suivant les données techniques communiquées par le bailleur.

Les caractéristiques thermiques des matériaux ont été définies par des valeurs standards, or nous savons qu'elles peuvent être affectées par les effets du temps, tout comme le débit des infiltrations d'air. Nous avons pris en compte des hypothèses basées sur les valeurs conventionnelles. Pour finir, nous avons modélisé chaque appartement comme étant une combinaison de plusieurs zones thermiques, sachant que dans un même appartement, les

© 2018 Tous droits réservés. lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

échanges avec les pièces de nuit peuvent être importants malgré la différence entre leurs scénarios d'usage et ceux des pièces de jour.

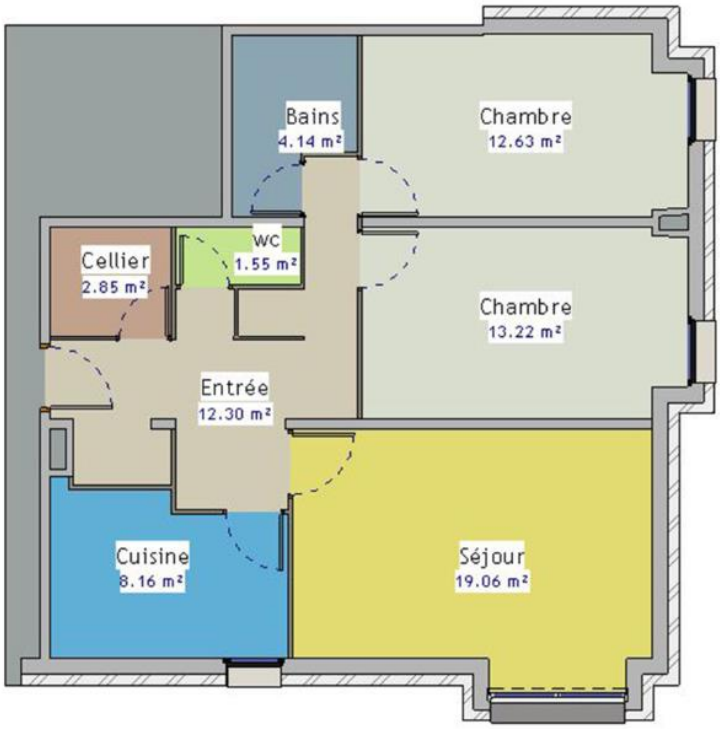
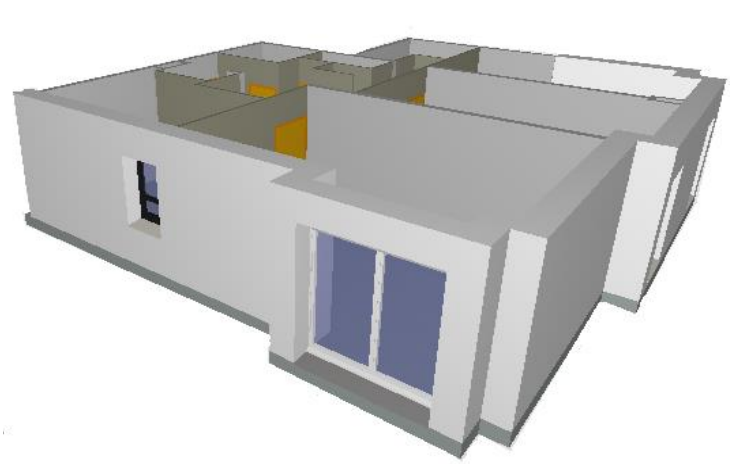


Figure 4.2: Plan de l'appartement A avec les différentes parois



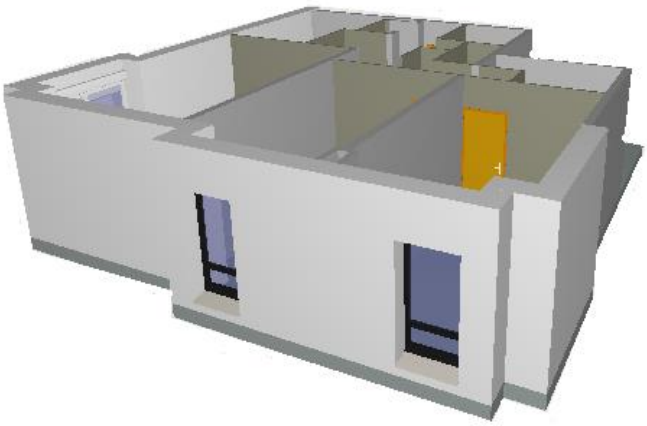


Figure 4.3: Modélisation 3D de l'appartement A ; (a) Façade exposée du séjour Sud-Est (b) Façade correspondant à la chambre exposée Nord-Est

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Tableau 4.1: Compositions des parois du modèle

Composition	**Matériau**	**Epaisseur (cm)**	**Résistance Thermique ($m^2.K.W^{-1}$)**		**Conductivité W/ (m.K)**
Paroi extérieure	Plaque de plâtre	1,3	0,04	1,72	0,325
	Laine minérale	6	1,58		0,038
	Béton armé	20	0,09		2,3
	Enduit ciment	1	0,01		0,95
Paroi intérieure	Plaque de plâtre	1,3	0,04	1,26	0,325
	Laine minérale	4,5	1,18		0,038
	Plaque de plâtre	1,3	0,04		0,325
Planchers intermédiaires	Béton	15	0,07	0,11	2,299
	Chappe traditionnelle	5	0,04		1,2
Plancher RDC	Polystyrène extrudé	10	3,12	3,23	0,032
	Béton	15	0,07		2,299
	Chappe traditionnelle	5	0,04		1,2

4.2.3. Le modèle météorologique

Nous avons précisé dans le deuxième chapitre que nous adoptons la station météorologique de Lille-Lesquin dans notre étude. Grâce à la base de données Meteonorm, nous utilisons les données horaires de température des années 2016 et 2017. Le modèle météorologique comporte des limites : le site d'étude est situé au sein d'un ensemble urbain alors que les données sont issues d'une station météorologique située à 10 km du site d'étude. Nous n'allons pas prendre en compte l'effet du site.

4.2.4. Scénario basé sur les mesures réelles

Nous allons commencer par la réalisation des simulations avec le scénario issu des données réelles. Ceci nous permet de valider le modèle thermique. Sur le même scénario, nous allons tester l'influence des apports de l'occupation.

Ce scénario est basé sur les mesures réalisées et les données d'usage. Les données sont définies à un pas de temps horaire. Nous prenons en compte la présence de deux personnes à partir de 16 h dans l'appartement. Nous avons défini quatre semaines de vacances durant lesquelles

© 2018 Tous droits réservés. lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

l'appartement est inoccupé : les deux premières semaines d'octobre et les deux dernières de février.

En ce qui concerne le système de chauffage, il est activé pendant la période de chauffe soit du 14 octobre au 15 avril. La température de « consigne intérieure » a été déterminée en prenant la moyenne des températures mesurées tous les dix jours (Figure 4.4). Elle varie entre un minimum de 22,6°C et un maximum de 24,2°C. La température de consigne moyenne est de 23,7°C.

Les apports des équipements ont été définis d'après la RT 2012 : 5,7 W/m² lorsque l'appartement est occupé et 1,14 W/m² lorsqu'il est inoccupé.

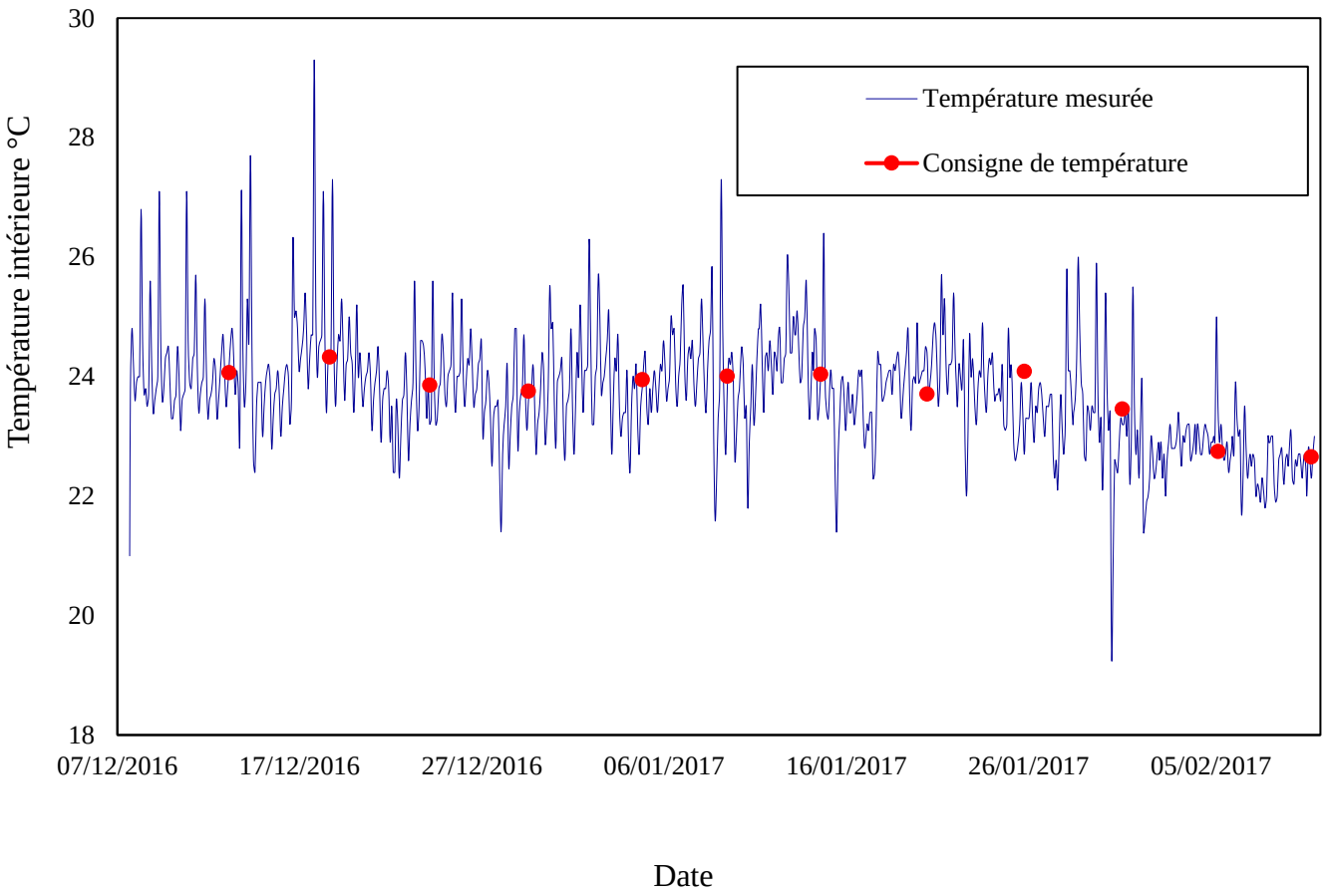


Figure 4.4: Les températures mesurées et les températures de consigne dans l'appartement A

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

4.2.5. Résultats

La figure 4.5 présente une comparaison de la température du modèle numérique et la température de consigne. La température du modèle numérique varie entre 21,4°C et 25,2°C avec une température moyenne de 24,6°C. La température de consigne varie entre 22,6° et 24,2°C avec une moyenne de 23,7°C. L'écart moyen entre ces températures est inférieur à 1°C.

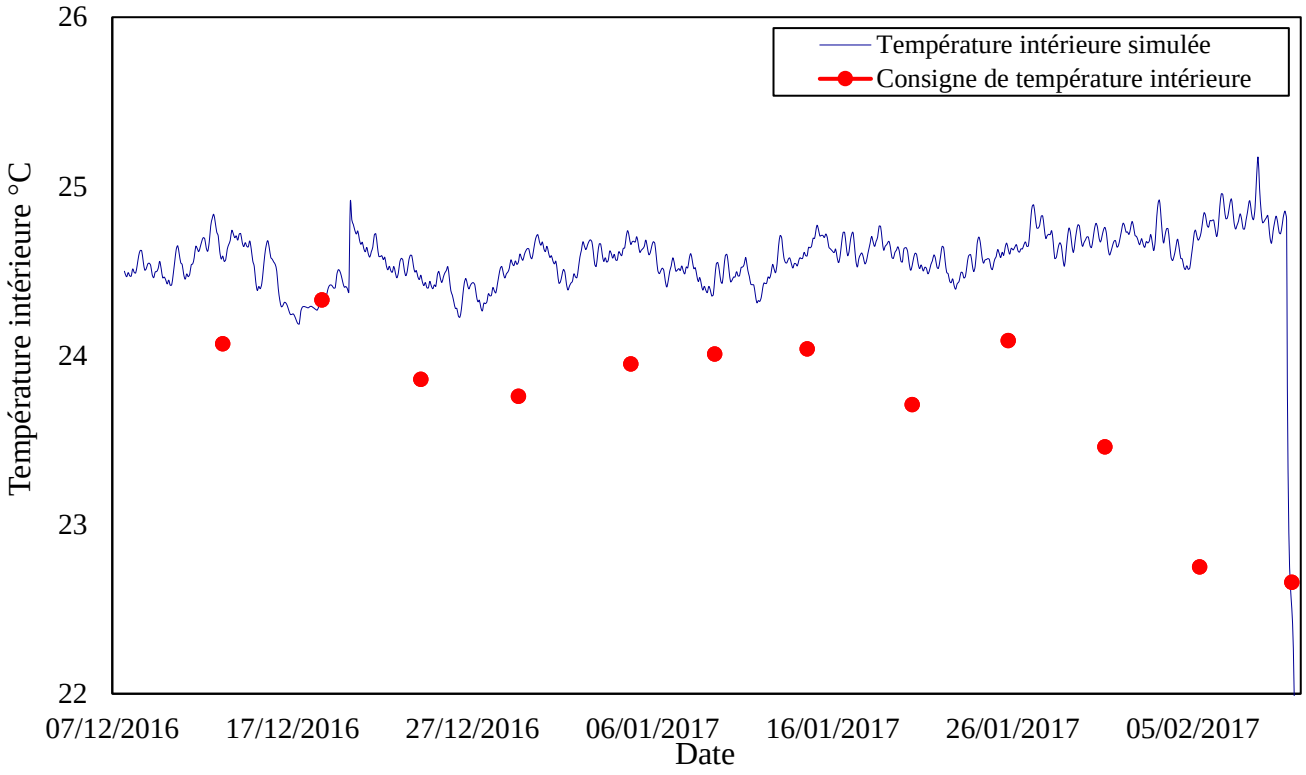


Figure 4.5: Comparaison de la température du modèle numérique et la température de consigne

Les besoins nets mensuels en énergie représentent l'énergie que les systèmes de chauffage ou de refroidissement doivent fournir pour maintenir une température de consigne. Le besoin net en énergie est calculé à partir de la relation suivante :

$$Qnet = QL - \eta util.\ Qg \qquad 4.2$$

- Déperditions de chaleur [MJ] : $Q_L = Q_T + Q_V$
- Gains de chaleur [MJ] : $Qg = Q_i + Q_s$.
- Taux d'utilisation des gains de chaleur [-] : $\eta util$.

Q_T et Q_V représentent les pertes par transmission et par ventilation, Q_i est la production de chaleur liée aux occupants et aux équipements et Q_s est l'apport solaire.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La figure 4.6 présente la comparaison entre les dépenses de chauffage fournies par le bailleur et les résultats de simulation. La consommation de chauffage estimée par le bailleur est de 6701 kWh et le besoin de chauffage simulé est de 7119 kWh. Le modèle numérique surestime de près de 6% les consommations réelles. Ce résultat est en accord avec la conclusion de [Yan et al. 2015] « Les modèles thermiques présentent une marge d'erreur moyenne de l'ordre 18% ». Signalons que l'erreur de notre modélisation est de 6%.

Apport des occupants

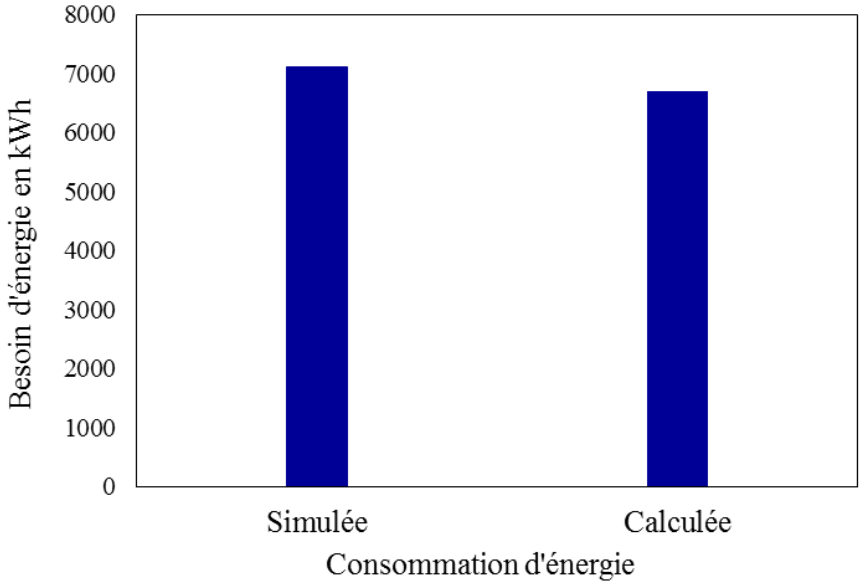


Figure 4.6: Consommation de chauffage calculée et besoin simulé avec le scénario réel

Cette section présente une analyse des apports dus à l'occupation dans le but de comprendre leur influence sur les consommations d'énergie. La figure 4.7 présente la différence entre les besoins de chauffage simulés avec ou sans apports de l'occupation. On note que la considération de l'occupation se traduit par une réduction des consommations d'énergie de l'ordre de 8%.

En utilisant la méthode du bilan de « Carrier », les apports sensibles par les occupants sont donnés par la relation suivante :

$$Appsocc = Nbocc * Asocc \qquad 4.3$$

Nbocc représente le nombre d'occupants pour la période considérée et *Asocc* est l'apport sensible en watt, par occupant pour la période considérée.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Pendant la période de chauffe, l'occupant de l'appartement a fourni 680 kWh de chaleur gratuite au logement. On note un écart de l'ordre de 9%, ce qui confirme le résultat de la simulation.

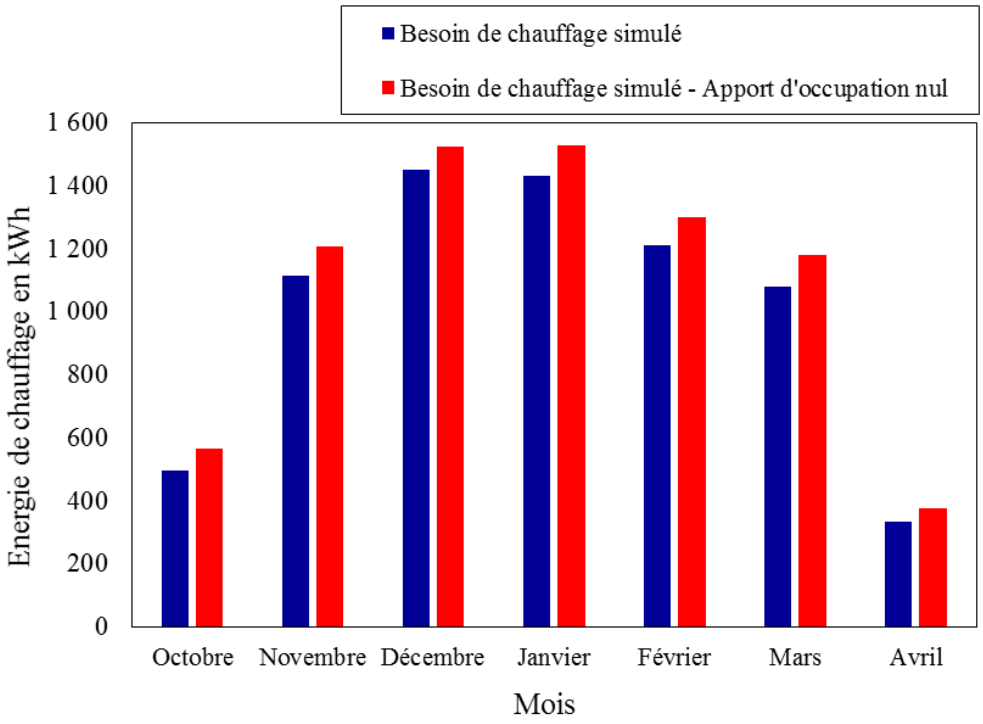


Figure 4.7: Comparaison entre le besoin de chauffage simulé avec les scénarios issus de l'état réel et le besoin de chauffage simulé avec un apport du à l'occupation nul.

Apport des équipements

La quantité totale de chaleur libérée par les d'équipements est déterminée par l'utilisation et l'allumage de ces équipements. Des campagnes de mesure ont montré la contribution de ces apports internes à l'augmentation des consommations d'énergie [Firlag, et al. 2013]. Les apports dus aux équipements sont de l'ordre de 26.3kWh/m² dans le logement étudié, ce qui fait un total de 1921.47 kWh.

Tableau 4.2: Apports internes de chaleur en fonction des équipements pris en compte (Valeurs selon la réglementation thermique)

Equipements pris en compte	**Apports internes de chaleur en kWh/ m²**
Cuisson	3,7
Audiovisuel	6,8
Informatique	5,0
Lavage	0,6
Froid	8,0
Appareils ménagers	2,2
Total	26,3

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

4.3. Analyse paramétrique

Dans cette partie, on va étudier l'influence des scénarios d'usage sur les consommations d'énergie. Les scénarios d'usage comportent l'ensemble des éléments d'usage du logement: l'occupation, la consigne de température et les apports internes dus aux équipements. Les scénarios sont définis sur l'année au pas de temps horaire.

Le but de simuler différents scénarios d'usage est de comprendre les implications énergétiques des données de températures prélevées durant la période d'expérimentation.

On définit deux scénarios d'usage dont les données et les hypothèses seront détaillées dans la (Figure 4.8) :

- Scénarios Conventionnels
- Scénarios de la RT 2012.

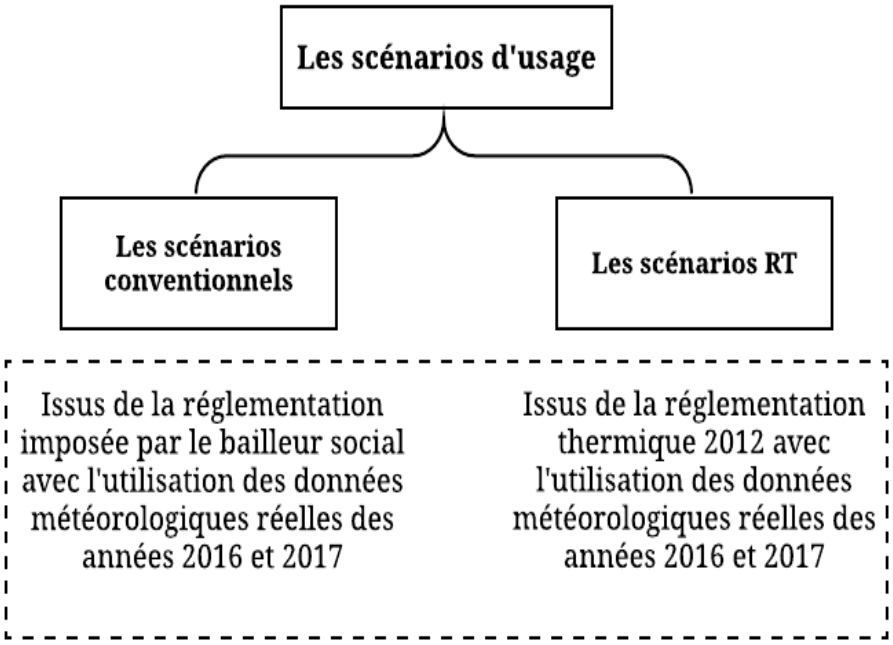


Figure 4.8: Les scénarios d'usage utilisés pour la simulation thermique dynamique

Nous allons procéder à des simulations avec des scénarios conventionnels qui permettent de mettre en évidence les écarts de consommations énergétiques. Ensuite, nous allons réaliser des simulations avec un modèle basé sur la réglementation thermique pour estimer les économies d'énergie que nous pouvons réaliser.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

4.3.1. Scénarios conventionnels

Nous avons fixé les données de la manière suivante :

L'occupation : Nous avons pris en compte la présence de deux personnes à partir de 16 h dans l'appartement. Nous avons défini quatre semaines de vacances durant lesquelles l'appartement sera inoccupé : les deux premières semaines d'octobre et les deux dernières de février.

Consigne de température : Nous avons considéré la consigne de température imposée par le bailleur, soit 19°C.

Apports internes dus aux équipements : Les apports internes ont été défini d'après la RT 2012, deux niveaux d'apports internes : 5,7 W/m² lorsque l'appartement est occupé et 1,14 W/m² lorsqu'il est inoccupé.

La figure 4.9 présente une comparaison des besoins de chauffage entre le scénario avec les températures mesurées et le scénario avec une température de consigne de 19°C. On observe que le respect de consigne de 19°C permet une importante économie d'énergie, allant jusqu'à plus de 50% en octobre et Avril. En moyenne, l'économie d'énergie sur la période de chauffe est de 41%. Ce résultat est en accord avec le constat de [Meester et al. 2012] qui a analysé l'impact du comportement des occupants sur les consommations de chauffage en prenant en compte comme variantes principales : le nombre d'occupants, la gestion de l'espace chauffé et la gestion du système de chauffage. A travers des simulations réalisées sur une maison en considérant deux modes d'occupation, deux modes de gestion de l'espace chauffé et quatre types de consignes de chauffage, ils ont prouvé qu'une baisse de quelques degrés de la température de consigne durant une période d'inoccupation peut réduire d'environ 10% les consommations annuelles de chauffage.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

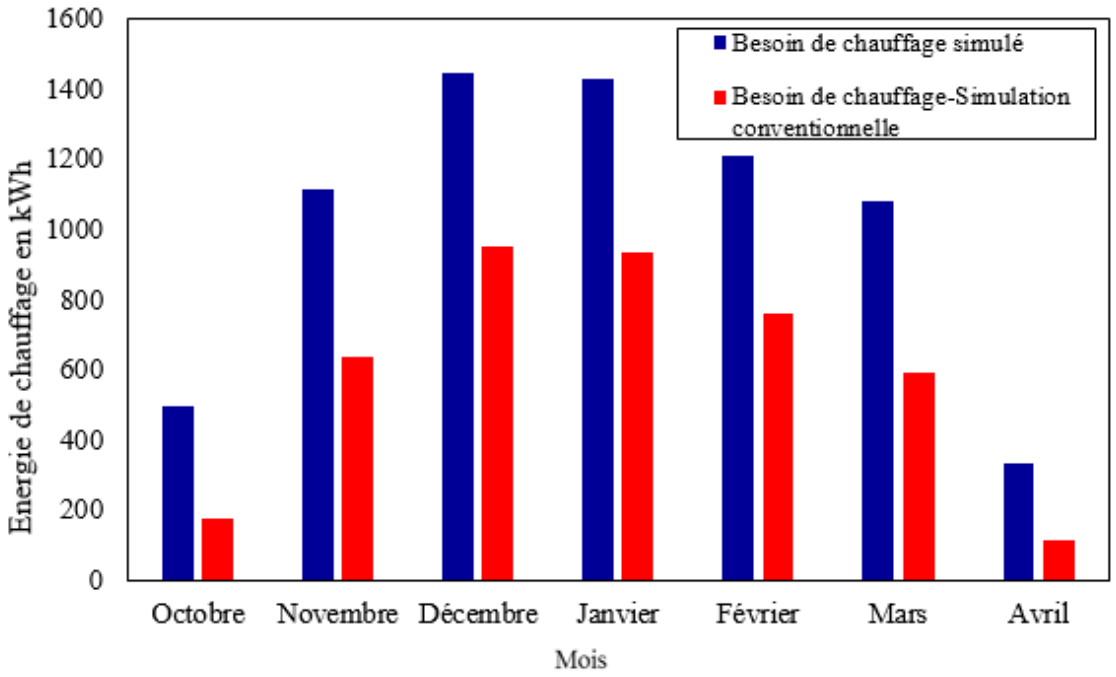


Figure 4.9: Besoin d'énergie simulé (Scénario réel comparé au scénario conventionnel)

En se référant aux calculs effectués dans la section 3.2.2.1, nous avons estimé une consommation de 4925 kWh avec une économie d'énergie allant jusqu'à 27%. Les résultats de simulation obtenus dans cette section donnent des économies plus importantes : de l'ordre de 41%.

Répartition des consommations

La figure 4.10 présente les besoins de chauffage dans le séjour et dans la chambre. La consigne de température dans la chambre a été réduite à 16°C de 10h jusqu'à 22h. Le besoin de chauffage moyen dans le séjour est de 27,2 kWh/m² et de 22,2 kWh/m² dans la chambre, ce qui représente un écart de 17% entre les deux pièces. Cet écart s'explique par l'influence du mode d'occupation et de la consigne de température.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

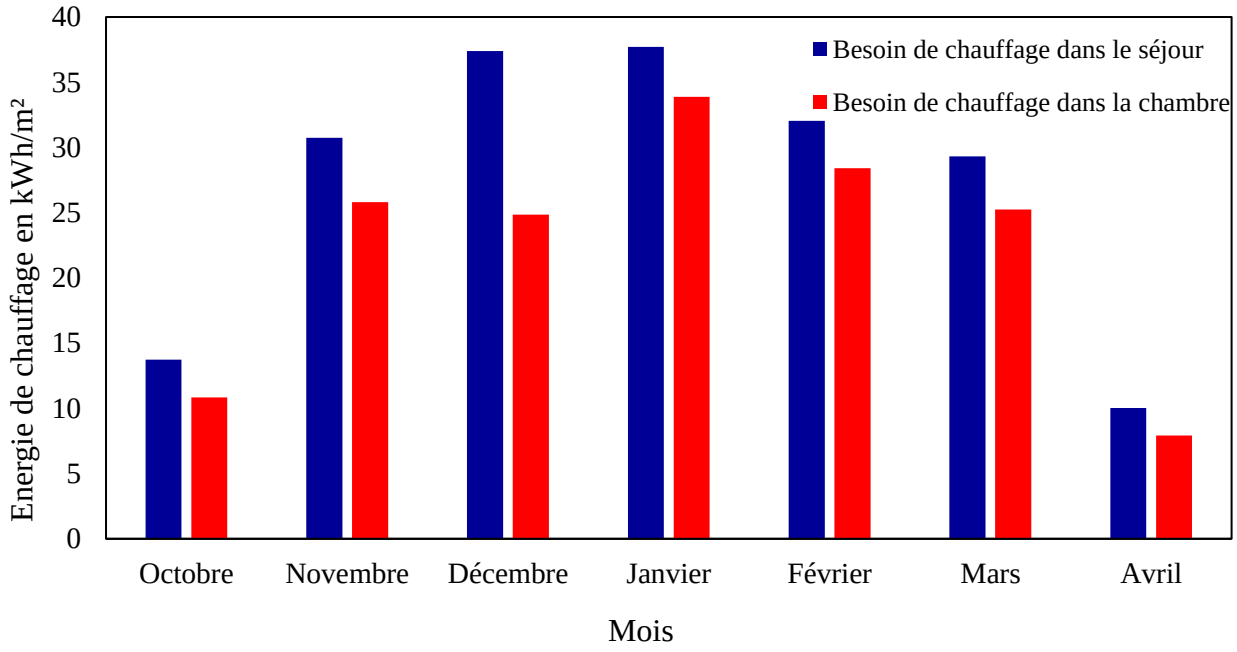


Figure 4.10: Besoins d'énergie de chauffage dans le salon et la chambre

Influence d'une augmentation de température de 1°

Nous avons augmenté la température de 1°C par rapport à la température de consigne utilisée précédemment (Figure 4.11). La consommation d'énergie augmente d'environ 9%. Ce résultat est en accord avec celui de [Parent 2012], qui a évalué cette augmentation entre 8% et 25%.

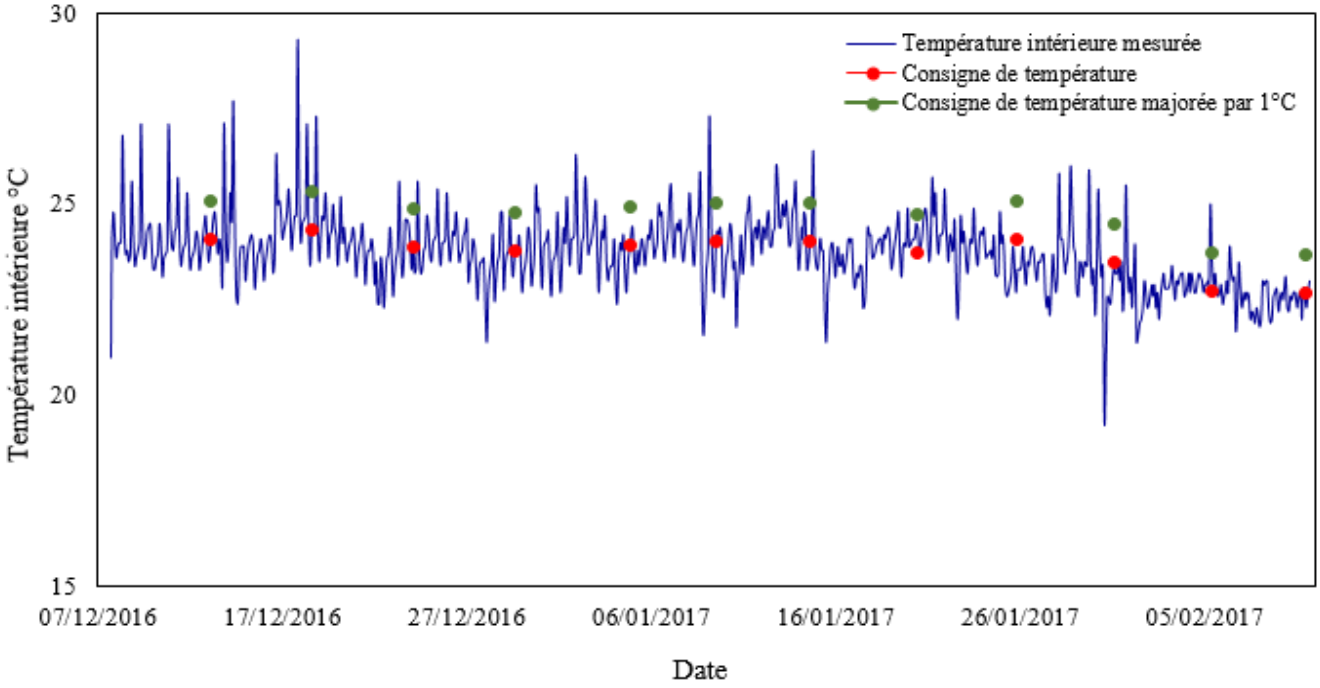


Figure 4.11: La température de consigne majorée par 1°C par rapport à la température de consigne d'entrée.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

4.3.2. Scénario RT 2012

La réglementation thermique 2012 se base sur un ensemble de scénarios prenant en compte les conditions idéales de l'usager. Ils sont définis à travers « A l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012 » qui a été développé par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment [CSTB, 2011]. Cette section présente l'application de cette réglementation à l'appartement A.

L'occupation

Pour définir l'occupation conventionnelle du site d'étude, les scénarios réglementaires dépendent du nombre d'occupants adultes et des scénarios de présence. Cette méthode de calcul impose des apports internes de chaleur différents entre les adultes et les enfants. Ils sont aussi plus faibles en sommeil qu'en activité. En s'appuyant sur les équations fournies par cette méthode, nous fixons à 1,6 équivalent adulte avec une production de 90W par occupant. Nous avons la même semaine type qui se répète durant toute l'année avec deux périodes d'inoccupation : deux semaines en août et une semaine en décembre. Le tableau 4.3 présente le taux de présence par semaine hors période d'inoccupation.

Consignes de température

Les consignes de températures sont basées sur les scénarios d'occupation du logement :

- 19°C en période d'occupation :
- 16°C en cas d'inoccupation durant une période inférieure à 48h
- 7°C en période d'inoccupation qui dépasse 48h.

La période de fonctionnement de chauffage s'étend du 14 Octobre au 15 Avril. L'arrêt du système est effectif lors du changement de saison défini par la méthode de calcul.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

Tableau 4.3: Taux d'adulte équivalent en fonction des heures de la semaine

Jours/ Heure	Taux d'occupation				
	06h-10h	**10h-14h**	**14h-18h**	**18h-22h**	**22h-06h**
Lundi	1	0	0	1	0,7
Mardi	1	0	0	1	0,7
Mercredi	1	0	1	1	0,7
Jeudi	1	0	0	1	0,7
Vendredi	1	0	0	1	0,7
Samedi	1	1	1	1	0,7
Dimanche	1	1	1	1	0,7

Apports des équipements

La réglementation thermique distingue les apports internes de chaleur liés aux équipements dont le fonctionnement est permanent et ceux liés aux équipements qui ne fonctionnent que pendant les heures de présence des occupants. Pour l'appartement A, la puissance de chaleur dégagée par l'ensemble des équipements quand l'appartement est occupé est égale à 5,7 W/m² et celle dégagée par les équipements en cas d'inoccupation est égale à 1,14 W/m². Cette puissance a été déterminée en prenant en compte les équipements présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Apports internes de chaleur en fonction des équipements pris en compte

Equipement pris en compte	**Apport interne de chaleur en kWh/ (m².an)**
Cuisson	3,7
Audiovisuel	6,8
Informatique	5,0
Lavage	0,6
Froid	8,0
Appareils ménagers	2,2
Total	26,3

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

4.3.2.1. Résultats

La figure 4.12 présente le besoin de chauffage simulé et le besoin de chauffage issu de la simulation avec la RT 2012. On observe un écart mensuel moyen de l'ordre de 48% entre les deux résultats. Cet écart est en accord avec l'étude de [Carassus et al., 2013] menée sur 18 logements. Elle montre une différence importante entre les consommations basées sur les hypothèses conventionnelles et les consommations réelles. Ces dernières reposent sur l'usage des équipements techniques et le comportement réel des occupants. Différents facteurs justifiants ces écarts sont identifiés : Le niveau d'équipement dans le logement et l'intensité de son usage, la consigne de température intérieure en hiver, les pratiques de renouvellement d'air dans le logement, les scénarios de ventilation, le nombre d'occupants permanents dans le logement et la durée d'occupation.

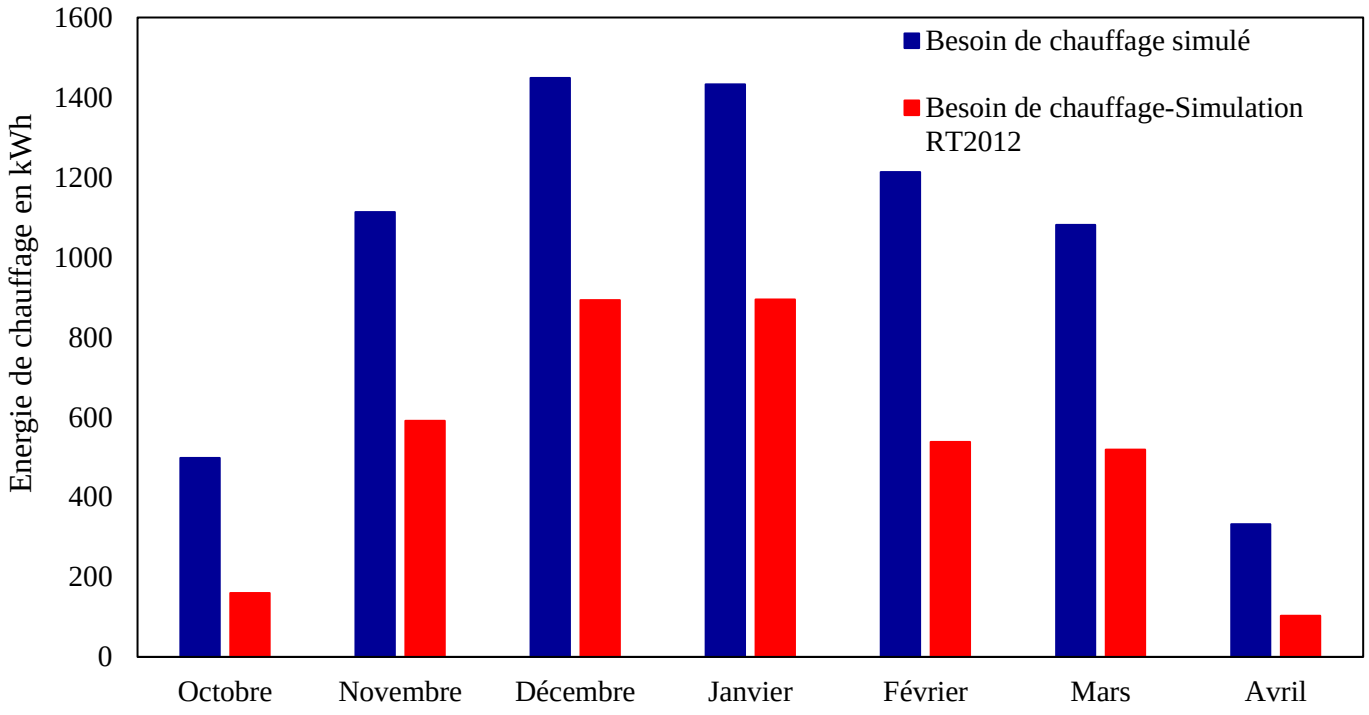


Figure 4.12: Besoin de chauffage réel simulé et besoin simulé avec la RT2012

Répartition de consommation

La figure 4.13 présente les besoins de chauffage dans le séjour et dans la chambre. La consommation de chauffage mensuelle moyenne est de 257 kWh dans la chambre et de 400 kWh dans le séjour. Ce qui représente un écart moyen inférieur de près de 23% de la consommation de référence.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

La lecture des températures moyennes constatées dans le séjour et la chambre montrent bien que le niveau est supérieur à la consigne de température conventionnelle (section 4.3.1), qui est de l'ordre de 19°C en moyenne journalière pendant la période de chauffe. Ce qui accentue les conséquences de la différence entre le scénario réel et le scénario RT 2012 et induit à des écarts importants allant de 51 à 274 kWh dans le séjour et de 12 à 211 KWh dans la chambre (Cf. Figure 4.14 et 4.15).

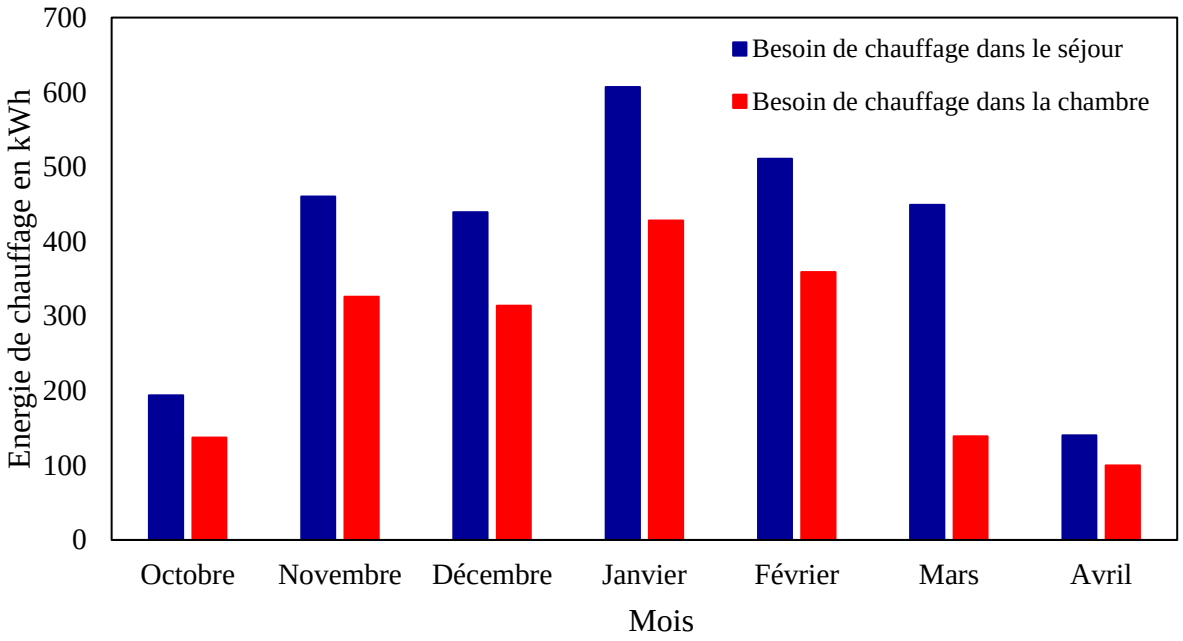


Figure 4.13: Répartition des consommations de chauffage dans les différentes pièces instrumentées

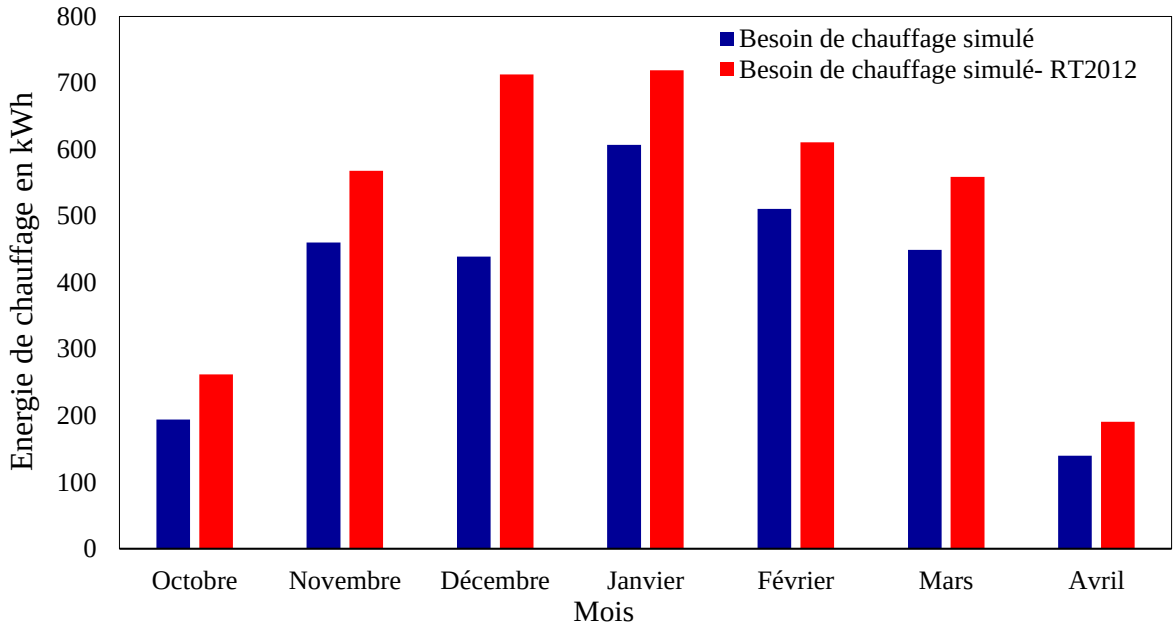


Figure 4.14: Comparaison du scénario réel et le scénario issu de la RT 2012 dans le séjour

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

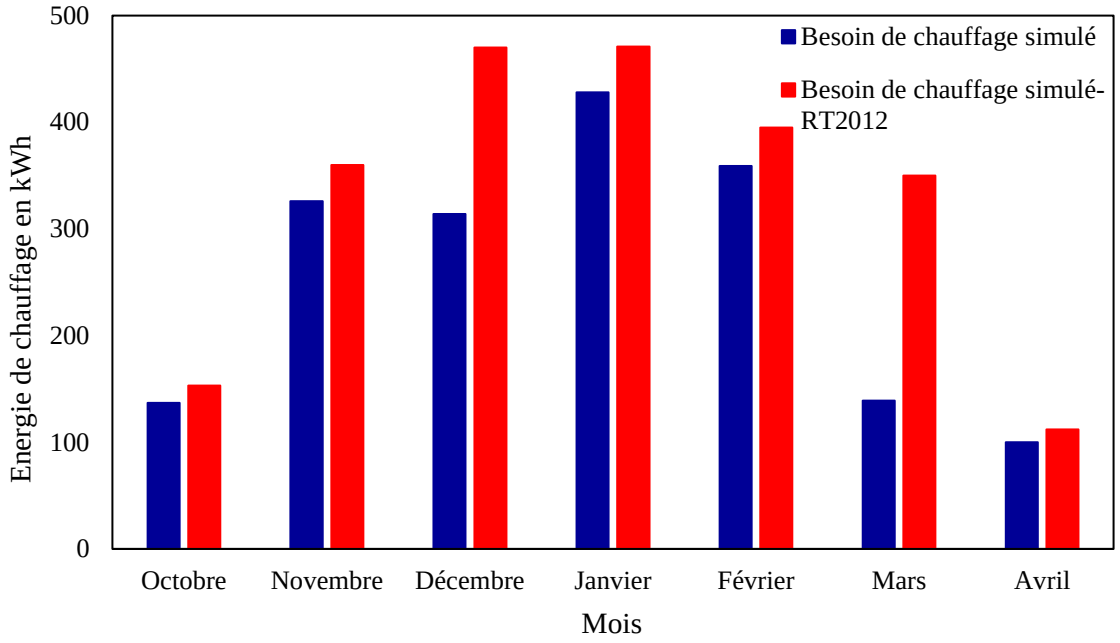


Figure 4.15:Comparaison du scénario réel et le scénario issu de la RT 2012 dans la chambre

La figure 4.16 résume les consommations de chauffage déterminées par les modèles présentés ci-dessus. On peut réaliser jusqu'à 38 % d'économie d'énergie par rapport aux consommations réelles en appliquant une consigne de température de 19°C. La consigne RT 2012 donne une économie d'énergie de 45% par rapport aux consommations mesurées.

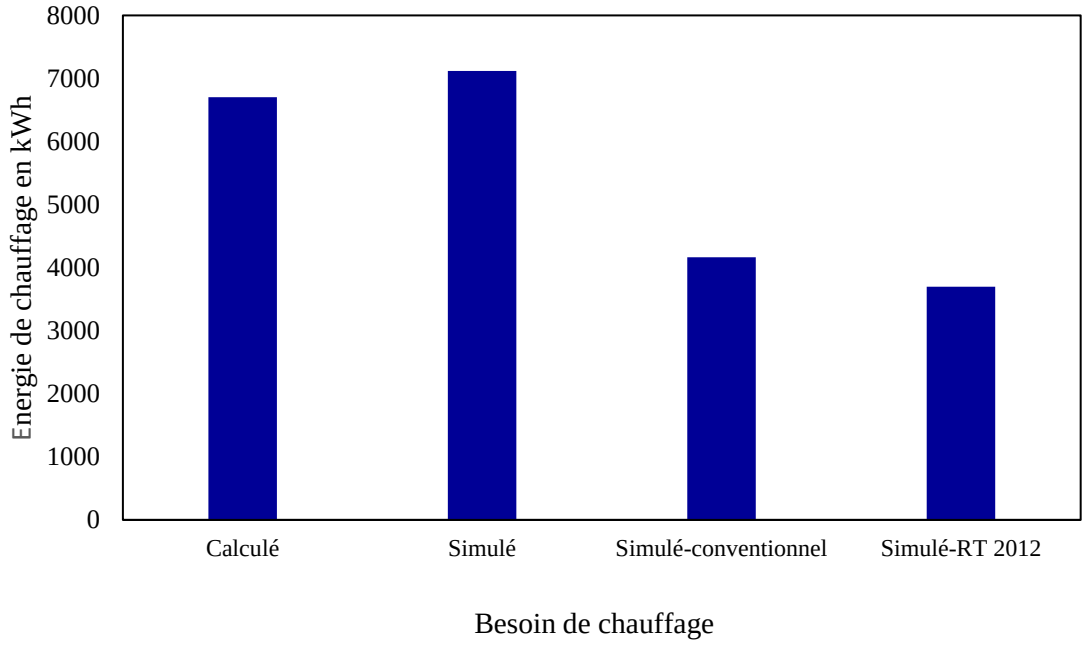


Figure 4.16 : Les besoins de chauffage des différents scénarios

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Thèse de Khadija Jnat, Université de Lille, 2018

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse des consommations thermiques dans un appartement du logement social à l'aide du logiciel de simulation thermique Archiwizard. Les caractéristiques thermiques ont été estimées à partir des données disponibles et de la réglementation thermique. Elles ont été validées par comparaison du modèle numérique avec les données du bailleur. L'écart entre ces consommations est de l'ordre de 6%.

Le modèle numérique a donné un apport de l'occupation de 9%.

Le modèle numérique a été utilisé pour estimer les potentielles économies d'énergies qu'on peut réaliser par l'application de la réglementation thermique. Nous avons relevé qu'une consigne de température de 19°C dans l'appartement étudié permet de réaliser une économie d'énergie de chauffage de l'ordre de 41% ; et que l'application de la consigne de température imposée par la RT2012 donne une économie de chauffage de l'ordre de 45%.

Ce travail montre que des économies d'énergies considérables peuvent être obtenues par une application de la réglementation thermique. Ces résultats sont obtenus par la modélisation numérique. Ils doivent être confirmés par des mesures réelles, qui nécessitent un système de contrôle de chauffage dans chaque pièce de l'appartement et par l'implication de l'usager.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Conclusion

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Lille et Lille Métropole Habitat qui gère près de 32 000 logements sociaux dans la métropole de Lille. L'objectif de ce travail était de mieux comprendre, à travers une instrumentation avancée, les conditions de confort thermique dans des logements occupés et d'évaluer les potentiels d'économie de chauffage tout en respectant les conditions de confort des occupants.

Ce travail a un grand intérêt, car le parc du logement social compte plus de 4,9 millions d'unités en France, soit l'équivalent à 19% des logements, avec des dépenses énergétiques très élevées. Le chauffage présente 67% de la consommation d'énergie du secteur social. La réduction des consommations de chauffage dans ce secteur a ainsi un impact environnemental, économique et social.

Au cours des dernières années, l'effort de réduction des consommations d'énergie dans le logement social faisait partie des efforts réalisés sur la réduction des consommations énergétique dans le bâtiment avec la mise en place des nombreuses réglementations. Ces applications ont porté sur les constructions neuves et sur les rénovations lourdes. Or, on sait que la consommation d'énergie dans le logement social dépend aussi du comportement des occupants. Il est donc essentiel de comprendre l'impact de ce comportement sur les consommations d'énergie et d'explorer les possibilités de les réduire à travers une implication plus forte des occupants dans une démarche globale de réduction des consommations énergétiques.

Ce travail de thèse s'inscrit dans cette démarche. Il apporte une contribution à travers une instrumentation des logements occupés et des simulations numériques à l'aide d'un logiciel thermique.

Le programme d'instrumentation est appliqué sur 3 appartements occupés. L'instrumentation a porté sur la mesure en continu de la température intérieure, l'humidité relative, la luminosité et le contact dans le salon et les chambres.

L'analyse des données mesurées a mis en évidence des températures élevées pendant la période de chauffe avec une moyenne autour de 24° et des pics autour de 29°C. Ces températures élevées engendrent des surconsommations d'énergie qui ont été estimées à 27%.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Afin de mieux comprendre le comportement thermique des logements étudiés et d'affiner l'estimation des économies possibles d'énergie, nous avons utilisé le logiciel de simulation thermique Archiwizard. Le modèle numérique a été validé sur des mesures réalisées. L'écart entre les mesures et les simulations a été de l'ordre de 6%, ce qui est satisfaisant.

La simulation numérique a montré qu'au-delà de 24°C, un degré supplémentaire de température de chauffage engendre une augmentation de 9% de la consommation d'énergie liée au chauffage. Le programme a été aussi utilisé pour estimer les économies d'énergies qu'on peut réaliser par l'application de la réglementation thermique. Il a montré que l'application d'une consigne de température de 19°C dans l'appartement étudié permet une économie de chauffage de l'ordre de 41%. Et 48% d'économie d'énergie peut être obtenue à travers l'application des consignes de la RT2012.

Ce travail montre qu'on peut réaliser des économies d'énergie de chauffage importantes dans la résidence étudiée. La réalisation de ces économies est conditionnée par l'amélioration des équipements de chauffage à travers un système de contrôle intelligent et une implication des occupants. Dans l'avenir, il faudra déployer ce système dans des résidences occupées pour vérifier les résultats de ce travail et estimer le retour sur les investissements de ce système.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Bibliographie

A. Greening, Lorna, David L. Greene, and Carmen Difiglio. 2000. 'Energy Efficiency and Consumption : The Rebound Effect (a Survey)'. *Energy Policy* 28 (6): 389–401. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5.

AFNOR. 1995. 'AFNOR NF EN ISO 7730 Décembre 1995'. Disponible sur : https://afnor,norme/nf-en-iso-7730/ambiances-thermiques-moderees-determination-des-indices-pmv-et-pdd-et-specifications-des-conditions-de-confort-thermique.

AFNOR, Afnor. 2007. 'NF EN 15251 Critères d'ambiance Intérieure Pour La Conception et Évaluation de La Performance Énergétique Des Bâtiments Couvrant La Qualité de l'air Intérieur, La Thermique, l'éclairage et l'acoustique. -'.

Ahn, Ki-Uhn, and Cheol-Soo Park. 2016. 'Correlation between Occupants and Energy Consumption'. *Energy and Buildings* 116 (March): 420–33. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.010.

Allab, Yacine. 2017. 'Evaluation Expérimentale Des Performances Des Systèmes de Ventilation Dans Le Bâtiment: Efficacité de Ventilation et Confort Thermique'. Génie des procédés, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.

Andrews, Clinton J., Daniel Yi, Uta Krogmann, Jennifer A. Senick, and Richard E. Wener. 2011. 'Designing Buildings for Real Occupants: An Agent-Based Approach'. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* 41 (6): 1077–91. https://doi.org/10.1109/TSMCA.2011.2116116.

Bonte, Mathieu. 2014. 'Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment : Modélisation par intelligence artificielle et mesures in situ'. Génie Civil, Toulouse: l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier).

Bourgeois, Denis. 2005. 'Detailed occupancy prediction, occupancy-sensing control and advanced behavioral modelling within whole-building energy simulation.' Architecture, QUÉBEC: Faculté Des Études Supérieures Université LAVAL.

Brager, G.S. 1992. '"Using Laboratory-Based Models to Predict Comfort in Office Buildings."' *ASHRAE Journal*, April 1992, sec. 34(4).

Brisepierre, Gaëtan. 2011. 'Les conditions sociales et organisationnelles du changement des pratiques de consommation d'énergie dans l'habitat collectif'. Université Paris Descartes, Discipline : Sociologie.

© 2018 Tous droits réservés.

lilliad.univ-lille.fr

CACCAVELLI, Dominique. 2014. 'Forum Du Bâtiment Durable 2014 / Santé et Climat : Bien Vivre Le Bâtiment'. Marseille, July 6. https://www.cstb.fr.

Calì, Davide, Tanja Osterhage, Rita Streblow, and Dirk Müller. 2016. 'Energy Performance Gap in Refurbished German Dwellings: Lesson Learned from a Field Test'. *Energy and Buildings* 127 (September): 1146–58. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.020.

Candas, Victor. 1998. 'Confort Thermique [En Ligne]. Strasbourg : Centre National de La Recherche Scientifique (UPS 858), (Technique de l'ingénieur, Traité de Génie Énergétique, BE 9 085)'.

Carassus, Jean, Chantal Laumonier, Bernard Sesolis, Damien Janvier, and Rémi Wrona. 2013. 'Vivre Dans Un Logement Basse Consommation D'énergie Une approche socio-éco-technique; Retour d'expérience de six résidences labélisées BBC EFFINERGIE'. CERQUAL.

De Dear, Richard, and G. S. Brager. 1998. 'Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference'. *ASHRAE Transactions 1998*, 1998.

De Dear, Richard, Gail Brager, and Donna Cooper. 1997. 'DE DEAR et BRAGER. (1998). Developing an Adaptive Model to Thermal Comfort and Preference. ASHARE Transactions Vol. 104, Part 1A,145-167.' Final Report ASHRAE RP-884. Macquarie Research Ltd., Macquarie University, Sydney, NSW 2109 AUSTRALIA Center for Environmental Design Research, University of California, Berkeley, CA 94720 USA.

Dear, Richard J. de, and Gail S. Brager. 2002. 'Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55'. *Energy and Buildings* 34 (6): 549–61. https://doi.org/10.1016/S0378-7788 (02)00005-1.

Endravadan, Mala, Françoise Thellier, and Jean-pierre Bedrune. 2004. 'Modelling of Occupant-Controlled Global Heating in Buildings'. Cumberland lodge, Windsor, UK.

Fabi, Valentina, Rune Vinther Andersen, Stefano P. Corgnati, and Bjarne W. Olesen. 2013. 'A Methodology for Modelling Energy-Related Human Behaviour: Application to Window Opening Behaviour in Residential Buildings'. *Building Simulation* 6 (4): 415–27. https://doi.org/10.1007/s12273-013-0119-6.

Fanger, P.O. 1967. 'Fanger, P. (1967). "Calculation of Thermal Comfort, Introduction of a Basic Comfort Equation." *ASHRAE Transactions 73, 2*. -', 1967.

Firlag, Zawada, Szymon, Bernard. 2013. 'Impacts of Airflows, Internal Heat and Moisture Gains on Accuracy of Modeling Energy Consumption and Indoor Parameters in Passive Building.' Elsevier, 64: 372–83.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.024.

Frontczak, Monika, and Pawel Wargocki. 2011. 'Literature Survey on How Different Factors Influence Human Comfort in Indoor Environments'. *Building and Environment*, April, 922–37. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021.

Haldi, Frédéric, and Darren Robinson. 2011. 'Modelling Occupants' Personal Characteristics for Thermal Comfort Prediction'. *International Journal of Biometeorology*, Springer-Verlag, Volume 55 (5): 681–694. https://doi.org/10.1007/s00484-010-0383-4.

Humphreys, Michael A., J. Fergus Nicol, and Iftikhar A. Raja. 2007. 'Field Studies of Indoor Thermal Comfort and the Progress of the Adaptive Approach'. *Advances in Building Energy Research* 1 (1): 55–88. https://doi.org/10.1080/17512549.2007.9687269.

JORF. 2010. 'Journal Officiel "Lois et Décrets" - JORF N°0298 Du 24 Décembre 2010 | Legifrance'. https://www.legifrance.gouv.fr.

Langevin, J., J. Wen, and P.L Gurian. 2014. 'Simulating the Human-Building Interaction : Development and Validation of an Agent-Based Model of Office Occupant Behaviours in Proceedings'. 22. Windsor, England: Buildings and environment.

Leaman, Adrian, and Bill Bordass. 1999. 'Productivity in Buildings: The "Killer" Variables'. *Building Research & Information* 27 (1): 4–19. https://doi.org/10.1080/096132199369615.

Maugard. 2013. 'Rapport 2012: Analyse détaillée du parc résidentiel existant'. https://www.lesrèglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr.

McCartney, Kathryn J, and J Fergus Nicol. 2002. 'Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe'. *Energy and Buildings* 34 (6): 623–35. https://doi.org/10.1016/S0378-7788 (02)00013-0.

Meester T. De Herde A. 2012. 'De Meester T., De Herde A., 2012, Suburban Areas Favoring Energy Efficiency (SAFE) : L'impact Du Comportement Des Occupants, Université Catholique de Louvain, Mars.'

MOUJALLED, Bassam. 2007. 'Modélisation Dynamique Du Confort Thermique Dans Les Bâtiments Naturellement Ventilés.' Thèse en Génie Civil., Lyon, France: Institut des Sciences Appliquées de Lyon.

NARÇON, SANDRINE. 2001. 'Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort'. Neurosciences et Comportement, Ecole Pratique Des Hautes Etudes Sciences de la Vie et de la Terre.

Nicol, J. F., and M. A. Humphreys. 2009. 'New Standards for Comfort and Energy Use in Buildings'. *Building Research & Information* 37 (1): 68–73.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

https://doi.org/10.1080/09613210802611041.

Nicol, J. Fergus. 2001. 'Characterising Occupant Behaviour in Buildings : Towards a Stochastic Model, of Occupant Use of Windows, Lights, Blinds, Heaters and Fans.' Rio de Janeiro, Brazil.

Nicol, J. Fergus, and Michael A Humphreys. 2002. 'Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings.' *Energy and Buildings*, 2002.

Nicol, J.Fergus, Iftikhar A Raja, Arif Allaudin, and Gul Najam Jamy. 1999. 'Climatic Variations in Comfortable Temperatures: The Pakistan Projects'. *Energy and Buildings* 30 (3): 261–79. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00011-0.

Olesen, B.W. 2004. '"International Standards for the Indoor Environment." Indoor Air.' 18–26. https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00268.x.

Page, Jessen. 2007. 'Simulating Occupant Presence and Behaviour in Buildings'. Lausanne, Suisse: Faculté de l'environnement naturel, architecturel et construit Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne.

Parent, Thiébaut. 2012. 'Variation de consommation de chauffage et température de consigne'. https://conseils.xpair.com/ _experts/variation-conso- chauffage.htm.

Parsons, Ken. 2003. *PARSONS, K. (2003). Human Thermal Environment. . 2nd Edition. London: Taylor & Francis.* Temperature-Physiological effect. I. Title. QP82.2.T4 P38 2002 612′.01446–Dc21 2002072017. Taylor & Francis e-Library.

Reinhart, C F. 2004. 'Lightswitch-2002: A Model for Manual and Automated Control of Electric Lighting and Blinds'. *Solar Energy* v. 77, (no 1): 15–28. https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.003.

Rohles, Frederick H. 1981. 'Thermal Comfort and Strategies for Energy Conservation'. *Journal of Social Issues* 37 (2): 132–49. https://doi.org/10.1111/j.1540- 4560.1981.tb02629.x.

Stebé, Jean-Marc. 2016. *Le Logement Social En France. Sociologie et Sciences de l'éducation*. 7th ed. Que Sais-Je? 763.

Sun, Kaiyu, and Tianzhen Hong. 2017. 'A Simulation Approach to Estimate Energy Savings Potential of Occupant Behavior Measures'. *Energy & Buildings* Complete (136): 43–62. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.010.

Tabak, V., De B. Vries, J. Dijkstra, and A. J. Jessurun. 2006. 'Interaction in Activity Location Scheduling'. In *The Expanding Sphere of Travel Behavior : Proceedings of the 11th International Conference on Travel Behavior Research, Kyoto Japan, August 2006*. Kyoto, Japan.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

Taleghani, Mohammad, Martin Tenpierik, Andy van den Dobbelsteen, and Richard de Dear. 2013. 'Energy Use Impact of and Thermal Comfort in Different Urban Block Types in the Netherlands'. *Energy and Buildings 67*, December 2013.

Thellier, Françoise, Francoise MONCHOUX, and Jean-pierre BEDRUNE. 2012. ' Le Confort Dans Le Bâtiment: N'oublions Pas l'habitant! '. Université Toulouse III-Paul Sabatier. http://phase.ups-tlse.fr/.

Thellier, Françoise, Françoise Monchoux, Sandra Spagnol, and Michel Bonnis-Sassi. 2009. '"Measurement of Ambient Air Temperature for Evaluation of Human Heat Convective.', January, 62–70. https://doi.org/DOI: 10.1016/j.measurement.2008.04.001.

Vorger, Éric. 2014. 'Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment'. Génie civil, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,

Yan, Da, William O'Brien, Tianzhen Hong, Xiaohang Feng, H. Burak Gunay, Farhang Tahmasebi, and Ardeshir Mahdavi. 2015. 'Occupant Behavior Modeling for Building Performance Simulation: Current State and Future Challenges'. *Energy and Buildings* 107 (November): 264–78. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.032.

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

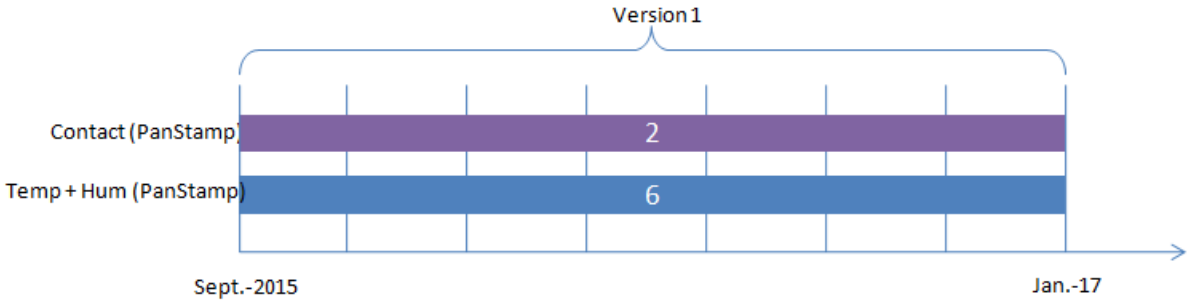
Annexes

A. Les Périodes d'instrumentation des appartements avec les différentes versions.
B. Les différentes versions des capteurs utilisées

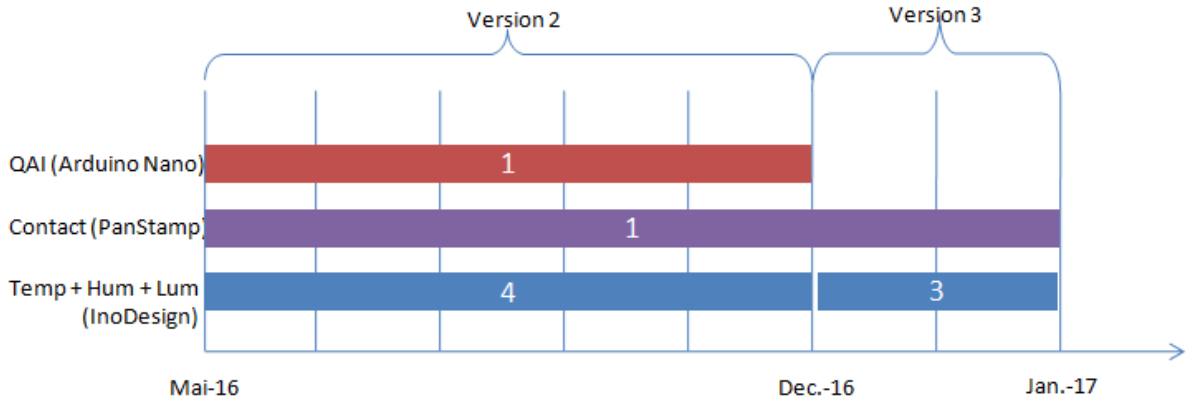
© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr

A. Instrumentation des appartements avec les différentes versions (les interventions pour changer les piles ne sont pas prises en compte)

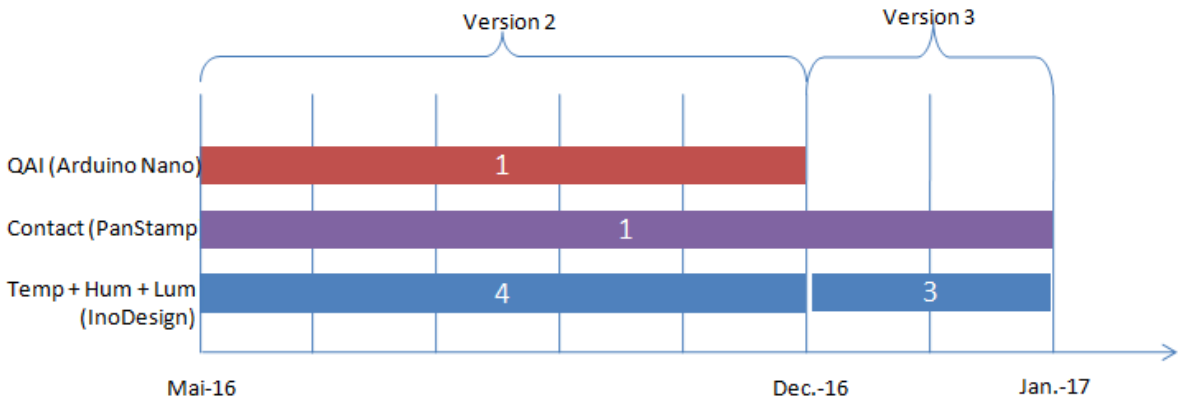
Tennis – Parties communes



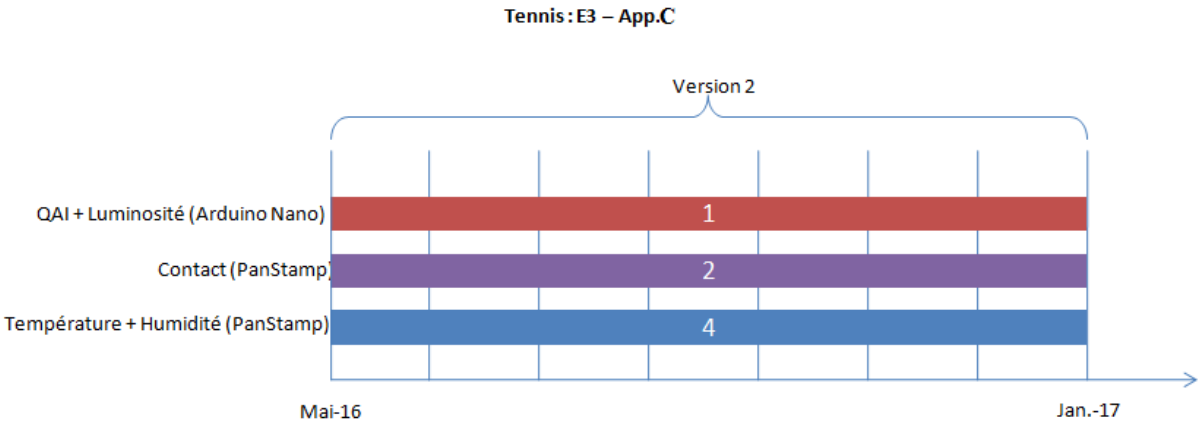
Tennis : E3 – App. A



Tennis : E3 – App. B



© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr



B. Les différentes versions des capteurs utilisés

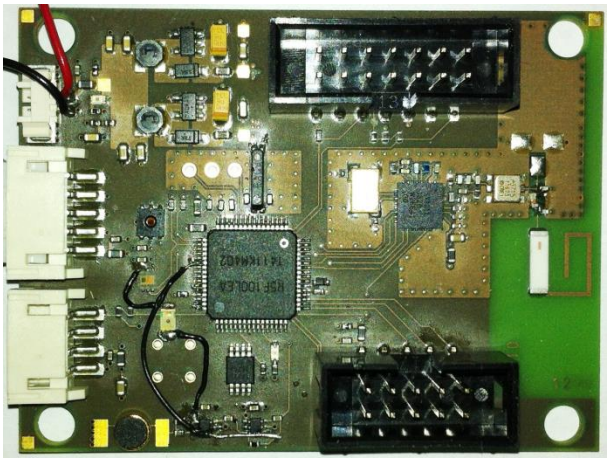
La première version des capteurs utilisés

Température et humidité relative

Luminosité et qualité d'air

- Protocole Panstamp
- Batterie à basse consommation
- USB connecté au Rasberry PI

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr



Deuxième version utilisée

Température, humidité relative, luminosité et qualité d'air rassemblées sur un seul circuit

- Communication RF en utilisant FSK Modulation
- Batterie à basse consommation

© 2018 Tous droits réservés.
lilliad.univ-lille.fr