

Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen

Cécile Batier

▶ **To cite this version:**

Cécile Batier. Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen . Thermique [physics.class-ph]. Université de Montpellier, 2016. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-01324038⟩

HAL Id: tel-01324038

https://hal.science/tel-01324038v1

Submitted on 31 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Collège Doctoral du Languedoc-Roussillon

THÈSE

Pour obtenir le grade de Docteur

Délivré par l'**UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER**

Préparée au sein de l'école doctorale :
INFORMATION STRUCTURES SYSTÈMES

Et des unités de recherche :
LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVIL
LABORATOIRE INNOVATION FORMES ARCHITECTURES MILIEUX

Spécialité :
MÉCANIQUE, GÉNIE CIVIL ET ARCHITECTURE

Présentée par :
Cécile BATIER

Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen

D'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales

Soutenue publiquement le 14 mars 2016 devant le jury composé de :

André CHRYSOCHOOS	Professeur des Universités, UM	Président
Youssef DIAB	Professeur des Universités, UPEM	Rapporteur
Étienne WURTZ	Directeur de Recherches, CEA-INES	Rapporteur
Frédéric BONNEAUD	Architecte et Professeur des ENSA, ENSAT	Examinateur
Jean-François DUBÉ	Professeur des Universités, UM	Directeur de thèse
Franck CÉVAËR	Maître de Conférences, UM	Co-encadrant
Vinicius RADUCANU	Architecte et Maître-Assistant, ENSAM	Co-encadrant
Jean-Philippe VASSAL	Architecte, Lacaton & Vassal Architecture	Invité

Université Montpellier

ENSAM
École nationale supérieure d'architecture Montpellier

REMERCIEMENTS

En début de cinquième année à l'école d'architecture de Montpellier, vous m'auriez dit : « *Toi, tu feras une thèse !* ». J'aurais rigolé et répondu « *Moi ? Jamais !* ». Pourtant, me voici aujourd'hui presque cinq ans plus tard terminant ce manuscrit de thèse.

Une thèse, c'est avant tout un point de départ, ici, je dirais une continuité avec mes études en architecture. Pour cela, je voudrais remercier Robert CÉLAIRE qui, le premier, par sa connaissance pointue du domaine, m'a poussé à me poser des questions sur les bâtiments performants mais surtout sur la notion complexe du confort global au sein des bâtiments afin de proposer des architectures performantes et confortables à vivre (au niveau thermique mais pas seulement !). Questions qui me paraissent aujourd'hui essentielles dans mon futur métier d'architecte.

Ensuite, je voudrais remercier particulièrement mes encadrants de thèse. C'est grâce à leur ténacité pour trouver des financements que ce projet de recherche a pu démarrer. Par leurs conseils avisés, ils m'ont guidé sur la voie de la recherche et m'ont permis de devenir la jeune chercheuse que je suis aujourd'hui.

- Jean-François DUBÉ, mon directeur de thèse, pour ses contacts auprès des bailleurs sociaux et pour la confiance et la liberté qu'il m'a accordées qui ont permis la réalisation de cette stratégie de recherche, qui, je pense, n'était pas celle imaginée au départ.
- Franck CÉVAËR, pour sa patience à m'expliquer la thermique du bâtiment mais aussi pour sa relecture pointilleuse du manuscrit ainsi que pour le temps qu'il m'a consacré qui a mené à de nombreuses discutions autour du sujet. Elles m'ont poussée à me questionner et à accepter la réalité des mesures expérimentales. Ce fût toujours un plaisir.
- Vinicius RADUCANU, pour sa confiance en me proposant de poursuivre mes études avec ce projet de recherche mais aussi pour son « pouvoir » de motivation lors des phases de doute en recentrant toujours le sujet autour de la question principale « *Qu'est-ce qu'on cherche ?* ». Son regard sur les différentes questions a permis de proposer des pistes de réflexions qui se sont toujours révélées très intéressantes et ses conseils pour la soutenance ont également été d'une aide précieuse.

À tous les trois, Merci !

En parlant de financement, je tiens également à remercier Nîmes Métropole, le CNRS et le LMGC pour avoir accepté de financer ces travaux de recherche et avoir fourni un cadre de travail agréable.

Une thèse c'est aussi un point final. Je souhaite donc remercier toutes les personnes qui ont assisté à la soutenance ainsi que les membres du jury. Tout d'abord, les rapporteurs Youssef DIAB et Étienne WURTZ, qui, par leur lecture attentive de ce manuscrit, ont apporté des remarques pertinentes sur ce travail. Ensuite, André CHRYSOCHOOS qui a accepté d'être le président du jury et qui a animé les discutions avec dynamisme. Puis, Frédéric BONNEAUD, examinateur, dont je garde en mémoire les précieux conseils. Pour finir je tiens à remercier Jean-Philippe VASSAL qui a accepté l'invitation et dont le travail m'intéresse toujours autant.

Entre les deux, une thèse c'est de nombreuses rencontres et discutions qui conduisent la réflexion dans différents axes, notamment dans le cadre d'une thèse faisant appel à de nombreux champs disciplinaires comme celle-ci. Pour cela je tiens à remercier :

- Les deux bailleurs sociaux, la SEMIGA et Un Toit Pour Tous, qui m'ont permis d'étudier leurs résidences et notamment Laurent GIRARD, Marion LE GALL et Fabrice MICHEL qui m'ont donné accès aux coordonnées des locataires et aux archives de leurs résidences.
- Météo France pour la mise en place de la convention me permettant d'obtenir toutes les données météorologiques nécessaires à cette étude.
- Patrice VALORGE, Michel D'AMBRA et Joël DURAND qui m'ont apporté une aide précieuse pour le développement des boîtiers de capteurs.
- Tous les locataires des deux résidences étudiées qui ont participé à l'enquête au porte à porte, avec une mention spéciale à tous ceux qui ont accepté l'instrumentation de leurs appartements et sans qui cette thèse n'aurait pas été possible. Afin de conserver la confidentialité des mesures, je ne peux pas donner leur nom complet mais merci à : Mohamed, Philippe, Christian, Josiane, Aïssa, Pascal, Hemama, Mounia, Thierry, Éliane, Karima, Liliane ainsi que toute leur famille (leur mari ou leur femme ainsi que leurs enfants).
- Gillonne MAUPEU qui m'a permis de faire mes premier pas dans l'encadrement de stages.
- L'ensemble du personnel du LMGC et notamment les permanents de l'équipe Sigeco qui m'ont fourni une ambiance de travail scientifiquement et humainement très enrichissante. Je ne peux pas tous les citer, mais le cœur y est. Je remercie cependant particulièrement Reine CAUSSE, dont les rouages administratifs n'avaient aucun secret pour elle (qu'elle profite pleinement de sa retraite), Yannick SUSSMUTH toujours prêt à dépanner n'importe quel souci informatique et Chantal ROMANO pour son soutien.
- L'ensemble du personnel du LIFAM dont les regards croisés sur mon travail ont toujours été bienveillants. Je ne peux pas tous les citer non plus, mais le cœur y est tout autant. Je remercie également l'ENSAM pour l'organisation de la soutenance de thèse dans ses locaux.
- L'ensemble de l'équipe pédagogique et administrative de l'IUT de Nîmes pour m'avoir intégrée dans leur équipe.
- L'ensemble du personnel de l'école doctorale I2S pour leur implication dans la création d'une mention Mécanique, Génie Civil et Architecture.

Je tiens à remercier particulièrement tous les doctorants, post-doctorants ou anciens doctorant du LMGC avec qui j'ai tissé de nouveaux liens d'amitié. Ils m'ont permis de faire des voyages immobiles grâce à nos nombreuses discutions multiculturelles sur la cuisine, la religion, les paysages, la politique, la culture… de leurs pays respectifs ! Au programme de mes prochains voyages (dans l'ordre alphabétique pour ne pas faire de jaloux) : l'Algérie, la Chine, la Colombie, l'Inde, le Liban, le Maroc, la Pologne, la Sicile, le Togo, le Venezuela et le Vietnam. Je remercie donc : Lhassan AMARSID (pour les nombreuses heures à m'expliquer les bases de la programmation), Adil BENAARBIA (pour tous les débats que nous avons eus), Benjamin BONNET

(à qui je souhaite de réaliser son tour du monde en bateau), David CANTOR (pour son incroyable gentillesse et pour m'avoir fait manger des fourmis géantes), Aditi CHAKRABARTI (qui j'espère, malgré un séjour de quelques mois, gardera en mémoire les quelques mots de français qu'elle aura appris), Fatima EL KORCHI (à qui je souhaite de faire de belles rencontres), Mahmoud FAKIH (que l'on pourra surement retrouver un jour dans les plus grandes villes du monde), Komlanvi dit Daniel LAMPOH (le bricoleur du labo qui peut tout réparer ou presque), Paul SCHUHMACHER (le second prof de français), Maria VILLAVICENCIO (la vénézuélienne la plus charmante), Sarah VIGAN (pour les heures passées dans les transports à refaire le monde), Thị Lơ VŨ (qui, je l'espère, continuera d'apprendre le français et d'écrire encore de nombreux « nouveaux » mots sur ses post-it), Kajetan WOJTACKI (pour toutes les saisons et tous les épisodes de ses aventures, et pour avoir considérablement amélioré mon anglais) mais aussi William BETTINI, Lionel BICHET, Abdelkhalek BOUZIANE, Agnès BURGERS, Capucine CARLIER, Gilles DUSFOUR, Mouad JEBLI, Elham KARAMI, Thanh Hải NGUYỄN, Chaoqun ZENG à qui je souhaite la meilleure des fins de thèse mais encore Adrien BALDIT, Nawfal BLAL, Youssef EL BITOURI, Riccardo FERRARA, Cécilia GAUVIN, Tarik MADANI, Patrick MUTABARAKA, Sreedhar UNNIKRISHNAKURUP, …

Que les éventuels oubliés me pardonnent…

Merci aux amis proches et lointains avec une dédicace spéciale pour Lorène BERNASCONI qui a fait spécialement le déplacement pour assister à la soutenance et Lucie DEL MARCO qui a suivi toute cette aventure, merci pour ta présence et pour les encouragements surtout pendant la période de rédaction ou lors des quelques minutes précédant la soutenance.

Merci à toute ma famille et particulièrement à mes parents Michèle et Jean-Jack sur lesquels j'ai toujours pu compter en toutes circonstances et qui m'ont appris la curiosité et la persévérance ce qui m'a permis de mener à bien ce projet. Merci à mon frère Julien pour toutes nos chamailleries ainsi qu'à sa femme, Cécile, et leurs enfants Florent et Mélissa à qui je souhaite un bel avenir.

Le meilleur pour la fin… Merci à Sébastien. Tu as suivi chacune de mes péripéties et ta présence, ton soutien et ta patience m'ont permis d'aller « petit à petit » au bout de cette aventure. Les mots me manquent pour te dire tout ce que je voudrais te dire… Maintenant voguons ensemble vers d'autres horizons. Qui sait, un jour, peut-être, on nous retrouvera en NZ…

Cécile BATIER
À Montpellier, le 24 mars 2016.

Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen :
D'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales

RÉSUMÉ

La performance énergétique des bâtiments peut être estimée grâce à la réalisation de simulations de thermique dynamique qui prennent en compte différentes hypothèses conventionnelles telles que celles définies dans la réglementation thermique 2012 (météo, occupation, consignes de température, usages de la fenêtre et du volet par les occupants, etc.). Les retours d'expériences dans les bâtiments énergétiquement performants mettent en évidence des écarts importants de consommations énergétiques entre les prévisions et les mesures *in situ* ainsi que des surchauffes estivales. D'après la communauté scientifique, même s'il existe de multiples facteurs pouvant expliquer ces écarts, l'occupant semble être l'élément le plus impactant. En effet, son action sur la fenêtre et le volet modifie le renouvellement d'air et la gestion des apports solaires. L'usage mais aussi la typologie de la fenêtre et du volet affectent donc les consommations énergétiques et le confort. L'objectif de notre étude est l'analyse de l'évolution thermique d'appartements occupés afin d'établir un modèle comportemental de l'occupant réel permettant de quantifier l'impact des modifications architecturales sur le confort thermique et les performances énergétiques des bâtiments.

L'objet d'étude est un ensemble de deux résidences situées sur la commune de Vauvert (Gard, France) construites en 1969. De caractéristiques constructives identiques et suite à des rénovations similaires (V.M.C., chaudières, fenêtres), l'une d'entre elles a été récemment isolée thermiquement par l'extérieur. Une analyse sur une année des conditions thermiques réelles, du comportement individuel de l'occupant et des consommations d'énergie est menée sur la base d'enquêtes et par une instrumentation *in situ* dans les séjours de 13 appartements occupés. Elle nous permet de définir un modèle comportemental de l'occupant soit 32 combinaisons d'usage de la fenêtre et du volet qui peuvent être regroupées selon trois profils d'occupant (l'occupant « expert », l'occupant « actif » et l'occupant « contre-productif »). La modélisation fine des paramètres nécessaires pour les simulations de thermique dynamique réalisées avec Pléiades+COMFIE, aide à la compréhension de l'impact des stratégies architecturales sur le confort et les consommations énergétiques des bâtiments en milieu méditerranéen.

L'analyse thermique des deux résidences (isolée et non-isolée) montre, en hiver, des niveaux similaires de consommation pour un confort réduit dans la résidence non-isolée. Cependant, en été, lors de pics de température, des surchauffes apparaissent dans la résidence isolée. Le comportement de l'individu a ainsi un rôle essentiel dans la limitation de l'inconfort d'été. Les analyses des mesures *in situ* montrent que des stratégies permettant le rafraîchissement des appartements ne sont pas toujours mises en place par les occupants. Des solutions architecturales atténuant le comportement « contre-productif » de l'individu sont finalement évaluées.

Mots clés : confort thermique, comportement individuel, simulation de thermique dynamique, stratégies architecturales, consommations énergétiques, habitat social

Thermal comfort and energy in social housing in Mediterranean area:
From a behavioral model of occupants to architectural strategies

ABSTRACT

The current design of energy-efficient buildings used to be performed by dynamic thermal simulations using conventional hypotheses like those of the 2012 French thermal regulations (weather reports, occupancy, temperature set, operations of windows and shutters by occupants, etc...). However, feedback highlights a great difference in energy consumption between forecasts on the one hand and *in situ* measurements in winter as well as overheating in summer on the other hand. According to the scientific community, even if many factors can account for this gap, the inhabitants seem to play a major role in it as well. Indeed, by acting on their windows and shutters, they modify the renewal rate of fresh air and the management of solar contributions. As the matter of fact, the use and the type of windows and shutters affect the energy consumptions and the comfort. The aim of this study is to analyse the thermal evolution of occupied apartments in order to establish a behavioral model of the occupants. This will allow us to quantify the impact of architectural modifications on the thermal comfort and the energy performances of buildings.

Two residential buildings are investigated in Vauvert (a city in southern of France). Both of them were built in 1969 using the same constructive techniques and have lately been renovated in a similar way (CMV, boilers, windows). The only difference is that on the facade of one of them an external thermal insulation has recently been installed. The analysis of the real thermal conditions, of the actual human behavior and of the amount of energy consumed is built on surveys and on an extensive year-round *in situ* instrumentation in the living rooms of 13 apartments. It allows us to define a behavioral model of occupants based on 32 different combinations in the operations of windows and shutters. We can divide them into three occupants' profiles (the "expert" occupant, the "active" occupant and the "counterproductive" occupant). Digital *Pléiades+COMFIE* simulations are made in order to validate this model. The refined modeling of the dynamic thermal simulation parameters helps to understand the impact on the thermal comfort and the energy consumption of different architectural strategies in the Mediterranean area.

In winter the thermal analysis of the two residential buildings (insulated and non-insulated) shows similar levels of consumption, but a lower level of thermal comfort in the non-insulated case. However during temperature peaks in summer, overheating appears in the insulated dwellings, but human behavior is the key to limit occupants' discomfort. The analysis of *in situ* measurements shows that strategies to cool down the apartments are not always implemented by occupants. Architectural solutions mitigating "counterproductive" occupants' behavior are finally examined.

Key words: thermal comfort, human behavior, dynamic thermal simulation, architectural strategies, energy consumption, social housing

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS 5

RÉSUMÉ 9

ABSTRACT 11

TABLE DES MATIÈRES 13

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES 19

INTRODUCTION GÉNÉRALE 25

Contexte de la thèse 25
Intérêt de la thèse et méthodologie 25
Présentation du manuscrit 26

CHAPITRE 1 : ÉCONOMIES D'ÉNERGIE, LE FACTEUR HUMAIN 29

Introduction 31

I. 40 ans de réglementation sur le climat et le développement durable 31

I.1. Facteur 4 et Grenelle de l'environnement 32

I.2. Secteur du bâtiment, premier secteur consommateur d'énergie en France 32

I.2.1. Une Réglementation Thermique de plus en plus exigeante 33

I.2.1.1. Historique des réglementations thermiques 33
I.2.1.2. RT 2012, des exigences de résultats et de moyens pour réduire les consommations énergétiques 35
I.2.1.3. RT 2012, des retours d'expériences mitigés 37

I.2.2. La réhabilitation, un enjeu majeur 38

I.2.2.1. La réglementation dans l'existant 38
I.2.2.2. Réhabilitation et aides à la décision 39

II. Le confort thermique dans le bâtiment 40

II.1. Limitation dans l'analyse du confort 41

II.2. Le confort, une habitude culturelle 42

II.2.1. Vivre avec le climat : architecture vernaculaire 42
II.2.2. Homogénéisation des ambiances intérieures 42
II.2.3. « Chauffer le corps » 43

II.3. La machine thermique de l'être humain : première et deuxième peau 44

II.3.1. Aspect physiologique : la thermorégulation 45

II.3.1.1. Thermorégulation végétative 45
II.3.1.2. Thermorégulation comportementale 46

II.3.2. Aspect psychologique : Sensation de confort 46
II.3.3. Aspect physique : Équilibre thermique 47

II.3.3.1. Échanges à la surface de la peau 48
II.3.3.2. Échanges thermiques par la respiration 50
II.3.3.3. Équilibre thermique 51

II.3.4. Mesure du confort thermique 51

II.3.4.1. Le modèle de FANGER : PMV-PPD 52
II.3.4.2. Modèles plus complexes 54

II.4. La relation Habitant-Habitat : troisième et quatrième peau 55

II.4.1. L'habitat, une machine thermique complexe 55
II.4.2. La notion de contrôle de l'environnement habité 57
II.4.3. Le confort adaptatif 59

III. L'occupant, acteur de son environnement direct 62

III.1. Aider au changement des comportements 63

III.1.1. Les moyens 63
III.1.2. Les limites : l'effet rebond 65

III.2. Étude du comportement de l'individu 66

III.2.1. Modéliser le comportement des individus 66
III.2.2. Actions sur les fenêtres 67
III.2.3. Actions sur les protections solaires 68

Conclusion 70

CHAPITRE 2 : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE D'ÉTUDE DE L'AMBIANCE THERMIQUE, DU CONFORT ET DU COMPORTEMENT INDIVIDUEL 73

Introduction 75

I. Description du site d'étude 75

I.1. Localisation 75
I.2. Typologie de bâtiments et d'appartements 76
I.3. Environnement climatique 77
I.3.1. Choix d'une station météorologique 77
I.3.2. Étude du fichier climatique 82

II. Enquête au porte à porte 84

II.1. Réalisation des questionnaires 84
II.2. Analyse des résultats 85
II.2.1. Participation et répartition 85
II.2.1.1. Typologie d'appartements 86
II.2.1.2. Caractéristiques du ménage 86
II.2.2. Le confort 88
II.2.2.1. En moyenne 88
II.2.2.2. En été 89
II.2.2.3. En hiver 90
II.2.3. Le comportement estival 91
II.2.3.1. Ambiance thermique dans les logements 91
II.2.3.2. Ouverture des volets et des fenêtres 92
II.2.3.3. Mouvements d'air 94
II.2.3.4. Accessoires de rafraîchissement 95
II.2.4. Le comportement hivernal 96
II.2.4.1. Ambiance thermique dans les logements 96
II.2.4.2. Ouverture des volets et fenêtres 96
II.2.4.3. Le rapport au chauffage 96
II.2.4.4. Chauffages d'appoint 98
II.2.5. Rapport au développement durable 98
II.3. Conclusion de l'enquête 100

III. Instrumentation in situ 100

III.1. Une instrumentation pour mesurer quoi ? 100
III.2. Réalisation d'un enregistreur de données autonome : la solution Arduino 101
III.2.1. La solution Arduino 101
III.2.2. La carte et ses capteurs 102
III.2.2.1. Carte avec microprocesseur : Arduino Pro mini 102
III.2.2.2. Température ambiante et humidité relative 102
III.2.2.3. Ouverture/fermeture des fenêtres 103
III.2.2.4. Luminosité pour évaluer l'ouverture/fermeture des volets 103
III.2.2.5. Horodatage 105
III.2.2.6. Enregistrement des données sur une carte mémoire 106
III.2.3. Montage et programmation compilés dans le boîtier de capteurs 106
III.2.4. Ergonomie du boîtier de capteurs 109

III.3. Choix des appartements et positionnement des capteurs 110
III.3.1. Méthode de sélection des appartements étudiés 110
III.3.2. Positionnement des capteurs 112

Conclusion 114

CHAPITRE 3 : ANALYSE EXPÉRIMENTALE : COMPORTEMENTS INDIVIDUELS, CONSOMMATIONS ET CONFORT THERMIQUE DANS DES BÂTIMENTS ISOLÉS ET DANS DES BÂTIMENTS NON-ISOLÉS 117

Introduction 119

I. Confort et consommations - résidence isolée et résidence non-isolée 119

I.1. Étude des consommations énergétiques annuelles 119
I.2. Étude du confort/inconfort 122
I.2.1. La saison estivale 124
I.2.2. La demi-saison 125
I.2.3. La saison hivernale 126
I.3. Analyses complémentaires 128
I.3.1. Les débits d'extraction d'air 128
I.3.2. L'humidité relative 129

II. Gestion du couple fenêtre-volet 130

II.1. Étude de l'ouverture et de la fermeture de la fenêtre 130
II.1.1. Analyse saisonnière de la durée d'ouverture 130
II.1.2. Typologies des usages de la fenêtre 132
II.1.3. Des stratégies saisonnières 133
II.1.3.1. Analyse des usages en été 133
II.1.3.2. Analyse des usages en hiver 139
II.1.3.3. Analyse des usages en demi-saison 142
II.2. Étude de l'ouverture et de la fermeture du volet 145
II.2.1. Traduction des données 145
II.2.2. Typologies des usages du volet 147
II.2.3. Des stratégies saisonnières 147
II.2.3.1. Analyse des usages en été 149
II.2.3.2. Analyse des usages en hiver 150
II.2.3.3. Analyse des usages en demi-saison 153

III. Identification des profils d'occupant 155

III.1. Évolution de l'inconfort : le degré d'inconfort 155
III.2. Analyse des actions et du confort en été 155
III.3. Analyse des actions et du confort en hiver 167

Conclusion 172

CHAPITRE 4 : SOLUTIONS ARCHITECTURALES D'AMÉLIORATION DU CONFORT AVEC DIMINUTION DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES 175

Introduction 177

I. Création d'un modèle numérique..... 177

I.1. Outils de Simulation Thermique Dynamique (S.T.D.) 177

I.2. Une S.T.D, trois éléments à modéliser 178

I.2.1. Le modèle constructif : le « module-appartement » 179
I.2.2. Le modèle météorologique 181
I.2.3. Les scénarios d'usages 182

II. Simulations et scénarios d'usages 182

II.1. Scénarios issus des comportements réels 182

II.1.1. Les scénarios réels 183

II.1.1.1. L'occupation 183
II.1.1.2. Consigne de température 183
II.1.1.3. Apports internes dus aux équipements 183
II.1.1.4. Gestion des volets 183
II.1.1.5. Gestion des fenêtres 183

II.1.2. Validation du modèle architectural 184

II.1.2.1. En été 184
II.1.2.2. En hiver 185

II.2. Scénarios conventionnels de la RT 2012 187

II.2.1. Les scénarios de la RT 2012 187

II.2.1.1. L'occupation 187
II.2.1.2. Consigne de température 188
II.2.1.3. Apports internes dus aux équipements 188
II.2.1.4. Gestion des protections solaires mobiles 188
II.2.1.5. Gestion des fenêtres 189

II.2.2. Comparaison avec les mesures 189

II.2.2.1. En été 189
II.2.2.2. En hiver 191

II.3. Modèle comportemental 192

II.3.1. Transposition des profils d'occupant en scénarios comportementaux 192
II.3.2. Validation du modèle comportemental 194

III. L'architecture, moteur de confort d'été..... 196

III.1. Modèle comportemental et réduction de l'inconfort 196

III.1.1. En été 197

III.1.1.1. Orientation Sud 197
III.1.1.2. Orientation Est 202
III.1.1.3. Orientation Ouest 204

III.1.2. En hiver 206

III.1.2.1. Orientation Sud ... *206*
III.1.2.2. Orientation Est ... *207*
III.1.2.3. Orientation Ouest ... *208*

III.2. Stratégie architecturale : l'enveloppe bioclimatique ... 209

III.2.1. Approche avec le confort thermique ... 209

III.2.1.1. Typologie d'occultation et protections solaires ... *209*
III.2.1.2. Typologie de baie et ventilation naturelle ... *212*
III.2.1.3. Façade double peau ... *215*
III.2.1.4. Végétalisation de la façade ou du pied de façade ... *216*
III.2.1.5. Matériaux innovants : matériaux à changement de phase ... *216*

III.2.2. Approche multi-confort ... 218

III.2.2.1. Analyse sensible de l'existant ... *218*
III.2.2.2. Analyse sensible de solutions bioclimatiques ... *220*

III.2.2.2.a. L'objet fenêtre ... *220*
III.2.2.2.b. L'objet fenêtre végétalisée ... *222*
III.2.2.2.c. L'objet ventilation renforcée ... *223*

III.2.3. Impact sur le confort en fonction des modèles comportementaux des occupants ... 225

Conclusion ... 228

CONCLUSION ET PERSPECTIVES ... 231

Conclusion ... 231
Limites de l'étude et Perspectives ... 233
Schéma conclusion ... 235

BIBLIOGRAPHIE ... 237

ANNEXES ... 251

A. Comparaisons des écarts annuels de températures des quatre stations météorologiques 253
B. Questionnaire d'enquête ... 255
C. Conception d'un enregistreur de données autonome avec la technologie Arduino ... 259
C.1. Montages et programmes initiaux ... *259*
C.2. Réduction des consommations ... *261*
D. Caractéristiques techniques des éléments du boîtier de capteurs ... 271
E. Programme du capteur fenêtre ... 275
F. Diagramme des appartements sélectionnés ... 283
G. Diagramme solaire ... 285

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

Abréviation	Description
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
B.B.C.	Bâtiment Basse Consommation
BEPAS	Bâtiment Passif
BEPOS	Bâtiment à Énergie POSitive
C.S.T.B.	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
G.I.E.C.	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GND	En électricité, Ground, la terre
I.P.C.C.	Intergovernmental Panel on Climate Change
I.T.E.	Isolation Thermique par l'Extérieur
I2C	Inter Integrated Circuit Bus
M.C.P.	Matériau à Changement de Phase
MISO	Master Input, Slave Output
MOSI	Master Output, Slave Input
NSP	Ne se prononce pas
P.V.C.	Polychlorure de vinyle
RT	Réglementation thermique
S.P.I.	Serial Peripheral Interface
S.T.D.	Simulation de Thermique Dynamique
SS	Slave Select
V.M.C.	Ventilation Mécanique Contrôlée
VCC	Alimentation Tension Continue

Symbole	Unité	Description
A_D	m²	Surface de peau nue d'un individu
A_i	m²	Aire intérieure de la paroi déperditive i
Bbio	Point	Besoin bioclimatique du bâtiment
$Bbio_{max}$	Point	Besoin bioclimatique maximum
C	W/m²	Échanges de chaleur par convection
Cb	J/°C	Capacité thermique totale du bâtiment
Cch	kWh/m²	Consommation de chauffage
Cep	kWh_{ep}/(m².an)	Consommation conventionnelle en énergie primaire
Cep_{max}	kWh_{ep}/(m².an)	Consommation conventionnelle maximale en énergie primaire
C_{RES}	W/m²	Échanges thermiques par convection respiratoire
D.I.E.S.	h	Durée d'Inconfort d'Été Statistique
DH_{25}	°C.h	Degré-Heures base 25
DHI_{+3}	°C.h	Cumul des Degré-Heures d'Inconfort supérieur à T_{C+3}
DHI^j_{+3}	°C.h/j	Cumul des Degré-Heures d'Inconfort supérieur à T_{C+3} journalier
DHI_{-3}	°C.h	Cumul des Degré-Heures d'Inconfort inférieur à T_{C-3}
DHI^j_{-3}	°C.h/j	Cumul des Degré-Heures d'Inconfort inférieur à T_{C-3} journalier
DJU_{18}	°C.j	Degré-Jours Unifiés base 18
E_{RES}	W/m²	Échanges thermiques par évaporation respiratoire
E_{SK}	W/m²	Échanges de chaleur par évaporation de la sueur
ET*	°C	Température effective
f_{Cl}	-	Facteur de surface du vêtement
h	m	Hauteur d'un individu
H	W/(m².°C)	Coefficient de déperdition thermique
h_C	W/(m².K)	Coefficient de transfert thermique par convection
h_R	W/(m².K)	Coefficient de transfert thermique par rayonnement
I_{Cl}	K.m²/W ou clo	Isolation thermique du vêtement
j	j	Nombre de jours de mesure
K	W/m²	Échanges de chaleur par conduction
L	W/m²	Écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et chaleur cédée
L_j	m	Longueur de la liaison du pont thermique j
m	kg	Masse de l'individu
M	W/m² ou met	Activité métabolique
$P_{A,H2O}$	Pa	Pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant
P_{gc}	W	Production par les systèmes de génie climatique (+ pour le chauffage et – pour la climatisation)
P_{int}	W	Production par les apports internes
PMV	-	Predicted Mean Vote ou Vote Moyen Prévisible
PPD	%	Predicted Percent Dissatisfied ou Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits
Q_{RES}	W/m²	Flux de chaleur échangé par la respiration
Q_{SK}	W/m²	Flux de chaleur échangé à la surface de la peau
R	W/m²	Échanges de chaleur par rayonnement
S	W/m²	Chaleur stockée
S_{CR}	W/m²	Chaleur stockée dans le corps
SET	°C	Température standard effective

S_{SK}	W/m²	Chaleur stockée dans la peau
t	s, h ou j	Temps
T_A	K ou °C	Température de l'air ambiant
Tb	°C	Température moyenne du bâtiment
T_C	°C	Température intérieure de confort optimal
T_{C+3}	°C	Température de confort + 3 °C
T_{C-3}	°C	Température de confort – 3 °C
T_{Cl}	K ou °C	Température de la surface externe du vêtement
T_e	°C	Température extérieure horaire
Tej_{max}	°C	Température extérieure journalière maximale
Tej_{min}	°C	Température extérieure journalière minimale
T_{ext}	°C	Température extérieure
T_G	°C	Gain thermique dû aux apports gratuits
T_i	°C	Température intérieure
Tic	°C	Température intérieure conventionnelle
$Tic_{réf}$	°C	Température intérieure conventionnelle de référence
T_{op}	°C	Température opérative intérieure
$\overline{T_R}$	K ou °C	Température moyenne de rayonnement
T_{RM}	°C	Température moyenne glissante du jour
T_{RM-1}	°C	Température moyenne glissante de la veille
T_{RM7}	°C	Température extérieure en moyenne glissante journalière sur 7 jours
T_{SK}	K ou °C	Température de la peau
Ubât	W/(m².°C)	Coefficient de transmission thermique du bâtiment (ou partie du bâtiment)
U_i	W/(m².°C)	Coefficient de transmission thermique de la paroi déperditive i
Uw	W/(m².K)	Coefficient de transmission de la fenêtre (châssis + vitrage)
v_A	m/s	Vitesse relative de l'air ambiant
W	W/m² ou met	Puissance fournie à l'extérieur
θ_{-1} à θ_{-n}	°C	Température moyenne journalière des jours J-1 à J-n
φ_{air}	W	Apports thermiques liés au renouvellement d'air
φ_{env}	W	Apports thermiques à travers l'enveloppe
φ_{sol}	W	Apports solaires transférés à travers les vitrages
Ψ_j	W/(m².°C)	Coefficient de transmission thermique linéique du pont thermique j

NOMINATION DES APPARTEMENTS

Code Appartement	Résidence	Exposition du séjour	Étage	Locataire
I-SN-0-A	Isolée	Sud	R.D.C.	Adulte
I-SN-1-A	Isolée	Sud	R+1	Adulte
I-SN-2-A	Isolée	Sud	R+2	Adulte
I-SN-3-A	Isolée	Sud	R+3	Adulte
I-SN-3D-S	Isolée	Sud	R+3 - Dernier étage	Sénior
I-EO-2-A	Isolée	Est	R+2	Adulte
I-OE-2-A	Isolée	Ouest	R+2	Adulte
N-SN-0-A	Non-isolée	Sud	R.D.C.	Adulte
N-SN-1a-A	Non-isolée	Sud	R+1	Adulte
N-SN-1b-A	Non-isolée	Sud	R+1	Adulte
N-SN-3D-A	Non-isolée	Sud	R+3 - Dernier étage	Adulte
N-SN-2-S	Non-isolée	Sud	R+2	Sénior
N-EO-1-A	Non-isolée	Est	R+1	Adulte

TYPOLOGIES DE LA FENÊTRE

Code	Nom	Heure d'ouverture
D	Absence de données	--
R	Aération réduite	De 11 h à 12 h
M	Aération le matin	De 7 h à 10 h
J	Aération en journée	De 10 h à 16 h
L	Aération journée longue	De 7 h à 22 h
O	Ouverture supérieure à 20 h/j	De 0 h à 24 h
S	Aération le soir	De 18 h à 22 h
N	Sur-ventilation le matin, le soir ou la nuit	De 19 h à 10 h
F	Fermeture toute la journée	Jamais
I	Indéterminé	--

TYPOLOGIES DU VOLET

Code	Définition	Heure d'ouverture
D	Absence de donnée	--
O	Ouverture toute la journée	De 6 h à 22 h
M	Protection le matin	De 13 h à 22 h
A	Protection l'après-midi	De 6 h à 12 h
P	Protection en journée	Jamais
I	Indéterminé	--

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte de la thèse

En 2012, en France, le secteur du bâtiment, composé de deux tiers de résidentiel et d'un tiers de tertiaire, a dépensé 44 % de la consommation finale d'énergie et a émis dans l'atmosphère près de 18 % des gaz à effet de serre *(M.E.D.D.E., 2014b)*. En 2003, le chef de l'état et le premier ministre se sont engagés, en mettant en place le Grenelle de l'environnement, à « *diviser par un facteur 4 les émissions de gaz à effet de serre du niveau de 1990 d'ici 2050* ». Le Grenelle de l'environnement a conduit à la mise en place de la réglementation thermique 2012 dite RT 2012, généralisant ainsi la conception de bâtiments neufs à basse consommation d'énergie. En ce qui concerne l'existant, l'exigence est de réduire de 38 % les consommations d'énergie d'ici 2020 *(M.E.E.D.D.M., 2009)*.

Pour atteindre ces objectifs, les bâtiments sont étudiés par l'intermédiaire de simulations thermiques permettant de définir les consommations conventionnelles d'énergie. Ces simulations sont réalisées avec des scénarios standards définis dans la réglementation thermique permettant ainsi de comparer, au niveau énergétique, les bâtiments à une base réglementaire. Cependant ces scénarios occultent le comportement de l'usager. L'efficacité énergétique d'un bâtiment ne peut, en effet, pas se réduire à une simple étude thermique et il devient, alors, nécessaire de prendre en compte le comportement et les contraintes spécifiques de l'occupant. En réponse à une « ambiance subie » (des températures trop élevées en été ou bridées en hiver, par les limites de consommations énergétiques), en lien avec ses « habitudes » ou des « contraintes environnementales » (nuisances acoustiques extérieures…), l'usager tend alors à développer une « interaction active » avec son habitat en agissant sur sa fenêtre et son volet par exemple.

Sur la base des différentes réglementations thermiques existantes, les bailleurs sociaux sont aujourd'hui amenés à mettre en place des programmes de rénovation de leur parc immobilier. Dans de nombreux cas, la stratégie mise en place par les concepteurs permet de limiter la précarité énergétique des ménages, mais peu de réflexions sont développées pour limiter les surchauffes d'été. En conséquence, malgré des investissements importants, les locataires qui se plaignaient du froid en hiver, se plaignent aujourd'hui de la chaleur en été.

Intérêt de la thèse et méthodologie

La communauté scientifique admet que l'occupant a un rôle important à jouer dans la limitation des surchauffes estivales mais aussi dans la réduction des consommations d'énergie en hiver. En ce sens, plusieurs pistes peuvent être envisagées :

- aider au changement des comportements des occupants,
- proposer des solutions architecturales adaptées aux pratiques des occupants.

Aider au changement des comportements est une action nécessaire mais dont les solutions doivent être amenées par une politique volontariste aidée par le champ des sciences sociales. Si aujourd'hui plusieurs actions sont menées en ce sens, l'objet de cette thèse est de nous interroger sur les moyens que possède l'architecte pour atténuer les comportements défavorables des occupants (en termes de confort ou de consommation d'énergie). Les principaux éléments architecturaux sur lesquels l'occupant peut agir sont la fenêtre et le volet, deux éléments dont les typologies peuvent être optimisées par l'architecte pour s'adapter aux occupants.

Aujourd'hui, les actions des habitants ne sont pas prises en compte dans les différentes réglementations thermiques actuelles qui se basent alors sur des scénarios s'appuyant sur les actions d'un occupant idéal. L'intérêt de cette thèse est donc d'étudier le comportement réel des occupants de logements sociaux (construits dans les années 60-70), grâce à une instrumentation *in situ* menée sur une année complète. L'analyse des mesures révèle la variabilité des usages de la fenêtre et du volet par les occupants. Nous en déduisons un modèle comportemental de l'occupant. Il permet, par la suite, de définir les stratégies comportementales et architecturales à mettre en place en fonction des profils types d'occupants identifiés pour lutter contre l'inconfort d'été.

Il s'agit d'une nouvelle thématique abordée grâce à la collaboration de deux laboratoires : le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (L.M.G.C.) de l'Université de Montpellier et du Laboratoire Innovation Formes Architecture Milieux (L.I.F.A.M.) de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier. Cependant, cette thèse aborde de nombreux champs disciplinaires : la thermique du bâtiment, l'architecture, la sociologie, les statistiques, l'électronique, etc. que l'on pourrait regrouper dans le champ de la « sociologie de l'énergie ». Il offre ainsi de nombreux débats en fonction des sensibilités de chacun. En effet au travers notre étude, nous interrogeons les pratiques des occupants en vue de proposer des solutions architecturales de limitation de l'inconfort et des consommations énergétiques et chaque domaine abordé peut être critiqué par leurs spécialistes respectifs. L'objectif n'est donc pas la réponse experte dans une discipline précise mais l'étude transversale d'une méthodologie permettant de prendre en compte l'occupant dans la conception architecturale énergétiquement efficace. Un vrai travail collaboratif entre les experts de chaque domaine semble essentiel pour la poursuite de la méthodologie avancée.

Présentation du manuscrit

Suite à cette introduction, le manuscrit se décompose en quatre chapitres suivis d'une conclusion générale et d'une mise en perspective du travail entrepris.

Le premier chapitre présente un état de l'art mettant en avant l'importance de la prise en compte du comportement des occupants si on souhaite concevoir des bâtiments performants. En effet, après avoir retracé l'évolution des réglementations thermiques et détaillé les exigences de celles en vigueur à l'heure où nous écrivons ces pages, nous définissons le confort thermique. Nous identifions, ainsi, une relation forte entre l'habitant et son habitat qui conduit à une interprétation du confort prenant en compte les agissements des occupants : le confort adaptatif. Pour finir, si l'occupant à un rôle important dans le maintien de son confort et dans la performance énergétique des bâtiments, l'analyse bibliographique met en évidence des freins au changement des comportements. Nous étudions alors d'une part les modèles existants prenant en compte l'occupant et d'autre part les études expérimentales étudiant les actions des occupants sur la fenêtre et le volet.

Le deuxième chapitre décrit la méthode expérimentale utilisée pour étudier l'ambiance thermique, le confort et les usages de la fenêtre et du volet par les occupants. Dans un premier temps nous définissons le site d'étude puis nous explicitons et analysons les résultats d'une enquête au porte à porte qui nous a permis d'étudier le confort ressenti dans les appartements et de choisir ceux à instrumenter. Pour finir nous décrivons comment nous avons réalisés des capteurs de mesure de l'ambiance thermique et des actions des occupants grâce à la solution Arduino pour instrumenter 13 appartements occupés par des locataires réels et volontaires.

Le troisième chapitre analyse les données expérimentales obtenues grâce aux outils précédemment mis en place. Dans un premier temps, nous mettons en perspective les consommations énergétiques et le confort dans une résidence isolée et une résidence non-isolée. Grâce à l'étude du couple fenêtre-volet, nous définissons par la suite huit typologies d'usage de la fenêtre et quatre concernant le volet. Les actions des occupants, qui ne semblent pas corrélées aux autres grandeurs physiques que nous avons mesurées, sont ensuite regroupées sous trois profils d'occupant : l'occupant « expert », l'occupant « actif » et l'occupant « contre-productif » conduisant à des situations de confort/inconfort différentes.

Le quatrième chapitre se base sur les typologies d'usages de la fenêtre et du volet afin de définir un modèle comportemental à implémenter dans le logiciel de thermique dynamique Pléiades+COMFIE. Après avoir validé le modèle numérique grâce à la réalisation de simulations prenant en compte les comportements réels, nous comparons les résultats des simulations faites avec les scénarios conventionnels et ceux des simulations issues du modèle comportemental. L'analyse de ces résultats confirme les dérives des scénarios conventionnels et permet de définir des stratégies de réduction de l'inconfort sur la base du modèle développé. Ces stratégies peuvent ainsi être transposées de manière à proposer des solutions architecturales d'amélioration du confort thermique palliant le comportement de l'occupant.

Pour finir la conclusion retrace les principales idées développées au cours de la thèse. Elle dresse ensuite les limites de l'étude dans chacun des domaines abordés et développe quelques pistes de réflexions supplémentaires dans les perspectives de ce travail.

« You can never learn less you can only learn more »

Richard Buckminster Fuller, Architecte, Écrivain (1895-1983)

Chapitre 1 : ÉCONOMIES D'ÉNERGIE, LE FACTEUR HUMAIN

« Notre maison brûle et nous regardons ailleurs »

Jacques Chirac,
IV^ème Sommet de la Terre, 2 septembre 2002, Johannesburg

Introduction

L'Homme a commencé par créer des abris pour se protéger des agressions extérieures : du climat trop rude, des ennemis, des maladies… Le foyer leur permettait de préparer les aliments pour la cuisson mais également de se réchauffer. Il amenait ainsi un peu de confort. Petit à petit l'Homme a modifié ses habitats pour amener « des conforts » ; il les a décorés, aménagés, structurés, éclairés, chauffés,… *(THELLIER, MONCHOUX, et BEDRUNE, 2012)*. Aujourd'hui et suite aux révolutions industrielles, les procédés se sont développés. Dans la majorité des cas, c'est grâce à des dispositifs technologiques que les bâtiments sont chauffés, éclairés, ventilés, climatisés… Cependant, ces dispositifs fonctionnent grâce à l'énergie fossile, nucléaire, hydroélectrique, éolienne, solaire…

Aujourd'hui les sociétés, au niveau mondial, ont pris conscience de l'importance de la protection de l'environnement et de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique. De plus, face à la raréfaction des ressources naturelles, différentes réglementations incitent également à la réduction des consommations énergétiques. En France, le secteur du bâtiment est le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre et possède une consommation énergétique très élevée. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, de multiples réglementations ont été mises en place afin de limiter les consommations d'énergie notamment dans le bâtiment. Cependant, entre 1973 et 2005, dans ce secteur, la consommation d'énergie finale a augmenté de 21 % *(POQUET et DUJIN, 2008)*. Cette augmentation est notamment liée au développement des nouvelles technologies, toujours consommatrices d'énergie et aux évolutions du confort des habitants.

L'individu, en tant que capteur sensoriel et acteur de son environnement direct, est au centre de toutes les interrogations. Pour ses activités quotidiennes, son confort, ses déplacements…, l'individu utilise de l'énergie sans même s'en rendre compte. Réduire les consommations énergétiques nécessite un changement des comportements des individus mais ces-derniers sont-ils prêts pour le faire ? La question reste posée. Ce n'est que par l'étude de ces comportements individuels que l'on pourra tenter de comprendre les raisons de ses actions et les modéliser lors de simulations de thermique dynamique permettant ainsi d'estimer au plus juste la performance énergétique des bâtiments.

I. 40 ans de réglementation sur le climat et le développement durable

Depuis le premier Sommet de la Terre en 1972, les différents chefs d'états n'ont cessé de se réunir pour prendre des mesures contre le réchauffement climatique et la raréfaction des ressources. Aujourd'hui de nombreux engagements ont été pris (et continuent à l'être) et différentes réglementations ont été instaurées à différents niveaux.

I.1. Facteur 4 et Grenelle de l'environnement

En 1972 lors du premier Sommet de la Terre à Stockholm, la notion de protection de l'environnement est abordée pour la première fois au niveau international. Il faudra attendre 1987 pour avoir une première définition du développement durable avec le rapport Brundtland, « Notre avenir à tous ». Il est défini comme un concept permettant de faire le lien entre les questions sociales, économiques, culturelles et environnementales dont la définition est la suivante : « *Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.* » *(M.E.D.D.E., 2014a)*.

En 1988, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (G.I.E.C. ou Intergovernmental Panel on Climate Change – I.P.C.C.) est créé. Il est mandaté pour évaluer de manière objective le suivi scientifique du réchauffement climatique. Il synthétise les différents points de vue de la communauté scientifique. Son dernier rapport *(I.P.C.C., 2014)*, comme les précédents, met en avant une élévation de la température d'ici 2100 comprise entre 0,3 et 4,8 °C en fonction des quantités de gaz à effet de serre émises dans l'atmosphère par l'activité humaine sur cette période. Outre le réchauffement climatique prévu par le G.I.E.C. les mesures prises répondent également à une seconde problématique : l'épuisement des ressources naturelles. En effet, depuis le premier choc pétrolier en 1973, les civilisations ont pris conscience de la quantité limitée des ressources naturelles d'origine fossile. Et même si de nouveaux gisements sont trouvés régulièrement, l'extraction est de plus en plus complexe. C'est face à ce double constat que la France mais aussi la communauté internationale s'est engagée dans la mise en place de plans d'actions permettant de limiter l'impact de l'activité humaine sur la Terre.

En 2004, la France crée alors le premier plan climat dans le but de stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre au niveau de 1990 sur la période 2008-2012, objectif fixé lors de la ratification du protocole de Kyoto en 1997. Depuis actualisé en 2008, 2011 et 2014, il prévoit les plans d'actions à mettre en œuvre par secteur pour atteindre les objectifs. En 2005, le protocole de Kyoto entre en vigueur et la France s'engage à diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 (facteur 4) à travers la loi P.O.P.E (Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique) *(M.E.D.D.E., 2015)*. En 2009, la France crée la loi Grenelle 1 (loi n° 2009-967 du 3 août 2009) qui dicte les engagements en termes de lutte contre le changement climatique, de préservation de la biodiversité, des écosystèmes et des milieux naturels, de la prévention des risques pour l'environnement et la santé et de la mise en place d'une démocratie écologique par une meilleure information du public. En 2010, la loi Grenelle 2 (loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010) permet la mise en application du Grenelle 1. L'application du protocole de Kyoto au niveau européen, fixe trois objectifs pour l'horizon 2020. Nommé le « 3 fois 20 », il consiste à diminuer de 20 % les émissions de gaz à effet de serre, augmenter la part d'énergie renouvelable à 20 % de la consommation finale d'énergie et améliorer de 20 % l'efficacité énergétique de l'union européenne *(M.E.D.D.E., 2015)*. Ces objectifs représentent une moyenne à atteindre au niveau européen, ils sont ensuite déclinés pour chaque pays.

I.2. Secteur du bâtiment, premier secteur consommateur d'énergie en France

En 2012, en France, le secteur du bâtiment, composé de deux tiers de résidentiel et d'un tiers de tertiaire, a consommé 44 % de la consommation totale d'énergie finale et a émis dans l'atmosphère près de 18 % des gaz à effet de serre *(M.E.D.D.E., 2014b)*. C'est le secteur qui consomme le plus d'énergie devant les transports, l'industrie, la sidérurgie et l'agriculture. Pour

répondre à ses engagements et réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, le Grenelle de l'environnement prévoit dans le secteur du bâtiment *(M.E.E.D.D.M., 2009)* :

- la généralisation des « bâtiments basse consommation » dits B.B.C. à toutes les nouvelles constructions dès fin 2012 (avec une modulation en fonction du type de bâtiment et de la localisation),
- la réduction de 38 % de la consommation d'énergie des bâtiments anciens d'ici à 2020,
- la définition d'un programme de rénovation thermique des bâtiments : 400 000 rénovations complètes par an à partir de 2013,
- le lancement d'un plan particulier pour les 800 000 logements sociaux dont la consommation annuelle d'énergie est supérieure à 230 $kWh_{ep}/(m^2.an)$ et pour les 180 000 logements sociaux rénovés dans les zones relevant du Programme National de Rénovation Urbaine,
- le développement d'outils d'incitation financière,
- la favorisation de la conclusion d'accords avec les banques et le secteur des assurances pour financer le développement des investissements d'économie d'énergie,
- l'incitation à l'amélioration de la formation initiale et continue.

I.2.1. Une Réglementation Thermique de plus en plus exigeante

I.2.1.1. Historique des réglementations thermiques

Depuis le premier choc pétrolier de 1973 et les coûts de l'énergie grandissants, plusieurs réglementations thermiques successives ont permis de réduire la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment en France.

En 1974 est créée la première réglementation thermique (RT 1974) *(J.O.R.F., 1974)*. Elle s'applique aux logements neufs et définie le coefficient volumique de déperditions thermiques appelé coefficient G (en $W/m^3.°C$). Ce dernier est modulé en fonction de trois zones climatiques et de sept classes de logements. Rapporté au volume du logement, il caractérise les déperditions thermiques dues au renouvellement de l'air et à la résistance thermique de l'enveloppe ainsi qu'à la perméabilité à l'air. Sans fixer d'objectifs de consommations d'énergie, cette réglementation avait pour ambition une réduction de 25 % des consommations d'énergie.

En 1979, suite au second choc pétrolier, l'article R131-20 du code de la construction et de l'habitation est modifié de manière à fixer la limite supérieure de température de chauffage à 19 °C dans toutes les pièces d'un logement *(J.O.R.F., 1979)*. Il n'a depuis jamais été modifié. Cette température reste une référence dans le cadre des simulations de thermique dynamique règlementaires. Il faudra attendre 2007 pour voir apparaître dans la réglementation la limitation de l'utilisation de la climatisation *(J.O.R.F., 2007b)*. Elle est limitée à une mise en fonctionnement uniquement sur les périodes où la température intérieure est supérieure à 26 °C.

En 1980, le label de Haute Isolation Thermique est créé *(J.O.R.F., 1980)*. Il encourage les maîtres d'ouvrage à améliorer l'isolation thermique des constructions afin d'obtenir des déperditions plus faibles que celles exigées dans la RT 1974. Cela conduira à une amélioration d'environ 20 % de l'isolation thermique des bâtiments *(POUGET, 1982)*. La réglementation thermique suivante, dite RT 1982, se base sur ces exigences en prenant en compte les apports gratuits. Ayant toujours comme objectif la réduction des consommations énergétiques comme le

montre la première phrase du décret n° 82-269 (J.O.R.F., 1982b) : « *Article R. 111-6 : Les équipements et caractéristiques thermiques des bâtiments d'habitation doivent permettre de chauffer les logements moyennant une dépense d'énergie limitée.* ». En plus du coefficient G pour le calcul des déperditions thermiques, il est créé le coefficient B (en W/m^3.°C) comme « *besoin de chauffage* » rapporté au volume habitable. Il prend en compte les déperditions thermiques ainsi que les apports de chaleur gratuits dus à l'occupation et au rayonnement solaire (J.O.R.F., 1982a). Les valeurs sont modulées en fonction des types de chauffage (électricité ou autre), de la localisation et du type de logement.

En 1988, la troisième réglementation thermique (RT 1988) transforme le coefficient G en coefficient GV et le coefficient B en BV. Ils seront exprimés en W/°C. Il est également créé le coefficient C qui évalue théoriquement les performances thermiques globales (en matière de chauffage et d'eau chaude sanitaire) d'un logement en prenant en compte les rendements (J.O.R.F., 1988). Il est exprimé en « unité d'énergie équivalente ». Plusieurs options sont possibles pour répondre à cette nouvelle réglementation mais chacun des coefficients à une référence qui ne doit pas être dépassée ou modulée en fonction des options choisies. Cette réglementation avait pour objectif une réduction de 25 % des consommations d'énergie des bâtiments par rapport à 1974 (ARENE, 2008).

Près de douze ans plus tard, et suite aux engagements de Rio et de Kyoto, la RT 2000 (J.O.R.F., 2000) entre en application avec comme objectif une réduction supplémentaire de 20 % des consommations d'énergie dans le résidentiel et de 40 % dans le tertiaire. Elle définit pour la première fois une consommation conventionnelle d'énergie pour les cinq postes majeurs que l'on retrouve dans les réglementations thermiques suivantes : le chauffage, la ventilation, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire (E.C.S.) et l'éclairage. Notée C (exprimée en kWh$_{ep}$/an), cette consommation est calculée en énergie primaire[1]. Elle doit être inférieure à une consommation conventionnelle de référence (C$_{réf}$). De même, pour l'été, dans les bâtiments non climatisés, la RT 2000 définit une température intérieure conventionnelle (Tic) qui ne doit pas être supérieure à une Tic de référence (Tic$_{réf}$). Elle correspond à la valeur maximale de la moyenne sur trois heures consécutives de la température opérative. C'est la première réglementation thermique qui prend en compte le confort d'été. Les coefficients BV et GV disparaissent au profit du *coefficient moyen de déperdition par les parois et les baies du bâtiment*, Ubât (en W/(m².K)) qui peut être calculé grâce à l'équation *[Éq. 1.1]*. Il définit les déperditions thermiques d'un bâtiment par transmission à travers les parois et les baies. Il doit être inférieur à la référence Ubât$_{réf}$ qui prend en compte les caractéristiques des parois opaques (murs, planchers), les menuiseries, et les liaisons périphériques. L'ensemble des coefficients de références est modulé en fonction des zones climatiques. Pour faire respecter ces exigences, deux leviers d'actions sont possibles : effectuer un calcul suivant la réglementation ou appliquer des solutions techniques validées par le ministère.

$$\boldsymbol{Ub\hat{a}t} = \frac{\sum(A_i.U_i) + \sum(L_j.\psi_j)}{\sum A_i} \qquad \text{[Éq. 1.1]}$$

- $Ubât$: *Coefficient de transmission thermique du bâtiment, W/(m².°C)*
- A_i : *Aire intérieure de la paroi déperditive i, m²*
- U_i : *Coefficient de transmission thermique de la paroi déperditive i, W/(m².°C)*
- L_j : *Longueur de la liaison du pont thermique j, m*
- Ψ_j : *Coefficient de transmission thermique linéique j, W/(m.°C)*

[1] « *L'énergie primaire (ep) est l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ce sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium.* » par opposition à « *L'énergie finale (ef) est l'énergie livrée au consommateur pour sa consommation finale (essence à la pompe, électricité au foyer,...)* » définition issue de http://www.insee.fr/

La RT 2005 s'inscrit dans la continuité de la RT 2000. Elle définit également une température intérieure conventionnelle, un coefficient de caractéristiques thermiques de l'enveloppe et une consommation globale d'énergie pour les cinq postes. Des compensations entre les postes sont donc possibles dans la limite de « garde-fous » qui définissent les performances minimales requises. Afin de pouvoir comparer les bâtiments entre eux, la consommation conventionnelle est maintenant définie par mètre carré ($kWh_{ep}/(m^2.an)$). Les exigences sont renforcées pour l'isolation thermique, la mise en place du chauffage et la ventilation. Elle introduit également les modèles bioclimatiques des bâtiments dès la conception et la possibilité de l'utilisation des énergies renouvelables *(D.G.U.H.C., 2006)* et *(J.O.R.F., 2006)*. Parallèlement à la RT 2005 plusieurs labels ont été créés dans le but d'inciter les concepteurs à réaliser des bâtiments toujours plus performants. C'est notamment le cas du label « bâtiment basse consommation » dit label B.B.C. qui limite la consommation d'énergie à 50 $kWh_{ep}/(m^2.an)$ en moyenne sur l'ensemble des régions.

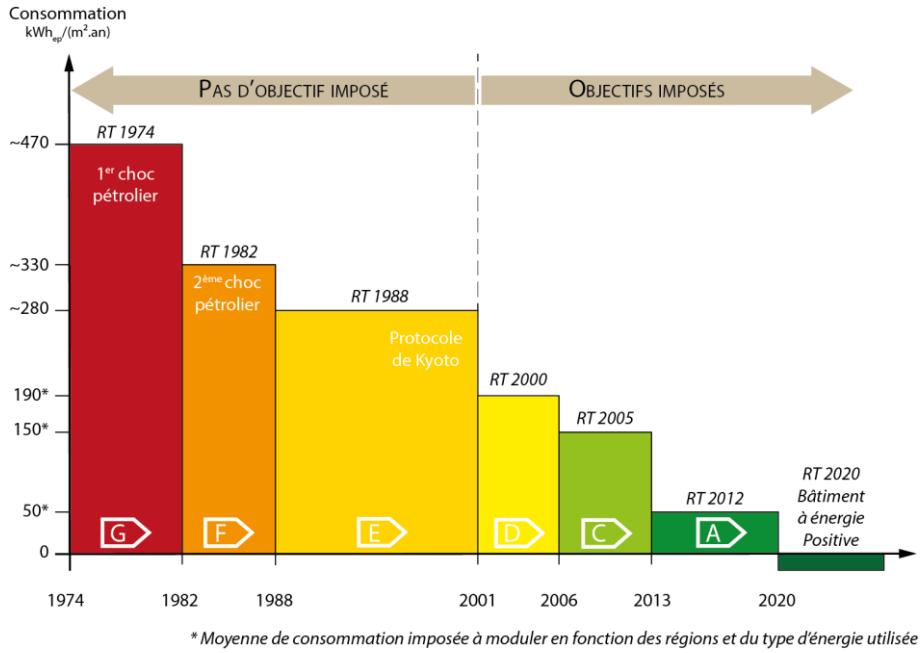


FIGURE 1.1 : *Consommation d'énergie en fonction des différentes réglementations thermiques de l'auteur d'après (C.F.B.P., 2014)*

I.2.1.2. RT 2012, des exigences de résultats et de moyens pour réduire les consommations énergétiques

En 2012, la RT 2012 prend comme référence le label B.B.C.. Son objectif est alors d'inciter les constructeurs à produire des bâtiments dont la consommation énergétique n'excède pas 50 $kWh_{ep}/(m^2.an)$, valeur modulée en fonction de la localisation géographique et de l'usage du bâtiment. L'objectif à terme étant d'arriver à produire des bâtiments passifs (BEPAS) et en 2020 des bâtiments à énergie positive (BEPOS). Elle définit des exigences de résultats qui sont calculées grâce aux méthodes de calculs Th B-C-E fixées par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment *(C.S.T.B., 2011)* dans l'annexe de l'arrêté du 20 juillet 2011 *(M.E.D.D.T.L., 2011)* modifié par *(M.E.D.D.E. et M.E.T.L, 2013)*. Ces méthodes de calculs complexes ont été rassemblées dans un moteur de calculs, lui-même repris dans différents logiciels de thermique dynamique afin de réaliser des simulations de la performance énergétique des bâtiments sur la base de scénarios conventionnels (météorologiques, comportementaux ou techniques). Il permet de comparer les bâtiments sur la base de trois exigences réglementaires : le besoin bioclimatique (Bbio), la

consommation conventionnelle d'énergie primaire (Cep) et la température intérieure conventionnelle (Tic).

Le besoin bioclimatique caractérise, dès l'esquisse, la performance énergétique du bâtiment. Cela permet de favoriser et d'optimiser la conception bioclimatique du bâtiment. 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 $Bbio_{max}$. Le Bbio prend en compte différentes caractéristiques du projet (l'orientation, les apports solaires, l'éclairage naturel, le niveau d'isolation, l'inertie, la compacité, la mitoyenneté) afin de définir les besoins du bâtiment en termes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage *(D.G.A.L.N., 2011)*. Il s'exprime en points et est indépendant de la consommation d'énergie et du type d'énergie utilisée.

$$Bbio \leq Bbio_{max} \qquad \text{[Éq. 1.2]}$$

- *Bbio* : *Besoin bioclimatique du bâtiment, en points*
- *$Bbio_{max}$* : *Besoin bioclimatique maximum, en points*

Comme dans la réglementation thermique 2005, la consommation conventionnelle d'énergie primaire (Cep) ne doit pas dépasser le seuil de Cep_{max}. Cette consommation est définie pour les cinq usages réglementés : le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire (E.C.S.), le refroidissement, l'éclairage et les auxiliaires (de chauffage, de refroidissement, d'E.C.S., de ventilation et d'éclairage). La consommation conventionnelle maximale est fixée à 50 $kWh_{ep}/(m^2.an)$ (57,5 $kWh_{ep}/(m^2.an)$ pour les logements collectifs). Cette valeur est ensuite modulée en fonction de l'usage du bâtiment, de la localisation géographique, de l'altitude, de la surface moyenne des logements, et des émissions de gaz à effet de serre.

$$Cep \leq Cep_{max} \qquad \text{[Éq. 1.3]}$$

- *Cep* : *Consommation conventionnelle en énergie primaire, $kWh_{ep}/(m^2.an)$*
- *Cep_{max}* : *Consommation conventionnelle maximale en énergie primaire, $kWh_{ep}/(m^2.an)$*

La définition de la Température Intérieure Conventionnelle (Tic) n'a pas changé par rapport à celle de la RT 2005. La Tic doit être inférieure à une température intérieure conventionnelle de référence (Tic_{ref}). Selon l'article 6 de l'arrêté du 26 octobre 2010 *(J.O.R.F., 2010)*: « *La température intérieure conventionnelle d'un local, atteinte en été, notée Tic, 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 par l'intermédiaire du moteur de calcul Th B-C-E. La température (Tic) atteinte dans les locaux au cours des cinq jours les plus chauds en été, ne doit pas dépasser la Tic_{ref}. Mais suivant les caractéristiques climatiques de la zone étudiée, de l'usage du local et des caractéristiques de l'enveloppe cette valeur peut fortement varier. 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. sont en cours pour la réévaluer et définir un nouveau paramètre : la Durée d'Inconfort d'Été Statistique (D.I.E.S.). D'après *(CACCAVELLI, 2014)*, il s'agit de définir une zone de confort (dont nous verrons les différentes définitions dans le paragraphe suivant) et d'évaluer statistiquement le niveau d'inconfort des occupants. La D.I.E.S. cumule ensuite le pourcentage d'insatisfaits sur la période d'occupation étudiée.

$$Tic \leq Tic_{ref} \qquad \text{[Éq. 1.4]}$$

- *Tic* : *Température intérieure conventionnelle, °C*
- *Tic_{ref}* : *Température intérieure conventionnelle de référence, °C*

La réglementation définit également des exigences en termes de moyens pour atteindre les objectifs fixés. Les exigences de moyens sont fixées par les articles 16 à 45 de l'arrêté du 26 octobre 2010 *(J.O.R.F., 2010)*. Ce dernier fixe notamment des règles en ce qui concerne : l'isolation du bâti (éviter les ponts thermiques), l'étanchéité à l'air, l'accès à l'éclairage naturel, la mise en place de protections solaires pour les locaux de sommeil ou le recours aux énergies renouvelables.

I.2.1.3. RT 2012, des retours d'expériences mitigés

Nous pouvons faire deux constats majeurs face à ces bâtiments dits performants. D'une part, pour le maître d'ouvrage, les consommations énergétiques prévues ne reflètent pas la réalité économique et, d'autre part, la problématique majeure du confort d'été reste posée.

Chaque projet est un prototype. Pour atteindre les exigences de la RT 2012, les concepteurs réalisent des simulations par l'intermédiaire de logiciels de thermique dynamique ce qui permet de modéliser le bâtiment et de faire les meilleurs choix en termes de conception, de technologie... Il est ainsi défini une consommation conventionnelle du bâtiment suivant un jeu d'hypothèses : la météo, l'occupation des différentes pièces, 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 idéale. Or en phase d'exécution ou de gestion du bâtiment de nombreux facteurs peuvent perturber les estimations de consommations énergétiques *(SPITZ, 2012)*. Les maîtres d'ouvrage, à qui il est demandé un plus lourd investissement pour réaliser un bâtiment performant, peuvent alors être trompés car les retours sur investissements sont alors plus limités. La consommation conventionnelle permet ainsi de comparer les bâtiments entre eux, mais ne constitue pas une base pour définir les économies potentielles. La définition d'une consommation prévisionnelle est alors nécessaire. Se basant sur des hypothèses plus réalistes (météorologie du site d'étude, occupation définie, intégration des postes de consommation non-réglementaires…), la consommation prévisionnelle peut s'approcher de la réalité *(C.S.T.B. et I.F.P.E.B., 2012)*. Mais durant la phase d'exploitation, des modifications du comportement de l'usager, un mauvais réglage des systèmes peuvent entraîner des écarts importants de consommation énergétique ou de confort. Les réglages techniques peuvent assez facilement être résolus mais le comportement de l'usager reste lui aléatoire.

Les bâtiments dits B.B.C. répondent en majeure partie à la problématique du confort d'hiver. En effet, la consommation énergétique dans des bâtiments non performants est majoritairement impactée par les consommations de chauffage. Aujourd'hui les solutions pour réduire cette consommation existent et ont largement été développées dans les pays nordiques. *(MAUGARD, 2014)* dans son rapport sur les retours d'expériences des bâtiments performants souligne les difficultés rencontrées face au confort d'été et de demi-saison. Outre les problèmes dus à la présence d'humidité ou le manque de locaux techniques, c'est surtout la problématique du niveau d'étanchéité à l'air qui semble plus importante. 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 est emprisonné à l'intérieur des logements. Si le bâtiment n'est pas mis en cause cela peut également être l'occupant qui par son comportement dérègle les dispositifs mis en place.

Cependant, lors de mesures in situ, on s'aperçoit que bien souvent, les consommations mesurées sont supérieures à celles prévues d'un facteur moyen 2,5 et pouvant aller jusqu'à 8. *(THELLIER, MONCHOUX, et BEDRUNE, 2012)*. Cette différence peut être expliquée par plusieurs éléments : la qualité constructive du bâtiment mais aussi les différents modes d' « habiter » des populations.

I.2.2. La réhabilitation, un enjeu majeur

Les réglementations thermiques successives ont permis de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments neufs. Mais aujourd'hui, le taux de renouvellement du parc existant est seulement de 1 % par an. De plus, (MAUGARD, 2013) montre que 66 % du parc français résidentiel (33,4 millions de logements au total en 2012 (ADEME, 2013)) a été construit avant 1974, date de la première réglementation thermique. Les bâtiments anciens, en fonction de leurs architectures et leurs caractéristiques constructives doivent être divisés en deux catégories. En effet, les architectes et les constructeurs ont de tous temps pris en compte l'environnement direct pour construire les bâtiments. Mais suite à la deuxième guerre mondiale, la nécessité d'une reconstruction rapide et en nombre couplée avec l'industrialisation des matériaux constructifs et la mécanisation des systèmes a radicalement modifié les typologies constructives. Les architectures se sont alors coupées de leurs climats et de leurs environnements. À cause de ces caractéristiques différentes, les bâtiments construits avant 1948, année choisie pour marquer cette rupture, ont, en moyenne, des consommations énergétiques plus faibles. L'effort de rénovation doit donc être porté sur les bâtiments existants postérieurs à 1948. De plus, avant cette date, la plupart des constructions ont été réalisées avec des techniques et des matériaux particuliers. Les solutions conçues pour les bâtiments construits après 1948 ne sont pas toutes adaptées à ce patrimoine ancien aux architectures particulières. Le parc qui doit donc être réhabilité ou rénové[2] s'étend donc de 1948 à 2000, année où les consommations énergétiques des bâtiments ont commencé à être réglementées.

I.2.2.1. La réglementation dans l'existant

Il faudra attendre 2007 pour voir apparaître la première réglementation thermique applicable aux bâtiments existants. Basée sur la RT 2005, elle a aujourd'hui très peu évoluée. Elle se divise en deux catégories : la RT dite « élément par élément » et la RT dite « globale » (C.S.T.B., 2015). L'une ou l'autre des réglementations doivent être appliquées en fonction de la superficie à réhabiliter, du coût des travaux ou de la date de création du bâtiment étudié.

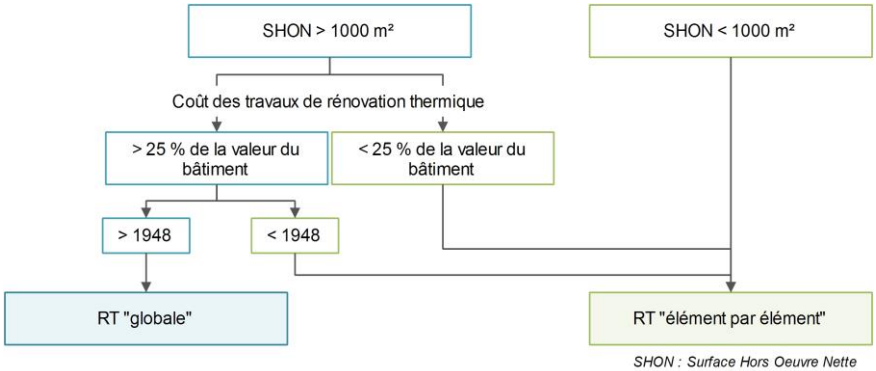


FIGURE 1.2 : *Conditions de la réglementation thermique dans l'existant*
de l'auteur

[2] D'après les définitions suivantes, nous préfèrerons utiliser le terme de réhabilitation pour parler des travaux réalisés dans des bâtiments existants. (MAUGARD, 2013)
« *Rénovation : remise à neuf, restitution d'un aspect neuf. Travail consistant à remettre dans un état analogue à l'état d'origine un bâtiment ou un ouvrage dégradé par le temps, les intempéries, l'usure, etc.* »
« *Réhabilitation : travaux d'amélioration générale, ou de mise en conformité d'un logement ou d'un bâtiment avec les normes en vigueur.* »

– La RT « élément par élément »

Elle définit les exigences à atteindre lorsqu'un maître d'ouvrage entreprend des travaux de rénovation concernant :

- *Les parois opaques*
- *Les parois vitrées*
- *Le chauffage*
- *Le refroidissement*
- *La ventilation*
- *L'éclairage des locaux*
- *Les énergies renouvelables*

Pour chaque dispositif, l'arrêté du 3 mai 2007 *(J.O.R.F., 2007a)* définit en détail les critères de performance à atteindre pour l'élément en question. Grâce à cette réglementation, les pouvoirs publics espèrent, en optimisant suffisamment les points précédents, pouvoir améliorer la performance énergétique globale des bâtiments existants.

– La RT « globale »

Les exigences à respecter sont très proches de ceux de la RT 2005. Faire une rénovation en prenant en compte la RT dite « globale » demande la réalisation d'un diagnostic de performance énergétique permettant d'établir l'étiquette énergétique (de A à G) du bâtiment. Après travaux, la consommation des bâtiments à usage de logements pour les cinq usages réglementaires doit être située entre 80 et 195 $kWh_{ep}/(m^2.an)$ selon la nature du bâti, la situation géographique... L'exigence du confort d'été doit également être étudiée afin d'éviter les surchauffes et l'utilisation de climatiseurs.

I.2.2.2. Réhabilitation et aides à la décision

La comparaison entre les exigences réglementaires pour les bâtiments neufs et les bâtiments existants pose une vraie question. En effet, pour atteindre les objectifs du facteur 4 l'effort de réduction des consommations énergétiques est également nécessaire pour les bâtiments existants. Or nous voyons bien, qu'aujourd'hui, la réglementation est beaucoup moins exigeante avec ce type de bâtiments. De plus, les rénovations/réhabilitations sont réalisées pour les vingt ou trente années à venir. Les investissements faits aujourd'hui doivent donc être suffisants pour produire des bâtiments performants dont la durabilité ne sera pas remise en cause quelques années plus tard.

La réglementation thermique dite « élément par élément » n'impose pas de réflexion globale sur le bâtiment. Des améliorations sur un poste peuvent alors conduire à des dégradations sur un autre. L'exemple fréquent est la pose d'une isolation thermique qui augmente l'étanchéité à l'air du bâtiment. Si aucune réflexion sur la ventilation n'est menée, cela peut conduire à des dégradations : humidité, qualité de l'air dégradée, surchauffes… Cependant, dans de nombreux cas, pour lutter contre la précarité énergétique des ménages, la première solution envisagée est l'isolation par l'extérieur ; solution d'ailleurs souvent plébiscitée par les locataires (cf. résultat de l'enquête au *chapitre 2-II.2.5*). Mais sans réflexion globale, des surchauffes estivales ou une humidité importante si la ventilation n'est pas maîtrisée, peuvent apparaître.

Si, aujourd'hui, de nombreux architectes réfléchissent à des rénovations énergétiques qui allient confort thermique et confort d'usage, il existe également une multitude de guides définissant les solutions bioclimatiques permettant de réaliser des bâtiments performants *(OLIVA et*

COURGEY, 2006 ; ROULET, 2008 ; ARENE, 2008 ; FERNANDEZ et LAVIGNE, 2009 ; LÉVY, 2010). Rappelant les principes fondamentaux de l'isolation thermique, de l'inertie thermique, de la ventilation, de la prise en compte des apports solaires, ils permettent également de mettre en lumière les solutions de chauffage ou de refroidissement passifs (puits canadiens, sur-ventilation nocturne, tirage thermique, etc.).

Afin de proposer des rénovations permettant d'atteindre le facteur 4, Olivier SIDLER dans son rapport *(SIDLER, 2007)* met en place la « Solution Technique Universelle » qui est un ensemble de solutions-types permettant d'atteindre les exigences réglementaires voire de réaliser des bâtiments plus performants que la réglementation en vigueur. Le projet « FA SI LA Réno » développé dans le cadre du projet européen MED-MARIE propose des bouquets de travaux standardisés pour le climat méditerranéen en permettant de faciliter les travaux de rénovation en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Au niveau universitaire, plusieurs recherches tentent de définir des méthodes afin d'optimiser les choix architecturaux permettant de concevoir des bâtiments performants tout en essayant de limiter le nombre de simulations de thermique dynamique. Pour cela, *(FLORY-CELINI, 2008)* étudie, par la mise en place de plans d'expérience, les facteurs (différents éléments du bâtiment) qui influencent les réponses (les besoins énergétiques pour l'hiver et le confort adaptatif pour l'été) face à différentes solutions bioclimatiques afin de réaliser « *un organigramme décisionnel énergétique* ». Il s'agit alors de choisir les solutions les plus influentes du point de vue de l'énergie et de celui du confort. *(CHANTRELLE et al., 2011)* et *(RIVALLAIN, 2013)* par le même type d'approche, proposent une optimisation multicritères permettant de définir le programme de rénovation le plus efficace en termes de bilan énergétique, de confort thermique en été, d'investissement et d'analyse du cycle de vie. Face à la complexité du choix du programme de rénovation, *(TAILLANDIER et al., 2013)* ont imaginé un outil d'aide à la décision basé sur un système expert permettant de définir les rénovations à entreprendre. Pour cela, il couple un moteur de thermique et un moteur de tâche reposant sur les connaissances d'un expert en thermique du bâtiment.

Les choix de rénovation génèrent des modifications de l'ambiance thermique intérieure auxquelles l'individu doit s'adapter. La majorité des solutions présentées se basent sur un comportement optimal des occupants. Elles ne prennent donc pas en compte leur diversité et dans le cas des rénovations, étudier les pratiques et le ressenti thermique (mais aussi acoustique, visuel, lumineux...) des occupants peut servir de base pour proposer les solutions les plus adaptées afin de limiter les consommations énergétiques mais aussi les périodes d'inconfort.

II. Le confort thermique dans le bâtiment

Aujourd'hui, 50 % de la population mondiale vit dans des villes et passe près de 90 % de son temps à l'intérieur *(THELLIER, MONCHOUX, et BEDRUNE, 2012)*. Les bâtiments deviennent de vraies machines thermiques dont l'objectif est le maintien des conditions climatiques favorables à l'être humain. L'individu réagit en permanence à cet environnement de manière consciente et inconsciente. C'est grâce à la définition des mécanismes physiologiques, physiques et psychologiques que l'on peut approcher une définition du confort thermique.

II.1. Limitation dans l'analyse du confort

Le confort participe à la définition du bien-être. *« Le confort est lié aux sentiments, à la perception, à l'humeur et à la situation. Sa définition fait à la fois appel à une approche négative (absence d'inconfort, qui se caractérise par exemple par l'absence de douleur, d'anxiété,...) et à une approche positive (bien-être, satisfaction). »* (MOSER, 2009). Cette définition du confort permet de comprendre la complexité de la mesure du confort puisqu'un nombre élevé de paramètres physiques, psychologiques, physiologiques, culturels et personnels influence plus ou moins les différents conforts définis par (MOSER, 2009) :

- confort sensoriel : fait référence à la qualité de l'environnement (la lumière, la vue, l'air, la qualité tactile des matériaux…)
- confort existentiel : est relatif à la qualité environnementale du cadre de vie ayant des répercussions sur le plan psychique (par rapport à son identité ou son épanouissement)
- confort matériel : correspond à la satisfaction des besoins primaires et matériels
- confort esthétique : subjectif, il dépend des perceptions individuelles
- confort social : équilibre entre le besoin d'être avec les autres et le besoin d'intimité
- confort de conformité : appartenance à un groupe social

La notion de confort est alors difficile à définir. Elle est sujette à de nombreuses recherches dans de multiples disciplines : physique, psychologie, architecture, biologie… Dans notre étude, nous chercherons à comprendre la notion de confort dans le bâtiment et plus particulièrement le confort sensoriel qui peut être décliné en confort visuel, confort acoustique, confort thermique ou hygrothermique, confort olfactif, etc. Pour chacune des déclinaisons de ce dernier, (ROULET, 2008) détaille dans son ouvrage les conditions pour un confort optimal.

Peu de recherches ont été faites sur les interactions entre les différents conforts. En effet, dans une situation qui réunit tous les critères de confort sauf un, l'individu est-il vraiment dans une situation d'inconfort total ? Certains « conforts » ont-ils plus d'influence sur l'état de satisfaction globale ? (OSELAND, 1995) a montré que le même sujet soumis à des conditions climatiques identiques mais dans des lieux différents (chez lui, à son bureau ou dans une chambre climatique) ne ressentait pas la même sensation thermique. À son domicile, la sensation ressentie était plus chaude qu'à son lieu de travail ou dans une chambre climatique. Sur le même principe que l'effet placebo en médecine, (ROHLES, 2007), de son côté, explique que la psychologie a un effet sur les sensations. En effet, suivant ce qui est dit en termes de température ou d'activation ou non du chauffage l'individu peut ressentir des ambiances plus ou moins froides (ou chaudes). Ainsi face à un environnement évocateur (une pièce avec des couleurs chaudes, un feu de cheminée, le bruit de l'eau, etc.) les sensations peuvent être complètement modifiées. (FRONTCZAK *et* WARGOCKI, 2011) ont tenté d'identifier quelle était la sensation dominante dans la définition du confort en général. Ils ont trouvé que la mise en place d'un environnement thermique confortable était souvent considérée comme l'élément le plus important pour définir une satisfaction globale de l'environnement. Même si dans de nombreuses études du confort et des performances énergétiques des bâtiments le confort thermique et le confort visuel sont couplés (VORGER, 2014 ; BONTE, 2014), nous nous concentrerons sur le confort thermique.

II.2. Le confort, une habitude culturelle

Les phénomènes physiques pour estimer une situation de confort sont aujourd'hui bien connus. Cependant, notre histoire personnelle, la culture ou notre environnement induisent des attentes différenciées. En Amérique du Nord, les locaux sont chauffés à 22 °C *(MARESCA, DUJIN, et PICARD, 2009)*, alors qu'en France ils le sont à 21 °C et les pouvoirs publics nous incitent à réduire à 19 °C *(POQUET et DUJIN, 2008)*. Ainsi aujourd'hui, si les attentes en termes de confort sont différentes d'un pays à l'autre, c'est principalement à cause de notre passé culturel.

II.2.1. Vivre avec le climat : architecture vernaculaire

De tout temps, l'Homme a cherché à s'abriter du climat extérieur qui peut lui être hostile en construisant des abris. Puis les évolutions de ses attentes en termes de confort lui ont permis de modifier ces abris pour qu'ils soient éclairés, chauffés, décorés… Mais dans un premier temps, il a rationnalisé les éléments de son environnement direct. Les concepteurs, ont réalisé des bâtiments avec des matériaux locaux prenant en compte les apports gratuits et se protégeant des éléments défavorables.

L'étude de l'architecture vernaculaire montre que les concepteurs de ces bâtiments connaissaient le climat et les solutions pour s'en protéger. Ainsi dans les régions où les vents du Nord peuvent être violents et froids en hiver, les fenêtres des façades Nord sont petites. Au contraire, au Sud, elles sont plutôt grandes pour capter les apports solaires gratuits. De même les murs ont des épaisseurs beaucoup plus importantes ce qui permet, grâce à l'inertie thermique, de maintenir la fraîcheur dans les habitats en été. De plus, les occupants avaient un comportement adapté : ils vivaient avec leur environnement et pratiquaient une migration saisonnière à l'intérieur de leurs logements afin de se protéger de la chaleur en été ou du froid en hiver. Ainsi en été ils préféraient une terrasse ombragée plutôt située au Nord alors qu'en hiver, ils utilisaient les espaces situés au Sud. L'occupant est « actif » au sein de son logement. Tout au long de la journée, en fonction des saisons et du climat, il agit sur ses protections solaires, ses fenêtres… L'occupant est acteur de son environnement thermique et vit avec son climat comme le dis *(HESCHONG, 1981)*, « *depuis les temps anciens, le maintien de la chaleur ou de la fraîcheur fait partie de la quotidienneté des activités humaines et participe d'un plan culturel presque inconscient* ».

C'est sur ces principes que s'est développée, dans les années 1970, l'architecture solaire ou bioclimatique. Loin d'avoir une attitude passéiste, les architectes de cette époque ont modernisé les techniques existantes, grâce aux progrès de l'industrie, pour proposer des architectures confortables avec de faibles consommations d'énergies.

II.2.2. Homogénéisation des ambiances intérieures

Dans les premiers abris, principalement constitués d'une seule pièce à vivre qui servait de lieu de rassemblement pour toute la famille, c'est le feu, au centre de la maison, qui servait à réchauffer l'ambiance thermique, à éclairer, à cuisiner ou à fabriquer des outils. Avec le développement de l'électricité, les habitudes ont changé et les attentes en termes de confort ont évolué. En 1986, la température moyenne des logements était de 19 °C, elle est passée à 21 °C en 2003 *(POQUET et DUJIN, 2008)*. Or *(SIDLER, 2011)* a montré qu'une augmentation de 1 °C pouvait conduire à une augmentation de la consommation énergétique de 7 à 20 % en fonction de la performance des bâtiments étudiés.

Les réglementations thermiques successives ainsi que le développement de l'industrie ont conduit les concepteurs à produire des bâtiments où le chauffage, la climatisation, la ventilation... sont maitrisés par des systèmes techniques de plus en plus complexes. Ces systèmes, consommateurs d'énergie permettent d'accéder au confort mais ce-dernier est alors standardisé et coupé de son environnement thermique extérieur. « *La fascination de cette puissance [l'électricité] de maîtrise de notre environnement a permis l'invention de systèmes mécaniques qui ont éclipsé les stratégies thermiques naturelles, les posant comme obsolètes par comparaison.* » *(HESCHONG, 1981)*. Plus besoin de construire des bâtiments tenant compte des contraintes/atouts environnementaux (soleil, vent, humidité) puisque la technique peut suppléer les manquements.

Le confort permet de rentrer dans une norme sociale et un certain niveau de confort devient presque obligatoire pour prétendre à une certaine distinction sociale. « *Sous l'influence des théories hygiénistes, les conditions physiques et physiologiques qui définissent le confort sont identifiées, et appellent des comportements de plus en plus normés pour les atteindre. Cette naturalisation des conditions du confort a rapidement contribué à la définition d'un espace de consommation spécifique, entre ce qui relève de la satisfaction des besoins nécessaires et ce qui relève du luxe superflu. Le logement a été un lieu de prédilection d'investissement de cette consommation spécifique.* ». *(MARESCA, DUJIN, et PICARD, 2009)*. Le confort thermique devient un bien marchand, pouvant être défini comme luxueux en fonction du niveau atteint, et dans notre société de consommation, les campagnes d'incitation aux économies d'énergie sont en opposition avec l'idée même du confort car dans l'imaginaire collectif, « économie d'énergie » renvoie obligatoirement à une perte de confort.

II.2.3. « Chauffer le corps »

Mais la recherche d'un confort homogène semble être une caractéristique spécifique aux sociétés occidentales. *(SUBRÉMON, 2009)* cite une étude de comparaison des pratiques liées au chauffage entre le Japon et la Norvège et dit : « *Entre le Japon et la Norvège, Wilhite, Nakagami et al. (1996) ont observé les pratiques liées au chauffage et l'éclairage de la maison. Alors que les familles japonaises privilégient de préserver la chaleur du corps grâce au kotatsu et au thé, les familles norvégiennes qui ont une conception plus individualiste du partage de l'espace domestique, chauffent l'air de toutes les pièces de la maison. Une maison accueillante et où il fait bon vivre est une maison bien isolée, bien chauffée, dans laquelle il est possible de circuler sans trop de vêtement sur soi. Corrélativement, l'éclairage dépend de l'occupation simultanée des différents espaces de la maison.* »

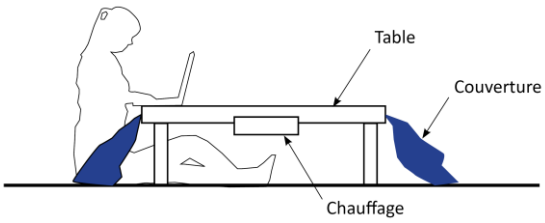


FIGURE 1.3 : *Principe de fonctionnement d'un kotatsu*
de l'auteur

Les japonais ont une culture de l' « habiter » et surtout du chauffage différente de celle des sociétés occidentales. En effet, comme le dit *(NUSSAUME, 2013)* : « *Traditionnellement dans les maisons nippones, plutôt que de chercher à atteindre une température homogène pour l'ensemble des espaces, on chauffe ou ventile des espaces réduits, voire les corps, pour des périodes provisoires.* ». Le chauffage central étant peu répandu au Japon, ils utilisent des chauffages locaux. Il est alors assuré par divers

objets notamment des tables chauffantes, les « kotatsu » (*Figure 1.3*). Il s'agit de table en bois dont le dessous est chauffé. Elle est entourée d'une épaisse couverture sous laquelle les convives s'assoient pour se protéger du froid. Cela devient le lieu de vie et de discussion de la maison.

Face au développement de maisons hermétiques sur le modèle occidental, de multiples questions se posent sur la culture de l' « habiter japonais ». « *Actuellement, on observe cependant des changements. Se pose la question de savoir qu'est-ce que le confort? Veut-on une maison dont toutes les pièces sont bien chauffées en hiver et climatisées en été, ou au contraire une habitation où l'on peut ressentir les changements climatiques? Autrement dit, faut-il se préserver des contrastes météorologiques ou les accepter et vivre avec ?* » *(NUSSAUME, 2013)*

Contrairement à la France, au Japon, le secteur qui consomme le plus est le secteur industriel. Pour les ménages le poste le plus important des dépenses est l'électricité spécifique, alors qu'en France il s'agit du chauffage *(NUSSAUME, 2013)*. Pour limiter ses consommations énergétiques et ses émissions de gaz à effet de serre, le Japon n'a pas instauré comme en France de réglementation drastique sur les constructions. En revanche, durant l'été 2005, la démarche « coolbiz » a été instaurée. Afin de régler la température consigne des climatiseurs à 28 °C au lieu de 26 °C, les autorités ont incité les employés de bureaux à ne porter ni cravate ni veste, à modifier leurs horaires de travail, à éteindre les ordinateurs non-utilisés ou à prendre davantage de vacances en été. La démarche est renouvelée tous les ans entre le 1er juin et le 30 septembre. En 2006, les économies ont été estimées à 1,14 millions de tonnes de CO_2. *(SCOTT, 2012)*. De même pour l'hiver la démarche « warmbiz » incite les habitants à s'habiller plus chaudement pour limiter l'utilisation du chauffage et éviter les pannes généralisées de courant.

II.3. La machine thermique de l'être humain : première et deuxième peau

« Thermal Comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment »[3] *(ASHRAE, 2009)*. Le confort thermique contribue au bien-être et au confort en général et se définit selon plusieurs aspects : psychologique, physiologique et physique. D'après FANGER *(ASHRAE, 2009)*, pour qu'une personne se sente confortable, les trois conditions suivantes doivent être réunies :

- Le corps doit maintenir une température interne stable (thermorégulation)
- La production de sueur ne doit pas être trop abondante et la température moyenne de la peau doit être confortable.
- Aucune partie du corps ne doit être trop chaude ou trop froide. (inconfort local)

Les deux premiers points sont abordés dans la suite de ce paragraphe et la norme NF ISO 7730 *(AFNOR, 2006)* permet de déterminer analytiquement les inconforts locaux suivants:

- la gêne due aux courants d'air (DR, « draught rate »),
- la différence verticale de température de l'air (gradient de température) (PD, « pourcentage dissatisfied ») (ex : différence de température entre la tête et les pieds)
- la présence de sols froids ou chauds
- une asymétrie de température de rayonnement (ex : les parois froides ou chaudes)

[3] Le confort thermique est l'état d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique.

II.3.1. Aspect physiologique : la thermorégulation

L'homme est homéotherme, quelles que soient les conditions climatiques, sa température interne doit toujours approcher les 37,7 °C (± 0,5 °C) pour protéger ses organes et maintenir la vie *(CANDAS, 1998)*. La première barrière de défense est la peau, l'épiderme, dont la température est en moyenne de 34°C. Elle permet les échanges avec l'environnement thermique direct grâce à la thermorégulation. Elle admet des variations importantes de température et permet ainsi de maintenir le centre du corps à une température constante. La thermorégulation est l'ensemble des mécanismes conscients et inconscients permettant de réguler la température du corps humain. Les mécanismes inconscients sont ceux soumis aux lois de la thermodynamique et de la biologie. C'est la thermorégulation physiologique. Elle s'oppose à la thermorégulation comportementale qui correspond aux mécanismes conscients : l'être humain interagit avec son environnement et modifie son comportement pour minimiser l'entrée en action des phénomènes physiologiques.

II.3.1.1. Thermorégulation végétative

Le corps humain est sujet aux échanges de chaleur avec son environnement. Lorsqu'un déséquilibre apparaît, une régulation inconsciente est instaurée : la thermorégulation végétative.

La température interne est affectée par le métabolisme, la vie cellulaire, qui produit de la chaleur qui doit être évacuée. La température cutanée peut varier de 10 °C en fonction de l'environnement (climat, vêtement…). Face à ces écarts de température, des transferts de chaleur ont lieu à l'intérieur du corps pour rétablir l'équilibre thermique. La thermorégulation végétative permet les échanges de chaleur entre les différents milieux. Pour réguler la température interne du corps, ce dernier dispose de millions de capteurs, les thermorécepteurs, des terminaisons nerveuses libres, situés à la surface de la peau et au centre du corps *(CANDAS, 1998)*. Sensibles à la température, ils envoient des signaux dans le centre hypothalamique, au niveau du cerveau, via la moelle épinière. L'information est alors comparée avec une valeur de référence et intégrée au système. En fonction des écarts constatés, différentes actions vont être mises en place afin de maintenir la stabilité thermique. À l'intérieur du corps, les échanges de chaleur se font par convection grâce à la circulation sanguine et par conduction entre les cellules.

- Si la température est trop élevée : il faut rafraîchir le corps.

Pour cela, l'hypothalamus ordonne aux vaisseaux d'augmenter leur diamètre, c'est la vasodilatation. Le débit sanguin est augmenté ainsi que les échanges de chaleur entre le centre du corps et la périphérie. De plus, il peut ordonner aux glandes sudorales de produire de la transpiration. Sous forme d'eau, elle va permettre un rafraîchissement du corps grâce à son évaporation. *(MOUJALLED, 2007)*

- Si la température est trop faible : il faut réchauffer le corps.

Pour augmenter la production de chaleur, le centre hypothalamique ordonne, à l'inverse, la vasoconstriction des vaisseaux (diminution de leur diamètre) afin de diminuer le flux sanguin et les échanges de chaleur interne du centre vers la périphérie. Il peut également ordonner des contractions musculaires, les frissons, qui vont augmenter la production de chaleur par les muscles. *(MOUJALLED, 2007)*

Les réactions de thermorégulation végétative sont limitées dans leur efficacité et dans leur durée. La conservation d'une température interne proche de 37°C peut donc se faire au détriment des organes périphériques (mains, pieds..). Lorsque le corps ne peut plus réguler sa température de manière physiologique, l'individu court le risque d'une hypo- ou hyperthermie s'il ne réagit pas de manière comportementale *(CANDAS, 1998)*.

II.3.1.2. Thermorégulation comportementale

Pour limiter les réactions physiologiques, donc l'inconfort, l'individu, contrairement à certains animaux, est capable d'anticiper les conditions climatiques auxquelles il va être soumis. Il peut alors anticiper son inconfort pour rétablir une situation de confort. Pour cela, le changement de ses vêtements lui permet d'adapter leur résistance thermique aux conditions climatiques, la modification de son niveau d'activité augmente ou diminue son métabolisme et donc produit plus ou moins de chaleur et le changement de posture réduit les échanges de chaleur avec son environnement. C'est la thermorégulation comportementale individuelle. L'individu est alors responsable de son état de confort ou d'inconfort. Cependant, il peut être aidé par la technique pour obtenir les conditions de confort préférées. Pour cela il pourra changer la consigne de température du local où il se trouve, ouvrir ou fermer une fenêtre pour augmenter ou diminuer la ventilation de la pièce, etc.

Enfin, la thermorégulation comportementale peut être d'origine culturelle. En effet, dans les pays du Sud, pour lutter contre les effets de la chaleur, les horaires de travail sont adaptés aux conditions climatiques afin que les employés soient plus efficaces et que les dépenses énergétiques du corps soient limitées. Pour cela, ils réduisent également leur activité métabolique dans la mesure où ils font des siestes. L'adaptation du code vestimentaire dans les bureaux permet également de lutter contre le froid ou le chaud sans forcément dépenser plus pour la régulation thermique (par le chauffage et/ou la climatisation).

II.3.2. **Aspect psychologique : Sensation de confort**

Une fois que l'information en provenance des thermorécepteurs est transmise au cerveau, celui-ci transforme le signal en une sensation que perçoit l'individu. Ce dernier, est alors capable de différencier son état thermique de l'ambiance climatique dans laquelle il se trouve. En effet, lors d'une activité sportive, l'homme est capable de dire qu'il a chaud mais que l'environnement thermique est froid. C'est possible grâce à la différenciation de la température interne et de la température périphérique. De plus, la sensation thermique est dépendante du passé immédiat et de l'état thermique dans lequel on se trouve. En effet, si nous avons chaud, une légère brise sera agréable et pourra nous procurer une sensation de confort alors qu'au contraire, lorsque nous avons froid, elle nous procurera une sensation désagréable *(MOSER, 2009)*.

Avoir chaud ou avoir froid ? Le confort thermique pourrait être défini par le fait de n'avoir ni chaud ni froid. C'est-à-dire d'avoir un bilan thermique proche de zéro ce qui limite les réactions physiologiques. Cependant, une situation de confort est-elle garantie dans ces conditions ? En ayant un peu plus chaud en hiver ou un peu plus frais en été ne serions-nous pas dans une situation plus confortable ?

Ainsi pour définir une sensation de confort il convient de se poser plusieurs questions relatives à la sensation, à l'agrément et à la préférence *(CANDAS, 1998)*.

- Est-ce que j'ai chaud ou froid ?
- Est-ce que je trouve ça agréable ou non ?
- Est-ce que je souhaite changer de climat (avoir plus chaud ou plus froid) ?

C'est peut-être la dernière question qui renseigne le mieux sur l'état de confort ou d'inconfort car si l'individu souhaite changer de climat c'est surement qu'il ressent un inconfort. Au contraire s'il souhaite le garder c'est qu'il se trouve dans une situation qu'il apprécie. Au final, s'il déclare avoir un peu chaud, c'est que pour lui la situation de confort n'est pas avoir « ni chaud-ni froid » mais plutôt avoir « un peu chaud ».

Il existe aujourd'hui différentes échelles pour caractériser le confort. Les plus utilisées sont l'échelle de Bedford et l'échelle d'ASHRAE (*Tableau 1.1*). Les deux ont un système de notation différent. Ainsi la première mélange la notion de confort et la notion de température, c'est-à-dire qu'il est demandé, à la fois, la sensation et l'agrément. Cette échelle de notation définit le milieu par le chiffre 4 ce qui peut perturber l'individu lors de l'expression de sa sensation dans la mesure où cela ne correspond pas à un à équilibre thermique. La seconde échelle définie par la norme ISO 7730 *(AFNOR, 2006)* ne prend en compte que la sensation thermique et détermine la sensation moyenne par 0.

ECHELLE de BEDFORD	ECHELLE d'ASHRAE :
1 = Beaucoup trop frais	- 3 = Très froid
2 = Trop frais	- 2 = Froid
3 = Confortablement frais	- 1 = Légèrement froid
4 = Confortable ni chaud ni frais	0 = Ni chaud, ni froid
5 = Confortablement chaud	+ 1 = Légèrement chaud
6 = Trop chaud	+ 2 = Chaud
7 = Beaucoup trop chaud	+ 3 = Très chaud

TABLEAU 1.1 : ***Échelles de caractérisation du confort***
de l'auteur

II.3.3. Aspect physique : Équilibre thermique

Les transformations moléculaires et énergétiques qui se déroulent au sein des cellules de l'organisme, le métabolisme, produisent de la chaleur qui est échangée avec l'environnement de l'individu sous différentes formes. Avec la thermorégulation, les échanges se font à l'intérieur du corps. Pour que les échanges se fassent avec l'environnement direct de l'individu, plusieurs phénomènes physiques entrent en jeu : au niveau de la peau, les échanges peuvent se faire par rayonnement (R), convection (C), conduction (K) et évaporation (E_{SK}). Lors de la respiration, les échanges s'effectuent par convection (C_{RES}) et évaporation (E_{RES}).

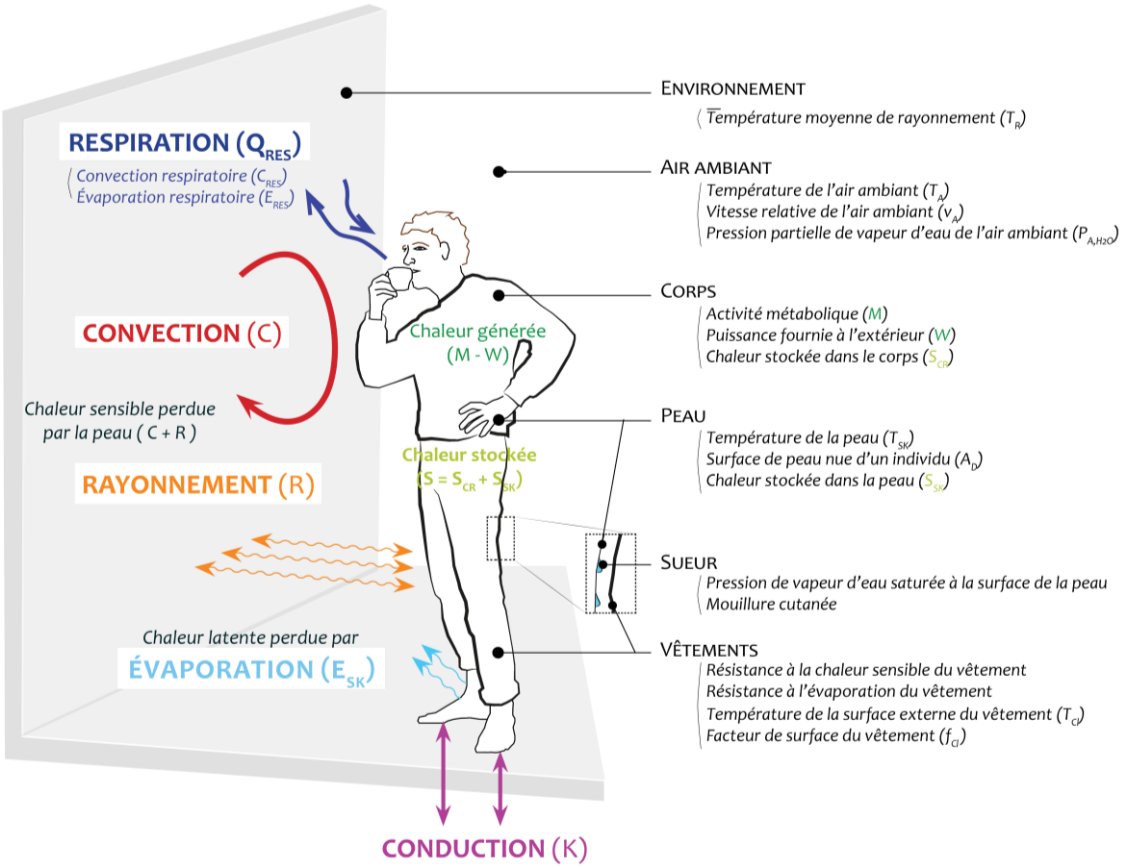


FIGURE 1.4 : *Interactions thermiques entre l'homme et son environnement*
de l'auteur

II.3.3.1. Échanges à la surface de la peau

L'être humain, en contact permanent avec son environnement, échange de la chaleur avec celui-ci. C'est notre enveloppe, la peau, qui sert d'interface pour les différents échanges thermiques. C'est notre première barrière de défense. La surface de la peau nue d'un individu (A_D), peut être calculée selon l'équation suivante de DuBois and DuBois. Ainsi on considère que la surface de la peau d'un individu qui pèse 70 kg et mesure 1,70 m est égale à 1,8 m².

$$A_D = 0{,}2025\, m^{0{,}425}\, h^{0{,}725} \qquad \text{[Éq. 1.5]}$$

- A_D : *Surface de peau nue d'un individu, m²*
- m : *Masse de l'individu, kg*
- h : *Hauteur de l'individu, m*

Les vêtements, notre deuxième peau, permettent une protection contre le climat mais garantissent aussi la pudeur des individus. C'est une couche supplémentaire qui les isole de l'environnement climatique en créant un microclimat entre la peau et les vêtements. Pour calculer les échanges thermiques entre l'individu et l'environnement, il faut alors introduire un facteur correctif adimensionnel (f_{Cl}) qui définit l'augmentation de la surface d'échange des individus vêtus par rapport ceux qui sont dévêtus. Il a été déterminé de manière approximative par des mesures en laboratoires (AFNOR, 2006). La tenue vestimentaire est caractérisée par l'isolation du vêtement (I_{Cl}) qui prend également en compte les parties non couvertes. Issu de mesures sur un mannequin thermique, cet indice peut être exprimé en K.m²/W ou en « clo » (*Tableau 1.2*). Le « clo »

correspond à la résistance thermique nécessaire au maintien de l'équilibre thermique de l'homme sédentaire à 21 °C en air calme et vaut 0,155 K.m²/W *(CANDAS, 1998)*.

$$f_{Cl} = 1{,}00 + 1{,}290\ I_{Cl} \quad pour\ I_{Cl} \leq 0{,}078\ m^2.\frac{K}{W}$$
$$f_{Cl} = 1{,}05 + 0{,}645\ I_{Cl} \quad pour\ I_{Cl} > 0{,}078\ m^2.\frac{K}{W} \qquad \text{[Éq. 1.6]}$$

- f_{Cl} : *Facteur de surface du vêtement*
- I_{Cl} : *Isolation thermique du vêtement, K.m²/W ou clo*

Les échanges sont complexes car le vêtement, en fonction de sa forme ou du tissu, peut créer différents effets qu'il est difficile de caractériser. Tout d'abord, les échanges entre l'individu et le vêtement se font par conduction, par diffusion de la vapeur d'eau émise par le corps et par migration pour la sueur *(MOUJALLED, 2007)*. Les vêtements se caractérisent donc par une résistance thermique et une résistance à l'évaporation. Toutefois, les vêtements peuvent absorber l'humidité ou l'eau produisant alors un effet tampon. Les mouvements de l'individu ainsi que la pénétration de l'air à travers les tissus jouent également un rôle dans l'isolation vestimentaire.

I_{cl} (clo)	Description des tenues vestimentaires (comprenant les chaussures, les chaussettes ou les bas)
0,30	Slip, T-shirt, shorts, chaussettes fines, sandales
0,50	Caleçon, chemise à manches courtes, pantalon léger, chaussettes fines, chaussures
0,70	Slip, jupon, bas, robe, chaussures
0,70	Sous-vêtements, chemise, pantalon, chaussettes, chaussures
1,00	Slip, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures
1,10	Slip, bas, corsage, jupe longue, veste, chaussures
1,30	Sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise, pantalon, tricot col en V, veste, chaussettes, chaussures
1,50	Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, gilet, verste, manteau, chaussettes, chaussures

TABLEAU 1.2 : *Valeur de l'isolation vestimentaire et du facteur caractérisant l'habillement pour différentes tenues*
(AFNOR, 2006)

Les échanges de chaleur à la surface de la peau ou des vêtements (Q_{SK}) sont composés d'échanges de chaleur par convection (C), par rayonnement (R), par conduction (K) et par évaporation de la sueur (E_{SK}) suivant l'équation suivante : *(ASHRAE, 2009)*.

$$Q_{SK} = C + R + K + E_{SK} \qquad \text{[Éq. 1.7]}$$

- Q_{SK} : *Flux de chaleur échangé à la surface de la peau, W/m²*
- C : *Échanges de chaleur par convection, W/m²*
- R : *Échanges de chaleur par rayonnement, W/m²*
- K : *Échanges de chaleur par conduction, W/m²*
- E_{SK} : *Échanges de chaleur par évaporation de la sueur, W/m²*

– Échanges de chaleur par convection (C en W/m²)

La convection est un échange de chaleur entre un fluide, l'air, et un solide, l'individu. Cet échange est accentué ou diminué suivant la vitesse de l'air et les courants d'air. Si le fluide est froid, l'être humain a tendance à se refroidir et au contraire si le fluide est chaud, il se réchauffe. Les échanges de chaleur sont alors dus à la différence de température entre la surface de contact (la surface cutanée ou vestimentaire) et l'air ambiant.

– Échanges de chaleur par rayonnement (R en W/m²)

Il existe deux rayonnements qui peuvent être pris en compte lors des échanges de chaleur entre l'homme et son environnement : le rayonnement infrarouge provenant des parois et des objets et le rayonnement solaire qui nous réchauffe *(ENDRAVADAN, 2006)*. La température de rayonnement correspond à la température des surfaces qui entourent l'individu et avec lesquelles il échange de la chaleur.

Les échanges de chaleur par rayonnement sont à l'origine de la sensation de paroi froide ou chaude. En effet, lorsqu'un individu se situe près d'une paroi qui possède une température faible, il ressent une sensation de froid. Il s'établit alors entre la paroi et l'individu des échanges thermiques par radiation. Or, comme il y a une différence de température entre les deux corps, le système cherche à rentrer en équilibre. Pour cela, l'être humain échange des calories par rayonnement avec la paroi et il ressent donc une sensation de froid si la paroi est froide. Le même système existe pour les parois chaudes et la sensation thermique est alors inversée.

– Échanges de chaleur par conduction (K en W/m²)

Les échanges par conduction correspondent à un échange de chaleur entre deux corps. Pour un être humain debout, la conduction se fera par la plante des pieds. Elle est souvent négligée car elle est très faible dans le cas d'une personne debout. Dans les autres cas, l'élément en contact joue le rôle d'isolant thermique comme le ferait un habit très épais. Par exemple, *(BRAGER et DE DEAR, 1998)* citent les travaux de McCULLOUGH et OLESEN en 1994 et montrent que si on est assis sur une chaise pour définir notre situation de confort/inconfort, cette dernière peut ajouter 0,15 clo à l'isolation vestimentaire de l'individu.

– Échanges de chaleur par évaporation (E_{SK} en W/m²)

Le corps humain est composé à 70 % d'eau. La peau, donc les cellules cutanées, produisent continuellement de la sueur. Lors de fortes chaleurs, le phénomène est accentué par la thermorégulation végétative. L'évaporation, changement d'état de la sueur (liquide) en vapeur d'eau (gaz), puise de l'énergie dans le corps pour évaporer l'eau. Ce dernier est donc rafraîchi. C'est le système de thermorégulation qui détermine la quantité de sueur nécessaire pour maintenir l'équilibre thermique.

II.3.3.2. Échanges thermiques par la respiration

Pour vivre et alimenter le corps en oxygène, l'individu respire, il échange de l'air avec son environnement. Le processus de la respiration entraine une perte de chaleur sensible (changement de température sans changement d'état) par convection (C_{RES}) et une perte de chaleur latente (énergie dissipée lors du changement d'état) par évaporation (E_{RES}). En effet, l'air inspiré est à la température et à la pression de vapeur d'eau de l'air ambiant, et celui qui est expiré est à une température avoisinant celle de l'intérieur du corps (34 °C) et est saturé en humidité.

$$\boldsymbol{Q_{RES}} = C_{RES} + E_{RES} \qquad \text{[Éq. 1.8]}$$

- Q_{RES} : *Flux de chaleur échangé par la respiration, W/m²*
- C_{RES} : *Échanges thermiques par la convection respiratoire, W/m²*
- E_{RES} : *Échanges thermiques par l'évaporation respiratoire, W/m²*

Les pertes par la respiration sont relativement faibles lorsque l'organisme est au repos. Elles sont de l'ordre de 10 à 12 % des pertes totales *(THELLIER, 1989)*.

II.3.3.3. Équilibre thermique

Le bilan thermique met en relation les différents mécanismes physiologiques que nous venons de citer. Il s'écrit de la façon suivante (ASHRAE, 2009) :

$$\boldsymbol{M - W = Q_{SK} + Q_{RES} + S} \qquad \text{[Éq. 1.9]}$$

- M : *Activité métabolique, W/m²*
- W : *Puissance fournie à l'extérieur, W/m²*
- Q_{SK} : *Flux de chaleur échangé à la surface de la peau, W/m²*
- Q_{RES} : *Flux de chaleur échangé par la respiration, W/m²*
- S : *Chaleur stockée, W/m²*

L'homme est fait d'un ensemble de cellules en activité. Elles consomment donc de l'oxygène et des nutriments et dégagent du gaz carbonique dont la quantité varie en fonction des nutriments dégradés (CANDAS, 1998). L'énergie ainsi dégagée l'est principalement sous forme de chaleur. Le métabolisme (M) est donc le résultat de la vie cellulaire. Cependant, l'activité cellulaire intervient également dans le travail mécanique (W), c'est-à-dire l'activité de l'individu. Une partie de la chaleur est donc dégagée à l'extérieur du corps. L'activité métabolique peut être déduite grâce à la mesure de la consommation d'oxygène ou à partir d'abaques. Elle est souvent exprimée en « met ». 1 met correspond au métabolisme d'un individu assis au repos, soit 58,15 W/m². Une partie de la chaleur est également stockée (S) à l'intérieur du corps ou à la surface de la peau. Cette énergie stockée est responsable de l'augmentation ou de la diminution de la température corporelle (ASHRAE, 2009).

Activité	Métabolisme énergétique (M)	
	W/m²	met
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1,0
Activité sédentaire (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2,0
Marche à plat 2 km/h	110	1,9
Marche à plat 3 km/h	140	2,4
Marche à plat 4 km/h	165	2,8
Marche à plat 5 km/h	200	3,4

TABLEAU 1.3 : *Métabolisme énergétique en fonction de l'activité* (AFNOR, 2006)

L'homme étant thermo-régulé, le bilan thermique tend vers une valeur nulle. Lorsque cette valeur est atteinte, l'équilibre thermique est atteint, le corps ne met plus en jeu les différents mécanismes physiologiques.

II.3.4. Mesure du confort thermique

Mesurer le confort thermique est une tâche complexe. En effet, il faut prendre en considération les différents facteurs environnementaux mais également les différences

individuelles. Nous avons tous fait l'expérience suivant laquelle, dans une situation donnée, une personne ressent une sensation de chaud alors que sa voisine perçoit du froid. Dans ces conditions comment mesurer un confort thermique « universel » de manière à créer des espaces susceptibles d'être thermiquement appréciés par tous les occupants ?

L'environnement thermique peut être défini suivant quatre paramètres : **la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air**. Ils doivent cependant être combinés avec **l'activité et la vêture de l'individu** pour caractériser les échanges thermiques entre l'homme et son environnement. À partir de ces paramètres, il existe de multiples modèles de caractérisation du confort, détaillés ci-après.

II.3.4.1. Le modèle de FANGER : PMV-PPD

Dans les années 1970, FANGER a déterminé une méthode d'analyse et d'évaluation du confort thermique. Cette méthode est à la base de la réglementation française *(AFNOR, 2006)*. Elle permet de déterminer analytiquement le confort thermique et de donner les conditions des ambiances thermiques considérées comme acceptables.

Ce modèle a été réalisé suite à l'étude statistique d'expérimentations réalisées sur près de 1300 personnes dans des chambres climatiques (les climats étaient donc homogènes). FANGER leur a demandé d'évaluer leur sensation thermique face à différentes ambiances thermiques et vêtus de vêtements « classiques » d'intérieur.

Le confort thermique est déterminé grâce à un indice : le PMV (« Predicted Mean Vote » ou « Vote Moyen Prévisible »). Il représente le vote moyen de la sensation thermique d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation à sept niveaux d'ASHRAE (cf. *Chapitre 1-II.3.2*). Le PMV est basé sur le bilan thermique de l'être humain et peut être calculé grâce aux paramètres classiques de l'ambiance thermique (température de l'air, température moyenne de rayonnement, humidité de l'air et vitesse de l'air), l'activité et la vêture des individus. La sensation de confort est atteinte lorsque le bilan thermique est nul. Le vote moyen correspond alors à PMV = 0 avec une tolérance de ± 0,5 c'est-à-dire à une réponse de « ni chaud ni froid ». La formule empirique est la suivante :

$$\boldsymbol{PMV} = (0{,}303\ \exp\ (-0{,}036\ M)\ + 0{,}028)L \qquad \text{[Éq. 1.10]}$$

- M : *Activité métabolique, W/m²*
- L : *Écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et chaleur cédée, W/m²*

$$\begin{aligned}\boldsymbol{L} = \ & (M-W) - 3{,}05.10^{-3}.\{5733 - 6{,}99.(M-W) - Pa_{H2O}\} \\ & - 0{,}42.\{(M-W) - 58{,}15\} \\ & - 1{,}7.10^{-5}.M.\left(5867 - P_{A,H2O}\right) \\ & - 0{,}0014.M.(34 - T_A) \\ & - 3{,}96.10^{-8}.f_{cl}.\{(T_{Cl}+273)^4 - (\overline{T_R}+273)^4\} \\ & - f_{Cl}.h_C.(T_{Cl} - T_A)\end{aligned} \qquad \text{[Éq. 1.11]}$$

- W : *Puissance fournie à l'extérieur, W/m²*
- $P_{A,H2O}$: *Pression partielle de vapeur d'eau, Pa*
- T_A : *Température de l'air ambiant, °C*
- f_{Cl} : *Facteur de surface de vêtement selon* [Éq. 1.6]
- T_{Cl} : *Température de la surface externe du vêtement, °C*
- $\overline{T_R}$: *Température moyenne de rayonnement, °C*
- h_C : *Coefficient de transfert thermique par convection, $W.m^{-2}K^{-1}$*

Avec :

$$\boldsymbol{T_{Cl}} = 35{,}7 - 0{,}028.(M - W) - I_{Cl}.[3{,}96.10^{-8}.f_{Cl}.\{(T_{Cl}+273)^4 - (\overline{T_R}+273)^4\} + f_{Cl}.h_C.(T_{Cl} - T_A)] \qquad \text{[Éq. 1.12]}$$

· I_{Cl} : *Isolation thermique du vêtement, K. m²/W*

$$\boldsymbol{h_C} = \begin{cases} 2{,}38.|T_{Cl} - T_A|^{0,25} \; pour \; 2{,}38.|T_{Cl} - T_A|^{0,25} > 12{,}1.\sqrt{v_A} \\ 12{,}1.\sqrt{v_A} \qquad\qquad pour \; 2{,}38.|T_{Cl} - T_A|^{0,25} < 12{,}1.\sqrt{v_A} \end{cases} \qquad \text{[Éq. 1.13]}$$

· v_A : *Vitesse relative de l'air ambiant, m/s*

Le PMV peut donc être calculé pour différentes ambiances thermiques, différents métabolismes, différents habits… Il existe également des abaques permettant de le déterminer. Cependant, il est recommandé de l'utiliser dans les intervalles suivants : *(AFNOR, 2006)*

- Pour une activité métabolique (M) comprise entre 0,8 met et 4 met
- Pour un isolement vestimentaire (I_{Cl}) compris entre 0 clo et 2 clo
- Pour une température ambiante (T_A) comprise entre 10 °C et 30 °C
- Pour une température moyenne de rayonnement ($\overline{T_R}$) comprise entre 10 °C et 40 °C
- Pour une vitesse relative de l'air (v_A) comprise entre 0 m/s et 1 m/s
- Pour une pression de l'air comprise entre 0 Pa et 2700 Pa.

Face à une situation donnée, il y a toujours des personnes qui seront insatisfaites des conditions climatiques proposées. FANGER a alors déterminé le PPD (« Predicted Percent Dissatisfied » ou « Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits »). Sont considérés comme satisfaits ceux dont la réponse sur l'échelle d'ASHRAE aura été -1, 0, +1. Cependant face à une situation de confort (pour un vote de 0), il y aura toujours 5 % d'insatisfaits. Le PPD peut être calculé grâce à l'équation suivante et la distribution prévisible est présentée dans la *figure 1.5*. On considère donc une situation d'inconfort dès que ce pourcentage est supérieur à 10 %.

$$\boldsymbol{PPD} = 100 - 95\exp[-(0{,}03353\,PMV^4 + 0{,}2179\,PMV^2)] \qquad \text{[Éq. 1.14]}$$

· *PMV* : *Predicted Mean Vote*

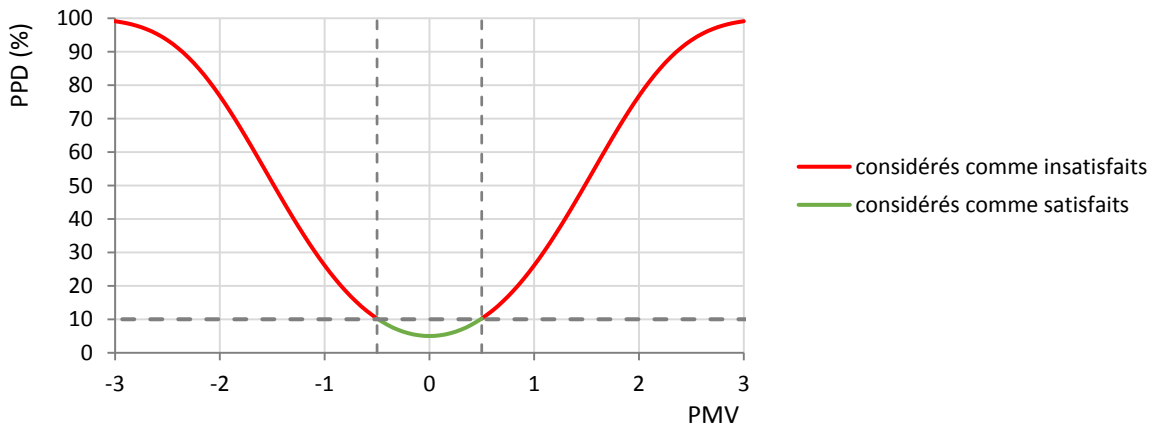


FIGURE 1.5 : *Répartition du pourcentage prévisible d'insatisfaits en fonction du vote moyen prévisible*
de l'auteur

Ce modèle a été intégré dans les réglementations européennes (ISO 7730) et américaines (ASHRAE Standard 55). Mais il comporte des limites. En effet, tout d'abord, il ne peut être utilisé que dans des intervalles restreints comme nous avons vu précédemment. De plus, *(DE DEAR et BRAGER, 2002)* ont montré que dans les bâtiments à ventilation naturelle, l'indice PMV surestime la sensation de chaleur en été et la sous-estime en hiver. Ce modèle ne parvient donc pas à déterminer les situations de confort dans ces conditions. Il reste cependant valide pour les bâtiments climatisés. *(MOUJALLED, 2007)* a confirmé ces résultats au cours de sa thèse en étudiant des bâtiments en France. *(CANDAS, 1998)* explique qu'en règle générale, les individus préfèrent avoir un peu plus chaud ce qui veut dire que la sensation de confort serait atteinte pour PMV = + 0,5 ce qui décalerait la courbe et les zones de confort. De même, l'insatisfaction ne varie pas symétriquement de part et d'autre du point central. Il semblerait que certaines personnes évaluent mal le chaud ou le froid ce qui tendrait à modifier également la courbe précédente.

II.3.4.2. Modèles plus complexes

Afin de reprendre les mécanismes de la thermorégulation humaine, et sur l'exemple de STOLWIJK, dont le modèle est constitué de 25 nœuds, GAGGE a développé un modèle plus simple dit à deux nœuds. Chacun des nœuds représente respectivement le corps (le noyau) et la peau d'un individu. Comme pour la thermorégulation, la peau joue le rôle d'interface et échange avec le corps grâce à la conduction tissulaire et la convection sanguine. La peau échange également avec l'environnement suivant les phénomènes physiques de la convection, de l'évaporation, du rayonnement, de la convection respiratoire et de l'évaporation respiratoire. Chacun des phénomènes peut être traduit sous forme d'équations (explicitées dans *(DOHERTY et ARENS, 1988 ; MOUJALLED, 2007 ; ASHRAE, 2009)*) permettant de définir une température effective ET*. Comme expliqué par *(MOUJALLED, 2007)*, la température effective dépend de la vêture et de l'activité de l'individu. Pour pouvoir comparer le ressenti des individus, il a été créé la température standard effective SET. Elle se base sur une vêture normalisée pour une activité. Elle représente la température de l'air d'un environnement quelconque qui serait équivalente à un environnement isotherme à 50 % d'humidité relative dans lequel l'individu aurait la même température de peau et la même mouillure cutanée.

SET(°C)	Sensation	État physiologique d'une personne sédentaire
>37,5	Extrêmement chaud, très inacceptable	Échec de la régulation
34,5 – 37,5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30,0 – 34,5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25,6 – 30,0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22,2 – 25,6	Confortable, acceptable	Neutralité
17,5 – 22,2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14,5 – 17,5	Froid, inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10,0 – 14,5	Très froid, très inacceptable	Frissons

TABLEAU 1.4 : ***Relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique*** *de Parsons en 2003 dans* (MOUJALLED, 2007)

(BONTE, 2014) dans son état de l'art sur les modèles de thermo-physiologie humaine montre qu'il existe de nombreux modèles plus ou moins complexes qui prennent en compte différents paramètres. L'objectif étant à chaque fois de développer un système permettant de calculer la température de la peau de l'individu puisque cette dernière est souvent liée à la sensation thermique.

II.4. La relation Habitant-Habitat : troisième et quatrième peau

La peau et les vêtements constituent les premières barrières de défense pour maintenir les organes des individus à une température constante. La troisième peau, l'habitat, propose à l'être humain des conditions climatiques plus favorables au maintien de sa température corporelle. Si l'être humain est constamment soumis à des échanges thermiques avec son environnement, il en est de même avec l'habitat. On retrouve alors les mêmes échanges thermiques entre l'homme et le climat intérieur qu'entre le climat intérieur et le climat extérieur.

II.4.1. L'habitat, une machine thermique complexe

Les habitats créent un microclimat intérieur qui nous protège des aléas climatiques mais ils sont eux-mêmes soumis à de nombreux phénomènes physiques. Le climat intérieur est également soumis aux différents modes de transferts thermiques avec le climat extérieur. *(THELLIER, MONCHOUX, et BEDRUNE, 2012)* définissent deux types d'échanges. Tout d'abord, la puissance produite est divisée entre les apports internes (P_{int}) (liés aux dégagements de chaleurs des êtres humains ou des appareils électriques) et la production des systèmes de génie climatique (P_{gc}) (positive pour le chauffage et négative pour la climatisation). Ensuite les transferts de masse et de chaleur avec l'environnement sont fonction des conditions climatiques et correspondent aux transferts par l'enveloppe (φ_{env}), aux transferts aérauliques liés au renouvellement d'air (φ_{air}) et aux apports solaires transférés à travers les vitrages (φ_{sol}). L'ensemble de ces échanges varient au cours du temps et dépendent des caractéristiques du bâtiment mais également des caractéristiques météorologiques (la température extérieure, la vitesse de l'air extérieur, l'humidité relative, ou la pression partielle de vapeur d'eau extérieure, et le rayonnement solaire). Ils définissent l'équilibre thermique de l'habitat grâce à l'équation suivante :

$$\boldsymbol{C_b}\ \frac{\boldsymbol{dT_b}}{\boldsymbol{dt}} = P_{int} \pm P_{gc} + \varphi_{sol} + \varphi_{env} + \varphi_{air} \qquad \text{[Éq. 1.15]}$$

- C_b : *Capacité thermique totale du bâtiment, J/°C*
- T_b : *Température moyenne du bâtiment, °C*
- t : *Temps, s*
- P_{int} : *Production par les apports internes, W*
- P_{gc} : *Production par les systèmes de génie climatique, W (+ pour le chauffage, – pour la climatisation)*
- φ_{sol} : *Apports solaires transférés à travers les vitrages, W*
- φ_{env} : *Apports thermiques à travers l'enveloppe, W*
- φ_{air} : *Apports thermiques liés au renouvellement d'air, W*

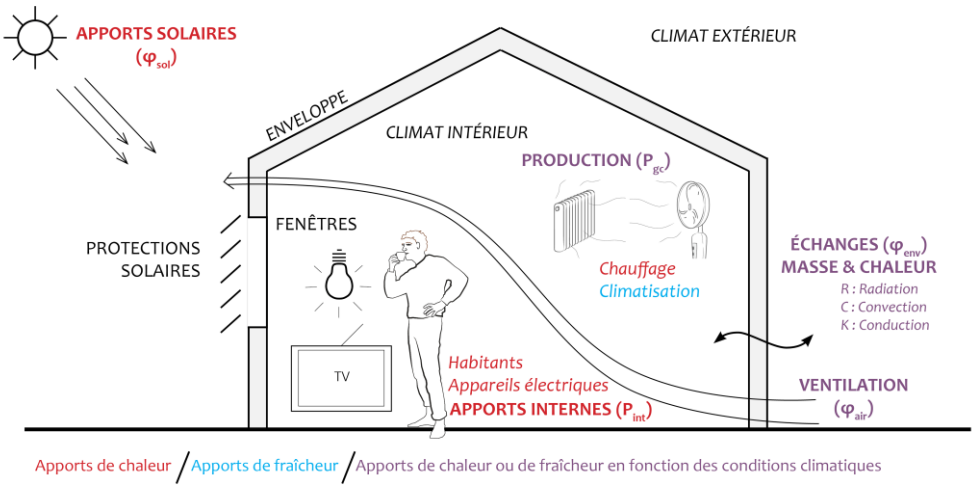


FIGURE 1.6 : *Maintien du climat intérieur d'un habitat*
de l'auteur

Le bilan des énergies utilisées dans les bâtiments peut également se représenter suivant un schéma reprenant les apports, les gains, les pertes et les déperditions (*Figure 1.7*). Les logiciels de simulation de thermique dynamique permettent de calculer les besoins thermiques nets grâce à la mise en place des différents scénarios thermiques, d'occupation, de ventilation...

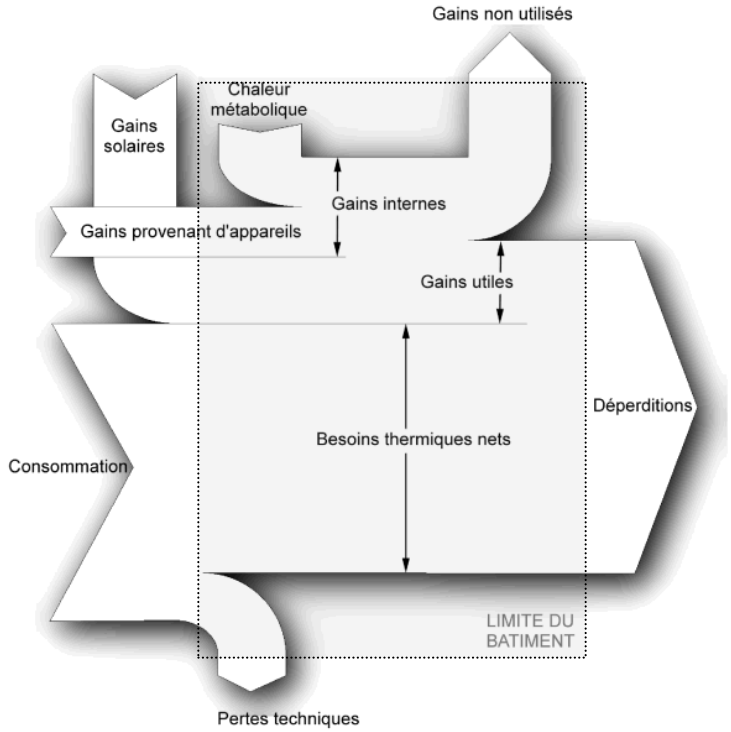


FIGURE 1.7 : *Diagramme de Sankey reprenant les différents apports et pertes d'énergie dans le bâtiment*
Source : http://docs.izuba.fr/fr/wakka.php?wiki=DiagrammesankeY

L'architecture contribue fortement au confort et aux consommations énergétiques. En effet, les systèmes constructifs, les matériaux, la géométrie du bâtiment, sa localisation géographique… représentent autant d'éléments pouvant influer sur les échanges thermiques et donc le confort des occupants et les consommations d'énergie. L'enveloppe des bâtiments devient une troisième peau entre l'homme et les conditions climatiques extérieures. Elle conditionne les échanges entre l'intérieur et l'extérieur *(OLIVA et COURGEY, 2006)*.

Pour l'être humain lorsqu'il y a un déséquilibre donc un inconfort, la thermorégulation intervient pour rétablir l'équilibre et pour protéger les organes. Dans l'habitat, la maîtrise du climat intérieur est nécessaire pour maintenir des conditions stables. Elle est essentiellement régulée grâce au chauffage, à la climatisation et à la ventilation. Malgré la complexité de la notion de confort, c'est souvent à partir d'une température que se déclenche les radiateurs ou la climatisation. Aujourd'hui, la ventilation des locaux recevant des personnes est obligatoire. Cela peut paraître paradoxal puisqu'on cherche à se protéger du climat extérieur, mais la ventilation est nécessaire à notre respiration et au bon fonctionnement du bâtiment. En effet, le renouvellement d'air permet de purifier l'air et d'apporter de l'oxygène nécessaire à la respiration. Une mauvaise qualité de l'air peut conduire à des maux de tête, de la fatigue et des difficultés respiratoires. La ventilation permet également de limiter les surchauffes et de diminuer l'humidité afin de préserver les constructions de la condensation et des moisissures.

Le système homme/habitat est un système complexe. Il s'agit de deux systèmes imbriqués, ayant leur propre fonctionnement, qui interagissent l'un sur l'autre. Comme le dit *(MOUJALLED, 2007)*, « *le bâtiment influence l'occupant, l'occupant agit sur le bâtiment, le bâtiment et l'occupant s'influencent mutuellement* ». L'occupant est régulé grâce à la thermorégulation qui permet le maintien des conditions nécessaires à la vie suivant un pas de temps très faible, inférieur à la seconde. Ce système est régulé par un nombre élevé de capteurs situés sur la peau, sensibles à la température. Dans le cas d'un bâtiment, la régulation est plus lente, le système de contrôle est moins réactif. Le pas de temps est de l'ordre de l'heure et on trouve généralement un seul capteur de température (voire aucun) qui permet de déclencher les régulations nécessaires. Aujourd'hui, la plupart des logiciels de thermique dynamique font un calcul sur un pas de temps horaire ce qui est suffisant pour modéliser le comportement thermique du bâti. Cependant, la difficulté lors des simulations concerne l'estimation du confort de l'être humain puisque ses actions ne sont pas corrélées à ce pas de temps *(THELLIER, MONCHOUX, et BEDRUNE, 2012)*.

II.4.2. La notion de contrôle de l'environnement habité

(BRISEPIERRE, 2011) dit que « *L'habitant en tant qu'acteur de son logement et un maillon essentiel de la consommation d'énergie domestique. En effet, la consommation d'énergie repose tout autant sur des objets techniques (bâtiments, systèmes collectifs, appareils domestiques) que sur les comportements des acteurs qui les utilisent. Si l'objectif est de réaliser des économies d'énergie dans l'habitat, il ne faut pas seulement considérer les aspects techniques ou les mécanismes économiques mais aussi regarder en quoi les habitants contribuent à construire cette consommation d'énergie par leurs pratiques.* » En effet, l'individu interagit en permanence avec son environnement. Le simple fait d'allumer sa télévision engendre une production de chaleur interne et déséquilibre le système que nous venons de voir. L'individu peut agir sur de multiples éléments au sein de son logement : la température consigne, l'ouverture/fermeture des fenêtres ou des volets, l'allumage de ses appareils électriques… Ses actions sont le résultat de stratégies quotidiennes permettant de lui procurer du confort et qui ne prennent pas toujours en compte les objectifs de réduction de la consommation d'énergie édictée par les décideurs.

Afin de réguler le climat intérieur, de nombreuses solutions technologiques ont été développées. Pour obtenir une ambiance qui soit confortable ou économe en énergie, l'habitant est sensé devenir un « expert » de ces technologies qui peuvent remettre en question ses habitudes quotidiennes. *(MANGOLD, 2015)* cite une habitante dont l'appartement est équipé d'une ventilation mécanique contrôlée double flux qui continue à aérer son logement pour avoir un air plus sain alors qu'avec ce dispositif cela n'est pas nécessaire. Face à la complexité de ces technologies, l'habitant désarmé pourrait choisir la solution de la maison intelligente équipée de

capteurs permettant de tout régler (température, ventilation, ouverture/fermeture des fenêtres et volets…) afin de favoriser les économies d'énergie ou le confort. Le développement de la domotique et des objets connectés tend vers cette idée. On pourrait penser que l'automatisation de l'habitat permet d'atteindre le confort et de réduire les consommations d'énergie, mais les études montrent que lorsque l'usager peut agir sur son environnement, il met en place les conditions lui permettant d'atteindre au mieux son confort. Ainsi, les modifications automatiques de l'ambiance peuvent engendrer des inconforts notamment dans les bâtiments « intelligents ». En effet, afin de gérer les apports solaires, l'ouverture ou la fermeture des volets, dont le changement d'état est basé sur des capteurs de luminosité, peut générer un inconfort visuel ou lumineux. Suivant la position du capteur, des mouvements intempestifs du volet peuvent apparaître et certaines zones de la pièce peuvent alors nécessiter l'éclairage artificiel. *(BESLAY, GOUNET, et ZÉLEM, 2013)* expliquent également que pour que ces bâtiments « intelligents » fonctionnent il est nécessaire que l'occupant collabore au projet afin d'obtenir les économies attendues. Or l'être humain est toujours le capteur sensible final. Il est acteur de son confort et agit de manière à retrouver les conditions qui lui sont favorables au risque d'aller à l'encontre des pratiques sociales ou techniques prévues pour réduire les consommations d'énergie ou pour améliorer le confort.

À partir de l'étude de LEAMAN et BORDASS[4], *(NICOL et HUMPHREYS, 2002)* ont montré que l'individu est plus indulgent envers les situations de confort s'il peut lui-même agir sur la régulation des systèmes. Dans les bâtiments où la régulation est centralisée, les occupants doivent s'adapter à une température particulière et peuvent ressentir cette ambiance comme « non-confortable ». D'après eux, quand les occupants ont le contrôle des changements de température, ils trouvent l'ambiance plus confortable. Éléments confirmés par *(FRONTCZAK et WARGOCKI, 2011)* qui montrent, par l'intermédiaire d'enquêtes, que donner aux occupants la possibilité de contrôler l'environnement intérieur améliore le confort thermique et visuel ainsi que la satisfaction globale du bâtiment. De même *(MOSER, 2009)* souligne que « *plus l'individu estime qu'il peut contrôler son environnement plus ses comportements adaptatifs sont efficaces* ». Cette notion de contrôle de l'environnement est donc centrale dans la caractérisation du confort thermique. Les opportunités adaptatives peuvent être de plusieurs ordres : possibilité d'ouvrir/fermer une fenêtre/un volet, réguler la température, changer de vêtements, boire/manger quelque chose de chaud/froid…

Les modèles analytiques de définition du confort nécessitent la connaissance de plusieurs paramètres dont la mesure est complexe, et peut donc être faussée. Ils se basent sur un ensemble d'hypothèses qui conduisent à une définition du confort approximative. De nombreuses études *(HUMPHREYS et FERGUS NICOL, 2002 ; MOUJALLED, 2007)* ont montré que dans le cas de bâtiments naturellement ventilés, ces modèles n'arrivent pas à déterminer les situations de confort : dans la réalité les plages de confort sont plus étendues que celles prévues (*Figure 1.8*). Cette situation est notamment due à une plus grande liberté des occupants. *(BECKER et PACIUK, 2009)* ont ainsi démontré que dans les bâtiments chauffés et climatisés, le confort est obtenu à des températures de 21,5 °C en hiver et 23 °C en été, alors que dans les bâtiments naturellement ventilés, elles sont respectivement de 19,5 °C et 26 °C. De tels écarts ont conduit les chercheurs à proposer une interaction dynamique entre le sujet et son environnement. En accord avec les études précédentes, *(FRONTCZAK et WARGOCKI, 2011)* ont également mis en évidence que l'environnement thermique est souvent le facteur le plus important pour une satisfaction globale du confort intérieur.

[4] A.J. LEAMAN, W.T. BORDASS, Productivity in Buildings : the Killer Variables, Workplace Comfort Forum, London, UK, 1997

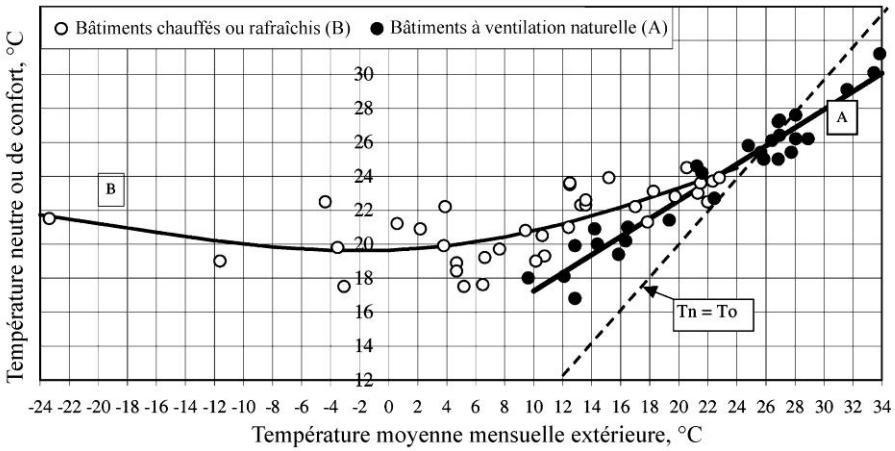


FIGURE 1.8 : *Évolution de la température de confort en fonction de la température mensuelle moyenne pour les bâtiments climatisés et ceux à ventilation naturelle*
traduit de (HUMPHREYS, 1978)

(PIOT-ZIEGLER et GERBER, 2008) dans leur étude sur les surchauffes estivales ont établi qu'en plus de la différence entre bâtiments naturellement ventilés et bâtiments chauffés/climatisés, les individus peuvent être plus indulgents face à leur environnement thermique en fonction du type de bâtiment dans lequel ils vivent. En effet, en comparant les attentes en termes de confort au travail ou au domicile, ils se sont rendu compte que les individus s'accommodent davantage de la chaleur à leur domicile. Cela est dû à une plus grande liberté d'adaptation. En effet, chez soi face à une situation d'inconfort on peut changer de position, de lieu, d'habits, etc. Au contraire dans un environnement de travail l'ambiance climatique est souvent subie, contrainte par l'exigence sociale où chacun doit faire des efforts pour vivre en communauté. De plus, ils montrent que plus les moyens de contrôle de l'environnement sont nombreux, meilleur est le ressenti thermique. Ainsi, si l'individu peut régler la température consigne, ouvrir une fenêtre ou fermer un volet, il se sentira mieux et acceptera des températures plus élevées.

Face à un inconfort, l'individu a ainsi plusieurs moyens d'actions pour améliorer ou maintenir son confort. Ces actions peuvent être concomitantes ou indépendantes. *(FABI et al., 2012)* ont montré qu'il existe cinq groupes de facteurs qui influencent les comportements de l'individu ayant un impact sur les consommations d'énergie. Il s'agit de facteurs :

- environnementaux (la température, l'humidité, la vitesse de l'air, le bruit, la luminosité, les odeurs),
- contextuels (l'isolation des façades, l'orientation, le type de chauffage,…)
- psychologiques (les attentes en termes des différents conforts sensoriels, l'aspect financier ou écologique, les habitudes…)
- physiologiques (l'âge, le sexe, la santé, l'activité... de l'individu)
- sociaux (composition du foyer, interaction avec les autres…)

II.4.3. Le confort adaptatif

En contrepartie des méthodes analytiques, réalisées en chambres climatiques, les méthodes adaptatives prennent en compte les facteurs physiques, physiologiques et psychologiques et ont été établies d'après des enquêtes et des études menées sur le terrain. Elles se basent sur le fait que l'être humain n'est jamais passif face à un environnement thermique donné. Il reçoit des informations thermiques des différents capteurs situés sur le corps et réagit en conséquence pour trouver sa

température de confort. (HUMPHREYS et FERGUS NICOL, 2002) ont établi la définition suivante du confort adaptatif: « *If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways which tend to restore their comfort* »[5].

Les méthodes adaptatives ne prévoient pas une réponse de confort mais plutôt les conditions presque constantes dans lesquelles les gens vont probablement être dans une situation de confort. (DE DEAR, BRAGER, et COOPER, 1997) ont défini trois catégories d'adaptation. Tout d'abord l'**adaptation comportementale**, où l'individu, pour retrouver son confort, peut agir, de manière consciente, sur des variables personnelles (changer d'habits, modifier son activité, en mangeant/buvant quelque chose de chaud/froid), des variables technologiques ou environnementales (ouvrir/fermer une fenêtre/un volet, allumer/éteindre le chauffage/la climatisation), ou des variables culturelles (faire une sieste, adapter le code vestimentaire). Ensuite l'**adaptation physiologique** correspond aux réactions du corps humain lorsque l'environnement thermique change. Inconsciente, elle peut être d'origine génétique (mutations) ou de l'ordre de l'acclimatation (modification des mécanismes physiologiques suite à une exposition plus ou moins prolongée à un ou plusieurs facteurs de stress thermique). Enfin, l'**adaptation psychologique** prend en considération le passé thermique et culturel de l'individu (son habitude à être dans un environnement avec une certaine température par exemple). (LIU, YAO, et McCLOY, 2012) ont montré que pour un environnement thermique confortable, l'adaptation physiologique est le facteur dominant. Les adaptations comportementales et psychologiques ont par contre une influence de même niveau.

Le confort adaptatif a été principalement modélisé par deux études. L'une est américaine et est réalisée par (DE DEAR, BRAGER, et COOPER, 1997) dans le cadre du projet RP-884 de l'ASHRAE. Elle est aujourd'hui intégrée dans la norme américaine (ASHRAE standard 55-2004) pour la définition du confort. L'autre est européenne dans le cadre du projet SCAT's (Smart Control And Thermal Comfort) réalisée par (McCARTNEY et FERGUS NICOL, 2002). Elle est aujourd'hui à la base de la réglementation européenne EN 15251 (AFNOR, 2007). Les deux réglementations font alors une différence de confort entre les bâtiments naturellement ventilés et ceux qui sont climatisés/chauffés. Le climat extérieur conditionne beaucoup le comportement des individus. Ainsi en hiver, les individus sont plus vêtus et vont avoir 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), dans son état de l'art sur le confort adaptatif, montre qu'il existe de nombreuses études qui tentent de définir une température de confort sur la base de l'équation suivante.

$$\boldsymbol{T_C} = \alpha \times T_{ext} + \beta \qquad \text{[Éq. 1.16]}$$

- T_C : *Température intérieure de confort optimal, °C*
- T_{ext} : *Température extérieure, °C*
- α *et* β : *Constantes, respectivement sans unité et °C*

(McCARTNEY et FERGUS NICOL, 2002), grâce à l'étude de bâtiments répartis dans cinq pays (Royaume Uni, France, Suède, Grèce, Portugal) ont adapté l'équation précédente en vue de définir la température de confort dans les bâtiments naturellement ventilés en Europe. L'objectif étant de réduire les dépenses énergétiques nécessaires au maintien d'une température constante dans les bâtiments. Il en ressort une relation différente pour chaque pays. Cependant pour la France l'équation suivante a été proposée.

[5] « Si un inconfort apparaît, l'homme réagit de manière à restaurer son confort. »

$$\begin{array}{ll} Pour\ T_{RM7} \leq 10\ °C & T_C = 0{,}049 \times T_{RM7} + 22{,}58 \\ Pour\ T_{RM7} > 10°C & T_C = 0{,}206 \times T_{RM7} + 21{,}42 \end{array} \quad \text{[Éq. 1.17]}$$

- T_C : *Température intérieure de confort optimal, °C*
- T_{RM7} : *Température extérieure en moyenne glissante journalière sur 7 jours calculée selon l'équation* [Éq. 1.22]*, °C*

En Europe, c'est la norme NF EN 15251 *(AFNOR, 2007)* qui définit les températures opératives intérieures optimales en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière sur sept jours (T_{RM7}). La température opérative est une moyenne des échanges par convection et par radiation entre l'être humain et son environnement comme définie par l'équation *[Éq. 1.18]*. Par rapport à une seule température d'air ou de rayonnement, elle permet la prise en compte des échanges de chaleur dans des environnements non-uniformes réels. Les échanges par conduction sont négligés et l'humidité de l'air n'est pas prise en compte.

$$\boldsymbol{T_{op}} = \frac{h_R.\overline{T_R} + h_C T_A}{h_R.h_C} \quad \text{[Éq. 1.18]}$$

- T_{op} : *Température opérative intérieure, °C*
- h_R : *Coefficient de transfert thermique par rayonnement, W/(m².K)*
- $\overline{T_R}$: *Température moyenne de rayonnement, °C*
- h_C : *Coefficient de transfert thermique par convection, W/(m².K)*
- T_A : *Température de l'air ambiant, °C*

La norme NF-EN 15251 définit ainsi une température de confort en fonction de T_{RM7} *([Éq. 1.19]*) mais surtout elle détermine quatre catégories définissant un niveau d'exigence et de sensibilité des occupants en termes de confort thermique. Pour être acceptable par près de 90 % de la population (cf. *Tableau 1.5* et *II.3.4.1 de ce chapitre*), la température de confort doit se situer dans une zone de ±3 degrés par rapport à la température de confort optimal. La limite basse est définie pour une T_{RM7}, comprise entre 15 °C et 30 °C alors que la limite haute, elle doit être comprise entre 10 °C à 30 °C. En dessous, ce sont les équations du PMV (cf. *Chapitre 1-II.3.4.1*) qui doivent être utilisées.

$$\boldsymbol{T_C} = 0{,}33\ T_{RM7} + 18{,}8 \quad \text{[Éq. 1.19]}$$

- T_C : *Température intérieure de confort optimal, °C*
- T_{RM7} : *Température extérieure en moyenne glissante journalière sur 7 jours, °C*

La température extérieure en moyenne glissante journalière (T_{RM}) peut être définie comme suit :

$$T_{RM} = (1-\alpha).\{\theta_{-1} + \alpha.\theta_{-2} + \alpha^2.\theta_{-n} \ldots\} \quad \text{[Éq. 1.20]}$$

Qui peut être simplifiée par : $T_{RM} = (1-\alpha).\theta_{-1} + \alpha.T_{RM-1}$ [Éq. 1.21]

- T_{RM} : *Température moyenne glissante du jour, °C*
- T_{RM-1} : *Température moyenne glissante de la veille, °C*
- θ_{-1} *à* θ_{-n} : *Température moyenne journalière des jours J-1 à J-n, °C*
- α : *Constante : 0,8*

Pour le calcul de la température extérieure en moyenne glissante journalière sur sept jours (T_{RM7}), l'équation suivante peut être employée :

$$T_{RM7} = \frac{\theta_{-1} + 0{,}8.\theta_{-2} + 0{,}6.\theta_{-3} + 0{,}5.\theta_{-4} + 0{,}4.\theta_{-5} + 0{,}3.\theta_{-6} + 0{,}2.\theta_{-7}}{3{,}8} \quad \text{[Éq. 1.22]}$$

- T_{RM7} : *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*

Catégorie	*Description*	*Limite basse (°C)*	*Limite haute (°C)*	*PPD (%)*	*PMV*
I	Niveau élevé, pour des personnes très sensibles et fragiles	T_{conf} - 2	T_{conf} + 2	<6	-0.2 < PMV < +0.2
II	Niveau normal	T_{conf} - 3	T_{conf} + 3	<10	-0,5 < PMV < +0,5
III	Niveau modéré acceptable	T_{conf} - 4	T_{conf} + 4	<15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	Acceptable pour une partie restreinte de l'année	< T_{conf} - 4	> T_{conf} + 4	>15	-0,7 > PMV et PMV > +0,7

TABLEAU 1.5 : *Catégories recommandées par la norme NF EN 15251 et leurs correspondances pour les limites de confort adaptatif et de vote prévisible moyen*
NF EN 15251 (AFNOR, 2007)

Dans la suite de notre étude, nous étudions des bâtiments non-climatisés, ils peuvent donc être considérés comme des bâtiments naturellement ventilés. En conséquence, nous utiliserons le confort adaptatif comme méthode d'étude du confort thermique en utilisant l'équation *[Éq. 1.17]*.

III. L'occupant, acteur de son environnement direct

L'être humain est hédoniste, il agit sur son environnement et sur lui-même pour rétablir son confort. Si les possibilités d'actions sont limitées, il ressent de l'inconfort. En agissant ainsi, il n'est plus l'être idéal défini dans la réglementation thermique. (CAYLA, ALLIBE, et LAURENT, 2010) ont montré qu'avec les mêmes dispositifs techniques, la consommation d'énergie pouvait varier d'un facteur trois en fonction de la température consigne dictée par l'occupant et du taux de renouvellement d'air souhaité. Les consommations d'énergie ne sont donc plus celles prévues par les simulations thermiques conventionnelles. De même, les niveaux de confort peuvent varier et parfois les actions que l'occupant pense bénéfiques peuvent au contraire être source d'inconfort.

III.1. Aider au changement des comportements

Rechercher un même confort, voire mieux, mais avec des stratégies différentes, voilà une conduite qui pourrait réduire les consommations d'énergie dans le secteur du bâtiment. Mais influencer le comportement des individus est complexe. Cela suppose une modification importante des habitudes quotidiennes pour que les actions réalisées aient un effet significatif sur les consommations d'énergie. De nombreuses expérimentations pour réduire les consommations ont déjà été testées, en Europe et aux États-Unis, depuis la fin des années 1970. Les résultats varient en fonction des études et des recommandations faites aux usagers. En moyenne, les différentes études ont permis d'avoir une baisse des consommations de l'ordre de 5 à 15 %.

III.1.1. Les moyens

Le concept de « nudge », en français « coup de pouce », a été introduit par R. THALER et C. SUNSTEIN. L'idée est de permettre aux individus de faire les bons choix tout en étant accompagnés et sans les culpabiliser. Les personnes sont libres de suivre ou non les conseils dispensés *(OULLIER et SAUNERON, 2011)*. Les « nudges » s'appuient sur des facteurs psychologiques. Changer les comportements est un processus long car le plus souvent ils sont inscrits dans une routine de vie et dans les habitudes quotidiennes. Or les gestes écologiques sont souvent en contradiction avec nos modes de vie. L'évolution des technologies et de la notion de confort a conduit l'être humain à avoir des comportements qui ne sont pas nécessairement en accord avec le respect de l'environnement. L'instauration de nouveaux principes se heurte donc à l'inertie du changement. Lorsque le comportement est perçu comme une norme sociale, c'est-à-dire qu'il est adopté par un grand nombre de personne, il est plus facilement accepté. La norme sociale influence fortement le comportement des habitants, notamment lorsqu'il s'agit de notre famille ou de nos proches. Mettre en valeur les comportements de personnes qui nous sont familières peut conduire à une modification profonde de nos pratiques. *(OULLIER et SAUNERON, 2011)* mettent d'ailleurs en relief une expérience réalisée en Californie. Il a été signalé aux habitants que « *le choix le plus populaire au sein de votre communauté* » était l'utilisation du ventilateur plutôt que de la climatisation. Cela a permis une diminution des consommations électriques de près de 10 %. L'idée est donc d'identifier des groupes sociaux homogènes mais surtout connectés les uns aux autres afin de transmettre un message adapté à leur aspiration. L'apparition des réseaux sociaux en ligne est un atout dans l'acceptation par la société des nouveaux préceptes pour les économies d'énergie.

Même si le changement des comportements est influencé par la société, il doit se faire au niveau individuel. Aujourd'hui, les individus montrent un intérêt grandissant pour l'écologie et la diminution des factures énergétiques. Cependant, on assiste à une augmentation de la demande en énergie des ménages. Le logement, la culture, la psychologie, la sociologie, le côté financier, le climat… sont autant d'éléments qui ont une influence sur les consommations. L'énergie électrique reste aujourd'hui un marqueur de la qualité de vie et fait partie des éléments caractéristiques de l'aisance matérielle *(BARREAU, DUJIN, et VEDIE, 2013)*. Il est alors difficile d'imposer aux habitants la diminution de leurs factures énergétiques dans la mesure où consommer est un choix voire une liberté individuelle.

Il existe de multiples façons d'inciter le consommateur à agir différemment. (MOSER, 2009) préconise trois approches, plutôt complémentaires, pour réduire les consommations d'énergie grâce au changement des comportements:

- Les campagnes d'incitation, de sensibilisation et d'éducation
- Le « feedback » (retour d'informations en français)
- Les récompenses monétaires

Aujourd'hui de nombreuses campagnes incitent la population à réduire leur consommation d'énergie. Que ce soit des campagnes télévisuelles, publicitaires ou radiophoniques, elles prônent toutes la modification des comportements quotidiens, basé sur une idée : la somme de toutes les petites actions permettra la mutation nécessaire à la lutte contre les problèmes environnementaux. Les consommations énergétiques ne sont, le plus souvent, pas des choix, elles sont le résultat d'un ensemble de pratiques qui contribuent au mode de vie. En effet, comment contrôler les consommations liées à l'alimentation ou à l'hygiène ? La part qu'elles occupent dans la consommation globale est difficilement réductible. Sur d'autres postes, des mesures d'incitation de réduction des consommations peuvent être mises en place, comme une limitation des consommations grâce à un choix par défaut économe en énergie sur le contrat d'énergie ou sur les appareils électriques (ex : bloquer à 19 °C la température) (OULLIER et SAUNERON, 2011).

Les dispositifs de « feedback » sont basés sur le fait que les occupants ne connaissent pas réellement leur consommation énergétique (C.R.E., 2012). La plupart des activités quotidiennes nécessitent de l'énergie pour être réalisées : préparer un repas, regarder la télévision, charger son téléphone portable… L'énergie est utilisée indirectement, au travers des différents appareils électriques par les utilisateurs qui ne connaissent pas la consommation réelle de leurs actions quotidiennes car comme le disent (BURGESS et NYE, 2008), l'énergie est « invisible ». Les habitants en ont besoin pour leurs activités mais ils ne connaissent pas les postes ou les appareils énergivores.

Les dispositifs de « feedback » sont des outils permettant aux consommateurs de connaître leur consommation réelle alors que les factures d'aujourd'hui sont souvent basées sur des estimations. Le projet Affichéco (ASSEGOND, 2015), la société DIY Kyoto ou la société Gridpock proposent par exemple un dispositif de consultation de la consommation d'énergie sur tablette. La mise en place d'un « feedback » induit la plupart du temps une réduction de la consommation d'énergie. D'après (FISHER, 2008), qui a analysé 26 études réalisées dans le monde entre 1987 et 2008, les économies sont de l'ordre de 1,1 à 20 % mais la moyenne tourne autour de 5 à 12 % et dans quelques cas aucune économie n'a été réalisée (3 études). D'après (FARUQUI, SERGICI, et SHARIF, 2010), qui ont repris une douzaine d'études plutôt nord-américaines réalisées dans ce domaine, les économies d'énergie atteignent également 3 à 13 % avec une moyenne à 7 %. Ces dispositifs supplémentaires ne suffisent donc pas à réduire les consommations afin d'atteindre le facteur 4. D'après cette même étude, les « feedbacks » qui arrivent à capter l'attention du consommateur doivent :

- être basés sur la consommation réelle,
- avoir une fréquence du retour d'information élevée,
- être interactifs : l'utilisateur choisit ce qu'il souhaite,
- donner les informations de consommation de certains appareils électriques,
- être donnés sur une longue période,
- se référer à l'historique de consommation ou à la norme sociale,
- être présentés de manière attrayante et compréhensible par la population ciblée. (plutôt en euros qu'en kilowatt-heure car tout le monde ne connait pas cette unité)

Les récompenses monétaires peuvent être accordées lorsqu'une économie d'énergie est effectivement réalisée. D'après *(BARREAU, DUJIN, et VEDIE, 2013)*, la contrainte budgétaire est à l'origine des comportements économes en énergie des ménages. Il existe aujourd'hui en France, des réglementations et des subventions permettant d'inciter à la rénovation du parc de bâtiments anciens en échange d'une réduction d'impôts. WINNETT, KAGEL, BATTALIO et WINKLER, en 1978[6], ont mené une expérience relatée dans *(PIOT-ZIEGLER et GERBER, 2008)* montrant que donner une compensation financière si des économies ont effectivement été réalisées ou réduire le prix de l'électricité comme incitation positive permet de réduire les consommations électriques. Pour faire des économies d'énergie, les récompenses monétaires représentent un fort levier d'action au niveau politique, surtout dans un contexte économique de crise. Cependant, ce message doit être relayé par des campagnes de sensibilisation, d'apprentissage et d'éducation. En effet, pour pouvoir agir au quotidien, les usagers doivent être informés des bonnes pratiques.

III.1.2. Les limites : l'effet rebond

Les économies d'énergie constatées par l'utilisation des différents moyens cités précédemment varient fortement d'une étude à l'autre. Mais au-delà des gains potentiels c'est la durabilité des solutions qui est critiquée. En effet, *(HARGREAVES, NYE, et BURGESS, 2010a ; et 2013)* ont montré que lors de l'installation chez des particuliers de systèmes permettant de visualiser la consommation énergétique en temps réel, des économies sont réalisées dans un premier temps. Mais très vite, lorsque le consommateur estime être entré dans la norme et qu'il a compris comment agir pour réduire ses consommations, le dispositif est relégué au second plan et n'incite pas à réduire davantage les consommations. L'effet de nouveauté invite les consommateurs à tester et à utiliser le dispositif. Cependant, sur le long terme, ce nouveau comportement, qui peut être très intrusif dans les pratiques quotidiennes, disparaît petit à petit. *(BARREAU, DUJIN, et VEDIE, 2013)* estiment à un ou deux ans la viabilité de la solution avant un retour aux comportements d'origine. C'est ce qu'on appelle l'effet rebond.

Mais cet effet peut également prendre une autre forme. Les bénéfices réalisés sur un poste de consommation sont réemployés dans un autre poste. En réalisant des bâtiments toujours plus performants, les usagers augmentent leur niveau d'exigence. On assiste à une augmentation de 1 °C de la température des habitations neuves par rapport aux anciennes *(DUJIN et MARESCA, 2010)*. Cet accroissement des exigences induit une augmentation des consommations, le retour sur investissement peut alors être biaisé. *(BARREAU, DUJIN, et VEDIE, 2013)* ont mis en évidence que depuis les années 1970, la consommation d'énergie spécifique des particuliers a doublé alors que les consommations de chauffage tendent à diminuer depuis ces trente dernières années. Pourtant les industriels ne cessent d'améliorer les performances énergétiques de leurs équipements. Le développement de nouveaux types d'appareils électriques (télévisions, ordinateurs, chaînes Hi-fi,…) et l'évolution de la notion de confort demandent toujours plus d'énergie. Ainsi, entre 1973 et 2010, la consommation moyenne d'électricité spécifique est passée de 13 kWh/m² à 30 kWh/m².

(GREENING, GREENE, et DIFIGLIO, 2000) ont montré grâce à leur étude de la littérature existante (aux États-Unis) que l'effet rebond a une part significative dans les potentielles économies d'énergie. Jusqu'à 50 % des économies réalisées sont ensuite perdues à cause de l'effet rebond dans le résidentiel. Ils soulignent alors l'importance d'accompagner l'efficacité énergétique avec des taxes ou des incitations fortes permettant de limiter cet effet.

[6] WINNETT, R. A., KAGEL, J. H., BATTALIO, R. C. et WINKLER, R. C. (1978), Effects of monetary rebates, feedback, and information on residential electricity conservation. *Journal of Applied Psychology,* 63 (1), 73-80.

Les solutions imaginées et validées sur un échantillon de la population doivent ensuite être transposées à l'échelle nationale. Or une solution proposée à un groupe d'individus ne fonctionnera peut-être pas sur un autre groupe avec des origines ou des aspirations différentes. Lorsqu'on propose des solutions au niveau d'un quartier, le réseau social déjà en place favorise la validation du système par les différents individus. Lors de la transposition à une plus grande échelle, il est alors possible que les populations, par manque d'informations ou d'intérêt, ne suivent pas les préconisations.

III.2. Étude du comportement de l'individu

L'analyse du comportement des individus se fait principalement par deux techniques. La première consiste en la réalisation d'**enquêtes sociologiques,** qui peuvent être quantitatives ou qualitatives, qui conduisent le plus souvent à des études statistiques. Or il peut exister un écart entre les déclarations et les actions réellement entreprises. C'est un biais connu dans le domaine de la sociologie. La seconde technique consiste à une **instrumentation *in situ*** dans les logements ou les bureaux des personnes volontaires pour l'étude. Ces mesures *in situ* révèlent ainsi un comportement réel dans la mesure où l'instrument de mesure n'interfère pas dans la pratique quotidienne des occupants. Certaines études mixent les deux méthodes d'enquête ce qui permet d'avoir une explication sur les pratiques par les occupants eux-mêmes.

Il existe aujourd'hui des modèles complexes permettant de s'approcher des consommations énergétiques réelles. Cependant, nous cherchons à déterminer les actions de l'occupant sur les différents dispositifs architecturaux (fenêtres, protections solaires), nous ne détaillerons donc pas les actions qui peuvent être menées au niveau des systèmes (chauffage ou climatisation) ou au niveau individuels (changement de vêtements, d'activité etc.). Cependant, *(BONTE, 2014)* présente dans sa thèse quelques aspects intéressants à ce sujet.

III.2.1. Modéliser le comportement des individus

Le comportement des individus est souvent mis en cause pour expliquer les écarts de consommation énergétique entre les simulations et les mesures *in situ*. Or la modélisation du comportement de l'individu est complexe. En une heure, pas de temps de la simulation, beaucoup de comportements adaptatifs peuvent avoir eu lieu. *(VORGER, 2014)* dans son état de l'art présente trois approches permettant de modéliser le comportement de l'individu : l'approche déterministe, l'approche orientée agent basée sur le confort thermique et l'approche stochastique.

L'approche déterministe est classiquement celle qui est adoptée dans les logiciels de thermique dynamique comme Pléiades+COMFIE. Le concepteur détermine un ensemble de scénarios définissant l'occupation des pièces, les apports internes, les débits de ventilation, les températures consignes, les taux de fermeture des occultations… Il retrace, heure par heure, un comportement prédéfini sur une semaine puis sur l'année complète. C'est sur cette base que sont définis les comportements standardisés intégrés dans le calcul réglementaire de la RT 2012.

D'autres modèles plus complexes se basent sur la puissance de l'informatique et de la programmation pour déterminer le comportement de l'individu. *(MOUJALLED, 2007)* a développé un modèle dynamique du confort thermique. Sur la base de l'état thermique de l'individu, des boucles de rétroactions permettent de définir dans une liste d'actions (correspondants à des opportunités adaptatives) les évènements qui vont être réalisés. Le modèle a ensuite été intégré dans le logiciel de thermique dynamique TRNSYS. *(BONTE, 2014)* se base sur

des plans d'expérience pour montrer l'importance de la prise en compte du comportement des individus dans les simulations de thermique dynamique. Il propose ensuite une modélisation du comportement par l'intermédiaire d'un algorithme d'intelligence artificielle. Le système est soumis à un environnement thermique. En fonction de la sensation thermique calculée, si un inconfort est constaté, une réaction est déclenchée. Après une phase d'apprentissage le système est capable de déterminer les actions qui seront efficaces pour atteindre le confort. Enfin, *(LANGEVIN, WEN, et GURIAN, 2015)* utilisent l'approche orientée agents basée sur la sensation thermique pour définir le comportement de l'occupant. Cette méthode modélise un système composé d'agents autonomes, ici les occupants. Les agents sont des logiciels autonomes avec des caractéristiques définies (habillement, métabolisme, habitudes comportementales, niveau de sensation thermique acceptable…) qui peuvent interagir entre eux. Ils ont un objectif : maintenir une sensation thermique acceptable. Ils évoluent dans un environnement : un bâtiment dont les spécificités permettent de définir les opportunités adaptatives et les conditions climatiques intérieures.

L'approche stochastique se base sur des statistiques pour déterminer les situations dans lesquelles l'individu a une grande probabilité d'actionner sa fenêtre, son volet… pour rétablir son confort. Dans sa thèse *(VORGER, 2014)* utilise des enquêtes sur l'emploi du temps et des statistiques du recensement de la population faites par l'Insee[7] pour déterminer le comportement adaptatif des individus. Grâce au développement de plusieurs modèles stochastiques, sur les ouvrants, les thermostats, l'éclairage, etc., il détermine ainsi des scénarios de comportements qui peuvent ensuite être ajoutés dans les logiciels de simulation de thermique dynamique. *(ZARAKET, 2014)* se base sur une approche stochastique de l'activité des occupants pour déterminer leurs consommations d'énergie. Ainsi une relation est faite entre les caractéristiques du ménage et celles de leurs appareils électroménagers sur la base de données statistiques nationales ce qui permet de simuler la consommation d'énergie pour un ménage spécifique.

III.2.2. Actions sur les fenêtres

Parmi les différentes actions adaptatives que l'occupant peut entreprendre *(FABI et al., 2012)* ont montré que l'action sur la fenêtre a une grande influence sur les consommations d'énergie, le confort et la qualité de l'air intérieur car le taux de renouvellement d'air est modifié.

(BRUNDRETT, 1977) affirme que le mode d'ouverture/fermeture de la fenêtre qu'une famille adopte dépend de la météo et des caractéristiques de la famille. Les fenêtres sont progressivement fermées dès que l'hiver arrive et ré-ouvertes dès que le climat est plus clément. Ils trouvent que l'ouverture des fenêtres est corrélée à la température moyenne journalière mais aussi que les ménages « actifs » les ouvrent moitié moins souvent que les foyers où une personne est inactive.

(ANDERSEN et al., 2013) ont montré, en étudiant les mesures faites dans 15 logements danois pendant huit mois, que les pratiques d'ouverture/fermeture des fenêtres étaient différentes en fonction du type de logement. La concentration en CO_2 et la température extérieure sont les deux variables principales permettant d'expliquer les probabilités d'actions sur les fenêtres. *(WARREN et PARKINS, 1984)* avaient déjà souligné, par l'étude de cinq bâtiments de bureaux sur trois mois avec des conditions climatiques différentes, que l'ouverture des fenêtres était corrélée avec la température extérieure et dans une moindre mesure avec le rayonnement solaire et la vitesse du vent. Ils ont également déterminé que l'utilisation de la fenêtre était due au besoin d'une bonne qualité de l'air intérieur et au besoin de contrôler la température intérieure notamment en été.

[7] Insee : Institut National de la Statistique et des Études Économiques

Cependant, (HALDI et ROBINSON, 2008 ; 2009) ont étudié huit bâtiments de bureaux en Suisse, en été, par l'intermédiaire d'enquêtes et ont trouvé que les occupants actionnent leur fenêtre pour des ambiances thermiques modérées. La température intérieure semble être le facteur qui influence l'ouverture/fermeture des fenêtres mais les auteurs nuancent le propos en disant que la température extérieure peut également être un facteur influençant la mise en place d'une sur-ventilation naturelle.

Ces écarts d'analyse peuvent, peut-être, être expliqués par (FABI et al., 2012) qui ont mis en évidence que la plupart des études prennent en compte davantage l'état de la fenêtre que la transition entre l'ouverture et la fermeture. Dans le premier cas, la recherche de corrélations entre l'état de la fenêtre et les paramètres de l'environnement intérieur est faussée. En effet, ces derniers sont reliés au taux de renouvellement d'air. Il est donc plus judicieux d'étudier la corrélation entre la transition ouvert/fermé ou inversement en connaissant les caractéristiques thermiques avant que l'action n'intervienne.

(RAJA et al., 2001) ont étudié 15 bâtiments de bureaux au Royaume-Uni, les résultats montrent qu'à partir d'une température intérieure de 20 °C, le nombre de fenêtres ouvertes augmente jusqu'à atteindre 100 % pour une température de 27 °C. De plus la température extérieure semble également intervenir car en dessous de 15 °C, les fenêtres sont fermées et quand elle excède 25 °C, elles sont ouvertes. (HERKEL, KNAPP, et PFAFFEROTT, 2008) ont réalisé la même étude et ont continué les analyses pour montrer que la période de demi saison correspond à une forte augmentation ou diminution du pourcentage de fenêtres ouvertes ce qui laisse supposer que c'est le premier jour de froid ou de chaud qui est le déclencheur de changement du comportement sur une année. De plus, en été, les fenêtres sont laissées ouvertes plus longtemps ce qui diminue le nombre d'ouverture/fermeture. Par contre le changement d'état de la fenêtre est plus fréquent en demi-saison, surement à cause des conditions météorologiques qui sont plus changeantes. Ils montrent également que l'ouverture des fenêtres est fortement corrélée à l'arrivée des occupants dans leurs bureaux. (BONTE, 2014) souligne également cette particularité.

Dans les bâtiments résidentiels, et d'après les études que nous venons de citer, (FABI et al., 2012), par la prise en compte de plusieurs articles portant sur les pratiques des occupants sur les fenêtres, montrent que les paramètres les plus influents sont :

- au niveau physiologique : l'âge et le sexe,
- au niveau psychologique : la luminosité perçue et l'ambiance thermique préférée
- au niveau social : la présence et la cigarette
- au niveau environnement physique : la température extérieure, la température intérieure, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et la concentration de CO_2
- au niveau contextuel : le type de logement, le type de pièce, l'orientation des pièces, le type de ventilation, le système de chauffage, la saison et l'heure de la journée

III.2.3. Actions sur les protections solaires

Les vitrages permettent d'ouvrir les espaces sur l'extérieur mais aussi de profiter des apports solaires. La gestion des protections solaires est alors essentielle afin de bénéficier de ces apports en hiver et de s'en protéger en été. De plus elles permettent de limiter l'éblouissement. Le volet ou les protections solaires sont donc de véritables éléments architecturaux améliorant ou dégradant le confort thermique et/ou visuel. Il existe une multitude de typologies de protections solaires, allant du volet à battant, au store électrique en passant par les brise-soleils orientables… (VAN DEN WYMELENBERG, 2012) par l'analyse de plusieurs études montre qu'il existe différents facteurs

conduisant à la modification de la position des occultations. L'étude de la position des volets peut se faire selon trois façons : l'étude des photographies des façades prises à plusieurs moments de la journée, des enquêtes basées sur des déclarations ou des mesures par l'intermédiaire de capteurs.

L'orientation de la façade semble être un des facteurs déterminant *(RUBIN, COLLINS, et TIBBOTT, 1978 ; REA, 1984 ; INOUE et al., 1988 ; PIGG, EILERS, et REED, 1996 ; INKAROJRIT, 2005 ; MAHDAVI, 2009 ; DAY, THEODORSON, et VAN DEN WYMELENBERG, 2012)*. Il semble que les fenêtres de la façade Sud soient celles qui sont le plus occultées et au contraire celles de la façade Nord sont celles qui le sont le moins. Les fenêtres situées sur la façade Est sont occultées le matin alors que celles de la façade Ouest le sont le soir. Cette variabilité dans la gestion des occultations a engendré l'hypothèse suivant laquelle l'utilisation des protections solaires est liée à la protection contre le rayonnement solaire direct qui peut engendrer des inconforts visuels ou thermiques. Cette hypothèse a d'ailleurs été validée par les enquêtes de *(PIGG, EILERS, et REED, 1996)* qui ont montré que les raisons principales des actions sur les occultations étaient la réduction de la lumière directe et la réduction de l'éblouissement sur les écrans d'ordinateurs. *(RAJA et al., 2001)* et *(REINHART et VOSS, 2003)* valident également l'hypothèse selon laquelle l'action sur les occultations se fait en fonction de la pénétration du soleil dans la pièce.

Toujours d'après *(VAN DEN WYMELENBERG, 2012)*, le second facteur ayant une influence sur la position des occultations est la saison *(INKAROJRIT, 2005)*. *(NICOL, WILSON, et CHIANCARELLA, 2006)* dans leur étude montrent qu'en hiver, 14 à 18 % des volets sont fermés, 34 à 40 % le sont au printemps, 34 à 42 % le sont en été et 28 à 36 % le sont en automne. Les changements que l'on peut observer suivant les saisons peuvent également être liés à la météo. En effet, plusieurs études *(REA, 1984 ; NICOL, WILSON, et CHIANCARELLA, 2006)* montrent que suivant le type de ciel (ensoleillé, intermédiaire, couvert), les occultations sont dans des positions différentes. Elles sont majoritairement ouvertes lors de journées nuageuses et fermées lors de journées ensoleillées ce qui confirme l'hypothèse précédente : les occultations permettent de se protéger du rayonnement solaire direct. *(MAHDAVI, 2009)* relie alors la fréquence d'action sur les occultations avec l'irradiation globale verticale incidente sur la façade.

Les fenêtres permettent de voir dehors lorsque l'on est à l'intérieur mais aussi de voir dedans lorsque l'on est à l'extérieur, notamment le soir lorsque la lumière est allumée. Les notions de vue sur l'extérieur et d'intimité ont été étudiés par *(RUBIN, COLLINS, et TIBBOTT, 1978)*. Les occultations quand elles sont fermées, ne le sont pas totalement pour conserver un minimum de vue sur l'extérieur tout en se protégeant de la vue des personnes extérieures. C'est un compromis qui est trouvé. Ils ont également montré qu'une fois que le réglage optimum a été trouvé par l'occupant, la position des occultations n'est plus modifiée au cours de la journée ou d'un jour à l'autre. Ce qui explique que dans certaines études on trouve des locaux, notamment dans des bureaux, où les occultations ne sont jamais utilisées et sont le plus souvent laissées ouvertes *(PIGG, EILERS, et REED, 1996 ; NICOL, WILSON, et CHIANCARELLA, 2006)*. Cependant, *(CORREIA DA SILVA, LEAL, et ANDERSEN, 2013)* et *(BONTE, 2014)* ont montré que l'ouverture des occultations est liée à l'arrivée d'un occupant et au contraire la fermeture est liée à son départ.

(KIM et al., 2009) et *(REINHART et VOSS, 2003)* ont analysé l'effet de l'utilisation de volets motorisés face à des volets manuels. Il semble que les volets motorisés sont plus souvent utilisés, ce qui est en accord avec la notion d'opportunité adaptative que nous avons vu précédemment. En effet, ouvrir un volet motorisé constitue une opportunité plus élevée que si on doit manipuler les occultations car l'individu a plus de facilités pour agir sur son environnement.

(HALDI et ROBINSON, 2008) montre que la température intérieure joue un rôle important dans la prédiction des actions sur les occultations ce qui laisse supposer que les occupants réagissent

à l'inconfort thermique. Les analyses précédentes laissent cependant penser que la réaction à un inconfort thermique n'est pas le facteur majeur pour étudier le comportement des occupants face à leurs occultations. Cependant, l'utilisation des occultations permet de réduire les apports solaires qui peuvent conduire à un inconfort notamment en été. L'analyse des pratiques est donc essentielle pour limiter les surchauffes estivales.

Si la plupart des études sur la position des occultations sont faites sur des bâtiments de bureaux, il semble cependant, que les principaux facteurs influençant le comportement sont l'orientation de la façade et la météo car cela influe fortement sur le confort visuel et dans une moindre mesure sur le confort thermique. Cependant, il existe à ce sujet de fortes variations entre individus. Les notions d'intimité et de vues sur l'extérieur sont des facteurs psychologiques qui peuvent alors devenir dominants dans la gestion des occultations dans l'habitat.

Conclusion

Depuis la prise de conscience de la raréfaction des ressources et du réchauffement climatique, la France s'est engagée dans une politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre et des consommations d'énergie. Le secteur du bâtiment est, aujourd'hui, le secteur qui consomme le plus d'énergie. Des efforts importants sont réalisés dans le but de réduire la consommation énergétique des bâtiments neufs. Cependant, alors que le parc existant est le plus conséquent (33,4 millions de logements existants contre 346 642 logements construits en 2012 (*ADEME, 2013*)), la réglementation en vigueur n'impose pas des rénovations aussi performantes que la prescription prévue pour les bâtiments neufs.

La réduction des consommations énergétiques est un enjeu majeur mais elle ne doit pas se faire au détriment du confort des occupants. De nombreuses recherches ont été réalisées dans le but de définir de manière analytique les situations de confort. Elles dépendent principalement de quatre paramètres environnementaux (température de l'air, température de rayonnement, vitesse de l'air, humidité relative) et deux paramètres individuels (vêture et métabolisme). Mais la mesure de ces paramètres peut être difficile dès lors que l'on sort de chambres climatiques. De plus, les enquêtes sur le confort *in situ* ont montré que suivant les possibilités d'actions des individus, le confort pouvait être différent. Une autre méthode de définition du confort, que nous utilisons dans la suite de l'étude, a donc été développée : le confort adaptatif.

Le comportement des individus est souvent mis en cause dans les écarts de consommations énergétiques entre les modèles et la réalité. Deux actions sont souhaitables pour réduire ces écarts. La première serait que les individus aient des comportements plus vertueux et la seconde que la modélisation du comportement humain soit plus proche de la réalité. Or le changement du comportement des individus est complexe. Il demande une réorganisation des habitudes quotidiennes, qui ne peut avoir lieu que sur plusieurs années grâce à la mise en place de politiques d'incitation, de sensibilisation… De plus l'effet rebond peut engendrer un effacement des gains potentiels. Si les comportements individuels sont difficilement modifiables, l'idée est alors d'étudier le comportement des occupants afin de les intégrer dans les simulations de thermique dynamique pour proposer des modèles plus proches de la réalité.

Cet état de l'art aborde de nombreux domaines liés à la relation entre l'homme et son habitat. Les relations sont complexes et demandent une étude approfondie afin de comprendre les actions de l'occupant pour que les concepteurs puissent les prendre en compte lors de propositions de programmes de réhabilitation ou de stratégies de conception architecturale sources d'économies d'énergie et de réduction de l'inconfort.

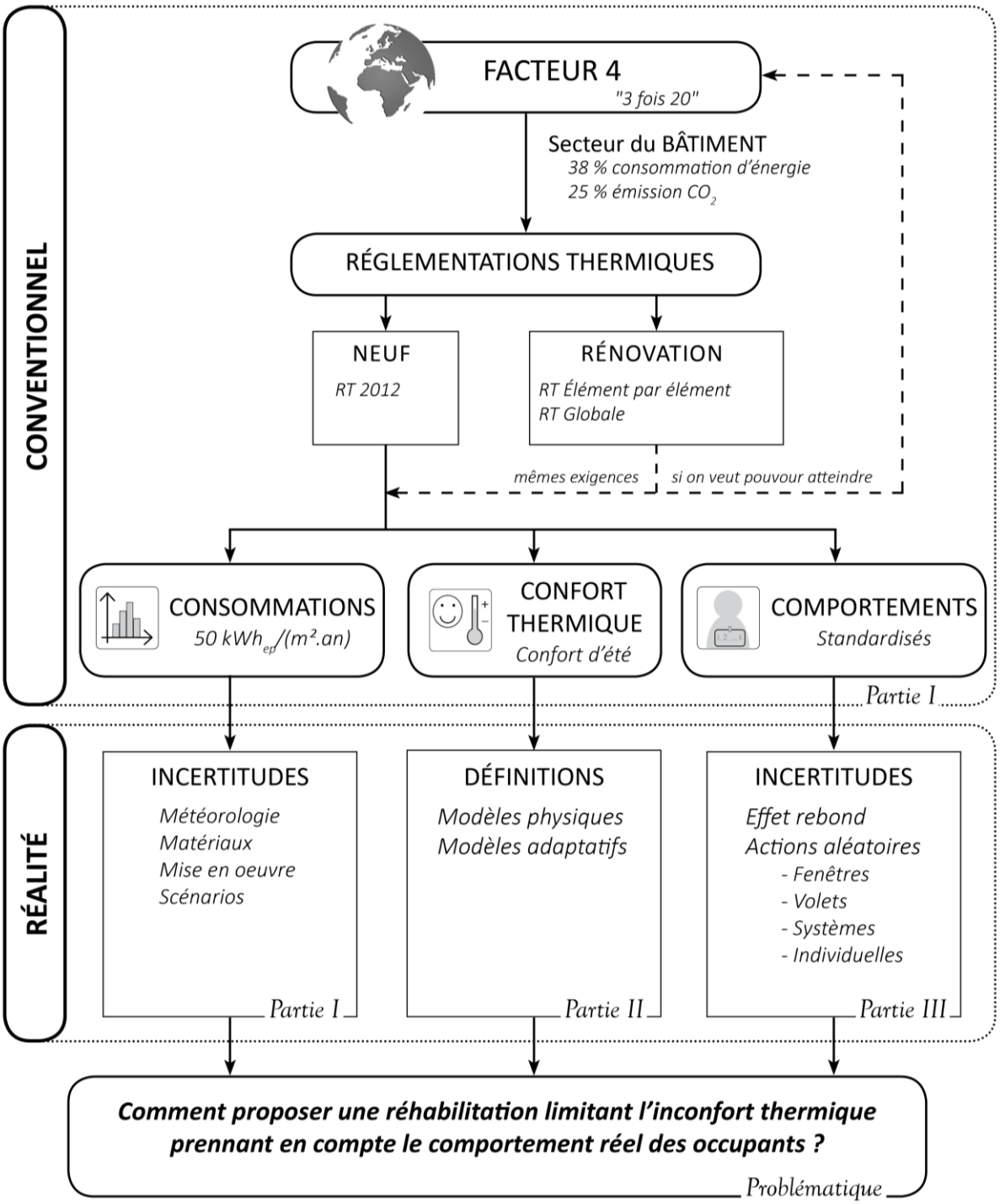


FIGURE 1.9 : *Schéma conclusion du chapitre 1 de l'auteur*

Chapitre 2 : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE D'ÉTUDE DE L'AMBIANCE THERMIQUE, DU CONFORT ET DU COMPORTEMENT INDIVIDUEL

« If you can not measure it, you can not improve it. »

Lord Kelvin

Introduction

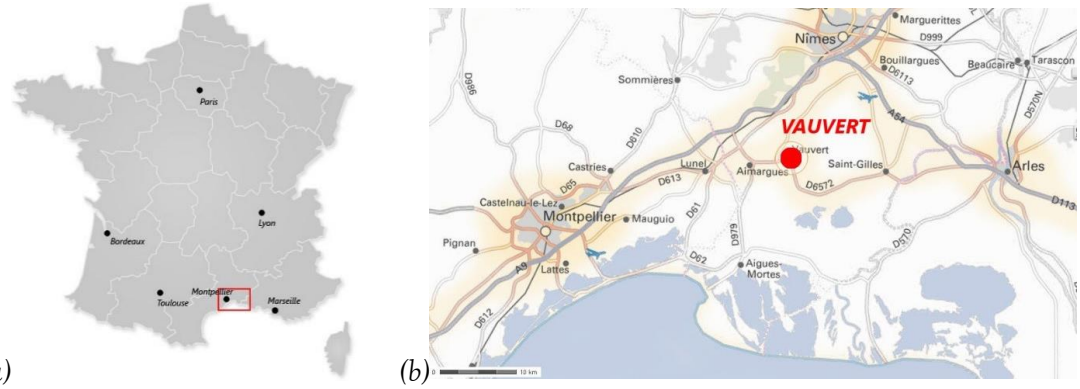
D'après ce que nous venons de voir, les pratiques des habitants peuvent être mises en cause dans la dégradation des performances énergétiques des bâtiments. Notre objectif est donc d'estimer ces comportements, notamment ceux concernant la fenêtre et le volet, pour les modéliser et les intégrer lors des simulations de thermique dynamique. Pour cela, nous avons mis en place une instrumentation au sein d'appartements occupés dans deux résidences aux caractéristiques constructives similaires. Dans un premier temps, nous décrivons le site étudié, puis nous explicitons la démarche entreprise afin d'identifier des appartements à instrumenter. Pour finir, nous précisons le protocole expérimental instauré au sein des logements afin d'étudier les pratiques des occupants ainsi que leur confort, l'ambiance thermique et les consommations énergétiques.

I. Description du site d'étude

Nous étudions deux résidences situées à Vauvert (30). Elles appartiennent aux deux bailleurs sociaux partenaires du projet (la SEMIGA et Un toit pour tous). Nous analysons au cours de ce paragraphe leurs contextes, leurs caractéristiques et leur environnement climatique afin d'obtenir les informations nécessaires à la réalisation de simulations de thermique dynamique.

I.1. Localisation

L'étude se concentre sur la commune de Vauvert (Gard, 30), les deux bailleurs sociaux partenaires de cette étude ayant des résidences dans cette commune. Située dans le Sud de la France, dans la région Languedoc-Roussillon, la ville de Vauvert est proche des grandes agglomérations : Montpellier (45 km), Nîmes (20 km) et Arles (35 km). Grâce à sa proximité avec la mer Méditerranée (une trentaine de kilomètres), elle est soumise au climat Méditerranéen (avec des hivers doux et humides et des étés chauds et secs) et profite de la brise marine permettant de rafraîchir les espaces habités pendant l'été.

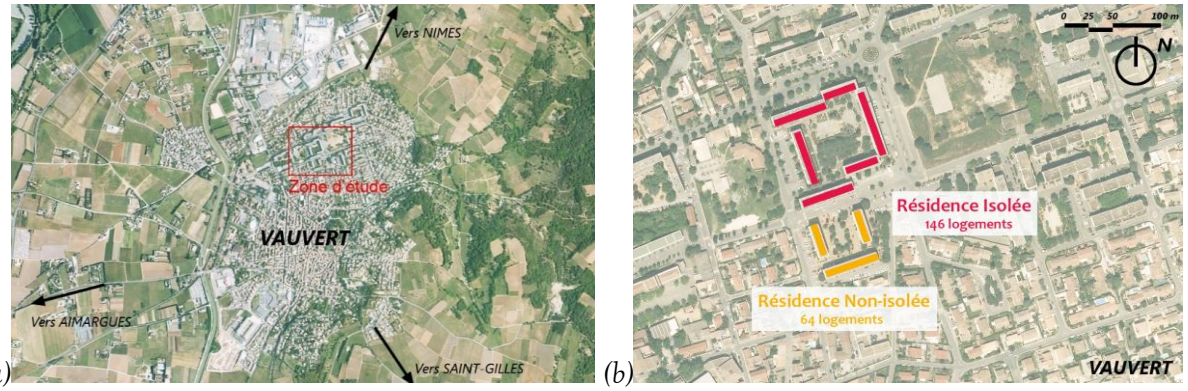


(a) *(b)*

FIGURE 2.1 : *Localisation de Vauvert sur la carte (a) de France et (b) régionale*
Géoportail.gouv.fr et l'auteur

I.2. Typologie de bâtiments et d'appartements

La ville de Vauvert est composée d'un centre ancien qui s'est développé dans les années 1950-60 suite à la forte augmentation de la main d'œuvre dans la viticulture et dans les usines (Perrier, Royal Canin). Ce développement économique a permis à la création de zones pavillonnaires et d'immeubles de petites hauteurs (principalement en R+4). Vauvert, en ville dortoir, a ainsi accueilli de nombreux employés de ces secteurs florissants. Aujourd'hui les logements sociaux sont insérés dans un tissu urbain composé essentiellement d'habitats individuels.



(a) (b)

FIGURE 2.2 : *Situation de la zone d'étude (a) sur la commune de Vauvert et (b) dans le tissu urbain proche*
Géoportail.gouv.fr et l'auteur

Nous étudions deux résidences situées au Nord de Vauvert issues d'un même programme immobilier. Elles ont donc des typologies d'appartements et des orientations identiques. Par la suite, le programme a été divisé en deux résidences réparties aujourd'hui entre les deux bailleurs sociaux partenaires de l'étude. Seule la rue Albert Camus les sépare, elles sont donc soumises aux mêmes conditions climatiques. Cependant, au fil des années les résidences ont subi des rénovations différentes résumées dans le *tableau 2.1*. La principale différence est leur isolation. En effet, l'une a été depuis isolée thermiquement par l'extérieur (I.T.E.). Nous la nommons dans la suite de l'étude « résidence isolée ». Elle est composée de huit bâtiments nommés de A à G (*Figure 2.3*) qui abritent 146 logements (du T1 au T5). La seconde résidence est nommée « résidence non-isolée » même si le dispositif constructif initial fait état d'une faible isolation (panneaux sandwichs avec 3 cm de polystyrène expansé). Elle est composée de trois bâtiments nommés de I à K avec 64 logements (du T3 au T5).

	Résidence Non-isolée	*Résidence Isolée*
Mur	Panneau Sandwich - 7,5 cm béton, - 3 cm polystyrène expansé, - 7,5 cm béton	Panneau Sandwich + I.T.E. 8 cm
Fenêtre	Double Vitrage P.V.C.	
Volet	Accordéons P.V.C.	Store électrique P.V.C.
Chaudière	Chaudière à Condensation à Ventouse	
Thermostat	Non Programmable	Programmable
Radiateur	À eau chaude	
Ventilation	V.M.C. Hygro A	

TABLEAU 2.1 : *Tableau expliquant les différentes rénovations des deux résidences étudiées*
de l'auteur

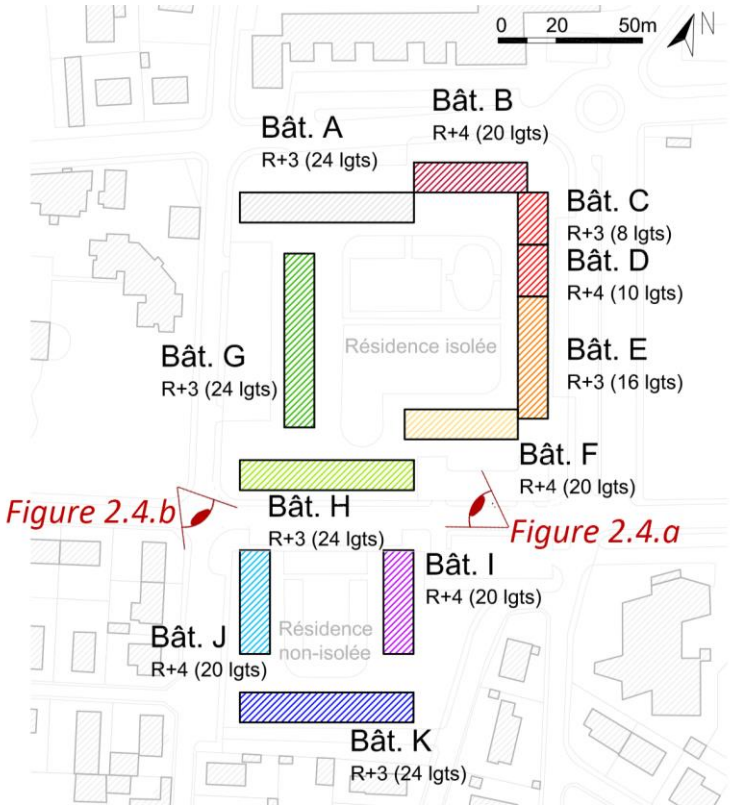


FIGURE 2.3 : *Répartition des immeubles des deux résidences*
de l'auteur

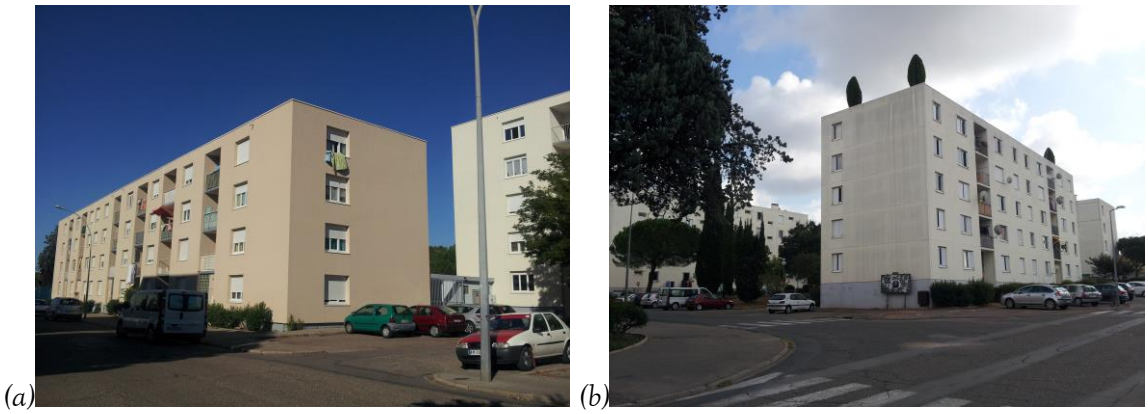


FIGURE 2.4 : *Photographies des résidences (a) isolées (bât. H) et (b) non-isolées (bât.t J)*
de l'auteur

I.3. Environnement climatique

I.3.1. Choix d'une station météorologique

Nous avons vu dans le *premier chapitre* que le confort thermique et les actions adaptatives qui en découlent sont fortement liés aux conditions climatiques extérieures. La mesure *in situ* des paramètres climatiques extérieurs est complexe. En effet, la prise de mesure doit se faire dans des

conditions particulières (secteur dégagé, sol herbeux, sous abri,…[8]) et les données que nous souhaitons obtenir pour pouvoir faire des simulations de thermique dynamique sont plutôt complexes à obtenir. Nous avons alors mis en place un partenariat avec Météo-France.

La station météorologique de Vauvert, gérée par l'Office National des Forêts, n'était plus active pendant la période d'instrumentation. Afin de choisir les données météorologiques les plus représentatives du site d'étude, nous avons comparé ses données sur la période 1996 à 2001 (période d'activité) avec trois stations situées à proximité : Nîmes-Garons (13,4 km), Nîmes-Courbessac (22,8 km) et Fréjorgues (29,2 km), toutes trois gérées par Météo-France. Cette comparaison nous permet de choisir le fichier météo représentatif des données locales. Pour vérifier notre analyse, nous avons également placé un capteur sur le balcon d'un des locataires. Ce capteur est positionné à l'abri des rayonnements directs du soleil et de la pluie.

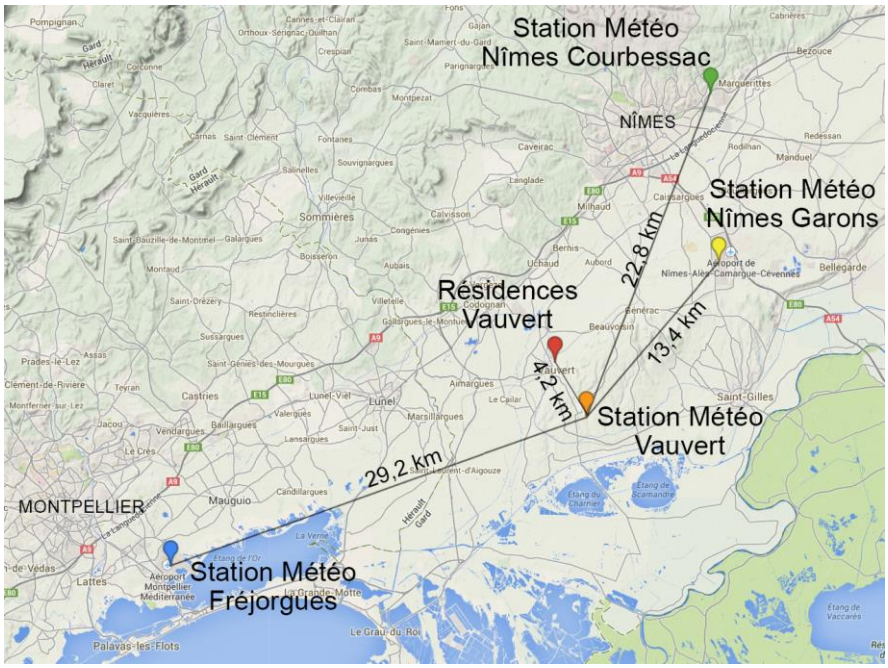


FIGURE 2.5 : *Géolocalisation des stations météorologiques par rapport aux résidences étudiées*
Google maps et l'auteur

Pour la réalisation des simulations de thermique dynamique nous avons besoin des données suivantes :

- la température sous abri, en °C,
- l'humidité relative, en % (nécessaire pour la comparer avec l'humidité relative intérieure),
- le rayonnement global horizontal, en J/cm²,
- le rayonnement diffus horizontal (qui peut être estimé à partir du coefficient d'insolation, sans unité, avec Pléiades+COMFIE),
- l'orientation et la vitesse du vent

D'après le tableau suivant, seules les stations météorologiques de Nîmes-Courbessac et de Fréjorgues semblent avoir les données nécessaires pour la suite de notre étude.

[8] http://www.infoclimat.fr/dossiers-meteo-2-normes-d-installation-d-une-station-meteo-personnelle.html

Données Météo-France	VAUVERT		NÎMES GARONS		NÎMES COURBESSAC		FRÉJORGUES	
Émetteur	Office National des Forêts		Météo France		Météo France		Météo France	
Coordonnées GPS	4°18'12''E 43°39'54''N		4°24'42''E 43°45'24''N		4°24'18''E 43°51'24''N		3°57'42''E 43°34'36''N	
Altitude (m)	50		92		59		2	
Année étudiée	1996 à 2001	2014	1996 à 2001	2014	1996 à 2001	2014	1996 à 2001	2014
Température sous abri	X		X	X	X	X	X	X
Humidité relative	X		X	X	X	X	X	X
Rayonnement Global	X					X		X
Coefficient d'insolation					X	X	X	X
Orientation et vitesse du vent	X		X	X	X	X	X	X

TABLEAU 2.2 : *Données disponibles pour les quatre stations météorologiques étudiées sur la période 1996 – 2001 et 2014*
de l'auteur

Une première analyse des fichiers météorologiques a été basée sur la comparaison des degrés jours unifiés (DJU) sur une base de 18 °C. Calculés sur une période allant du 1er octobre au 20 mai, les DJU_{18} caractérisent la sévérité de l'hiver. Ils représentent la somme des écarts positifs des températures moyennes journalières de la durée précédente par rapport à un seuil ici : 18 °C.

$$Si\ 18 > \frac{\mathrm{Tej}_{max}(t) + \mathrm{Tej}_{min}(t)}{2}$$
$$alors : \boldsymbol{DJU_{18}} = \int \left(18 - \frac{\mathrm{Tej}_{max}(t) + \mathrm{Tej}_{min}(t)}{2}\right).dt \qquad \text{[Éq. 2.1]}$$

- DJU_{18} : *Degré-Jours Unifiés base 18, °C.j*
- Tej_{max} : *Température extérieure journalière maximale, °C*
- Tej_{min} : *Température extérieure journalière minimale, °C*
- t : *Temps, j*

La comparaison des différentes années étudiées montre une diminution des DJU_{18} d'année en année. L'analyse du *tableau 2.3* semble mettre ainsi en évidence un réchauffement climatique en hiver sur cette durée. La comparaison des données de chacune des stations avec la station de Vauvert nous montre que les mesures des stations de Nîmes-Courbessac et de Nîmes-Garons sont les plus proches de celles de Vauvert durant la période de chauffe en hiver. Les écarts respectifs sont de -21 °C.j et +20 °C.j.

DJU_{18}	VAUVERT	COURBESSAC		GARONS		FREJORGUES	
	V	C	C - V	G	G - V	F	F - V
2000	1535	1526	-9	1555	19	1498	-37
1999	1720	1658	-63	1710	-10	1583	-138
1998	1745	1754	9	1795	50	1690	-55
MOYENNE	1667	1646	-21	1687	20	1590	-77

TABLEAU 2.3 : *Comparaison des DJU_{18} pour quatre stations météorologiques et sur trois ans d'après Météo-France*

Pour étudier la période d'été, nous avons calculé le degré-heure (DH) sur une base de 25 °C. Cela correspond au nombre d'heures entre le 20 mai et le 1er octobre où la température dépasse un certain seuil, ici 25 °C. Il s'agit alors du nombre d'heure où l'individu serait en situation d'inconfort et aurait tendance à climatiser. Comme pour l'hiver les DH_{25} diminuent d'année en année comme indiqué dans le *tableau 2.4*. Les données de la station de Nîmes-Garons semblent être les plus représentatives, avec un écart moyen de 68 °C.h contre 808 °C.h pour Nîmes-Courbessac et -454 °C.h pour Fréjorgues.

$$Si\ \mathrm{Te}(t) > 25$$

$$alors : \boldsymbol{DH_{25}} = \int [\,Te(t) - 25].\,dt \qquad \text{[Éq. 2.2]}$$

- DH_{25} : *Degré-Heures base 25, °C.h*
- *Te* : *Température extérieure horaire, °C*
- *t* : *Temps, h*

DH_{25}	VAUVERT	COURBESSAC		GARONS		FREJORGUES	
	V	C	C - V	G	G - V	F	F - V
2000	2054	2631	577	1953	-102	1499	-555
1999	2159	2901	742	2190	30	1694	-465
1998	2664	3771	1107	2940	276	2323	-341
MOYENNE	2293	3101	808	2361	68	1839	-454

TABLEAU 2.4 : ***Comparaison des degré-heures base 25 pour quatre stations et pour trois années***
d'après Météo-France

À Vauvert, la température moyenne est de 14,6 °C avec un écart type moyen de 7,3 entre 1998 et 2000, ce qui reste élevé (cf. *Annexe A*). La température étant un phénomène changeant au cours du temps mais plutôt stable spatialement, des corrélations avec des stations proches sont envisageables. En analysant les moyennes des écarts, il semble que les données de Nîmes-Garons soient plus proches de celles de Vauvert avec un écart moyen de -0,1 °C. L'écart minimum (-5,3 °C), l'écart maximum (6,3 °C) et l'écart type (1,2 °C) sont également les plus faibles à Nîmes-Garons. Les données de Fréjorgues sont les plus éloignées de celles de Vauvert et celles de Nîmes-Courbessac sont intermédiaires aux deux stations précédentes. Les écarts importants (+ ou -6 °C en moyenne) laissent cependant supposer des variations importantes à certains moments de l'année.

La *figure 2.6* pour la station de Nîmes-Garons met en évidence un effet de site. Nous remarquons qu'en moyenne en hiver, les températures de Vauvert sont plus élevées qu'à la station étudiée et inversement en été. L'analyse des données de la station de Nîmes-Courbessac montre des écarts accentués (*Figure 2.7*). Au contraire à Fréjorgues, l'effet de site semble atténué. Les écarts sont sensiblement les mêmes tout au long de l'année (*Figure 2.8*), mais, comme nous avons vu précédemment, sur l'année c'est la station la moins représentative.

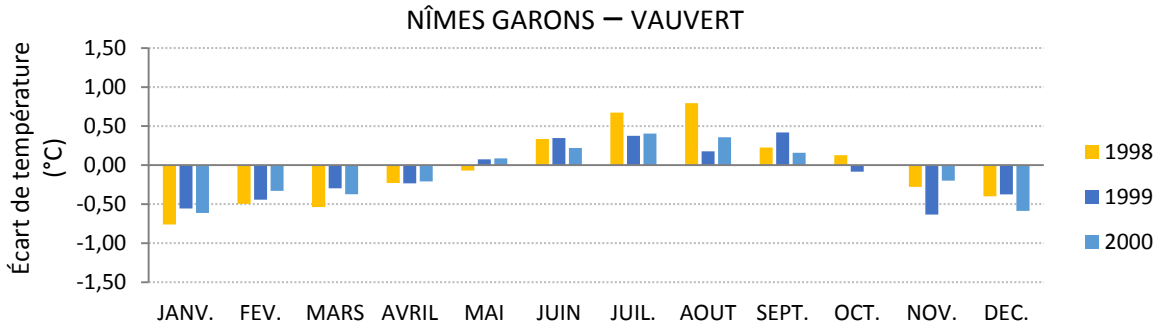


FIGURE 2.6 : *Écarts sur trois années des moyennes mensuelles de température entre les stations de Nîmes-Garons et Vauvert*
Source : de l'auteur

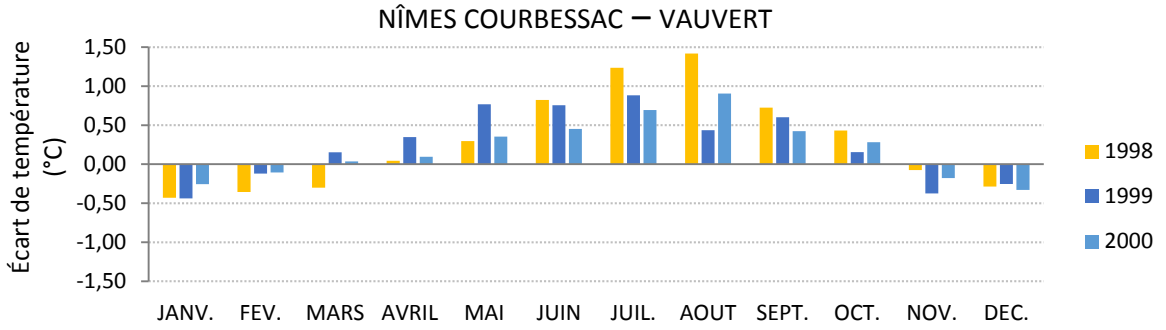


FIGURE 2.7 : *Écarts sur trois années des moyennes mensuelles de température entre les stations de Nîmes-Courbessac et Vauvert*
Source : de l'auteur

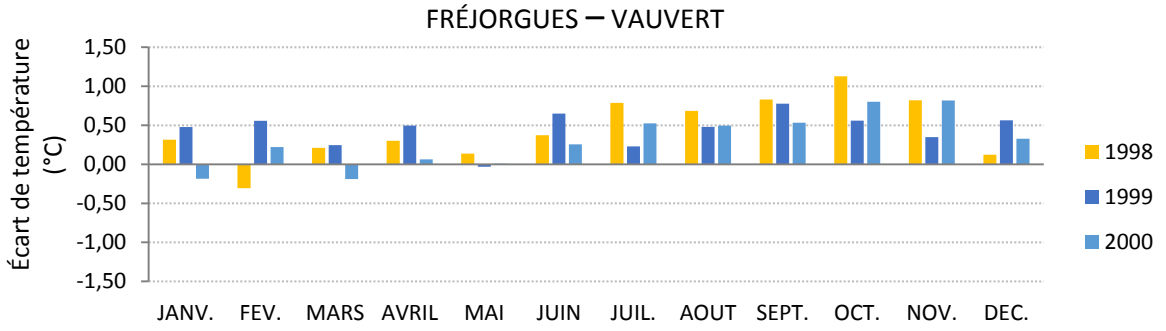


FIGURE 2.8 : *Écarts sur trois années des moyennes mensuelles de température entre les stations de Fréjorgues et Vauvert*
Source : de l'auteur

La station météorologique de Nîmes-Garons semble être la plus représentative des données de Vauvert. Cependant, certaines données sont manquantes, notamment le rayonnement global et le coefficient d'insolation. Afin d'éviter de reconstituer un fichier avec des mesures partielles ou en pondérant les différentes données, nous utilisons les données de la station de Nîmes-Courbessac afin de caractériser la ville de Vauvert malgré la présence d'un petit effet de site.

I.3.2. Étude du fichier climatique

L'analyse des températures hebdomadaires sur la *figure 2.9* montre que la 24ème semaine a été la plus chaude avec une température moyenne de 26,5 °C (maximum : 37,2 °C /minimum : 15,3 °C). Elle s'étend du 8 au 14 juin 2014. Au contraire la 53ème semaine est la plus froide avec une température moyenne de 3,7 °C (maximum : 8,0 °C /minimum : -0,3 °C).

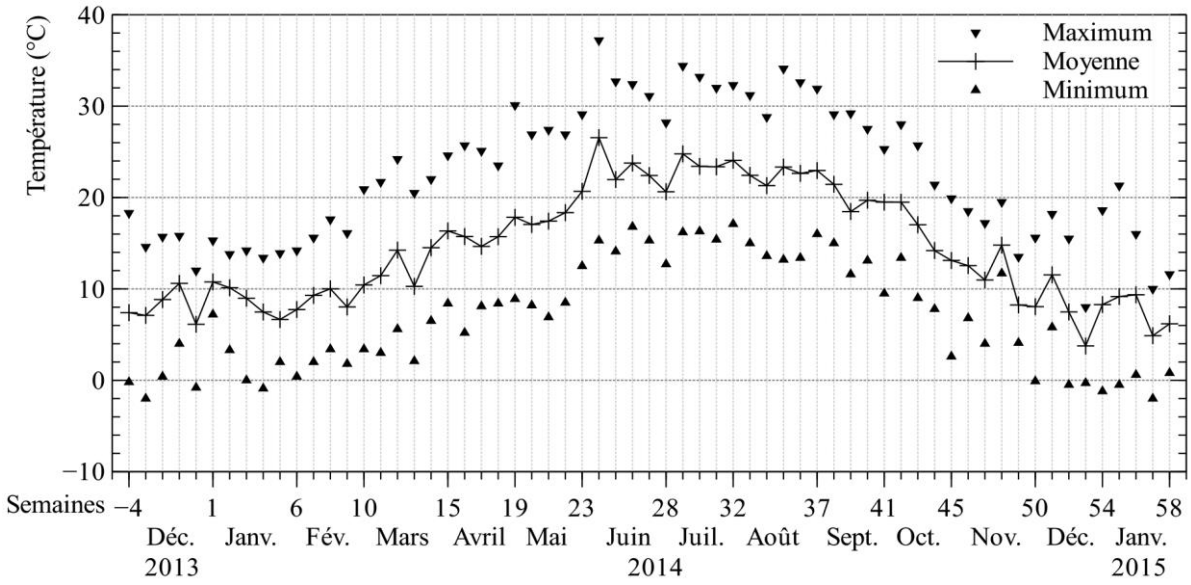


FIGURE 2.9 : *Analyse hebdomadaire des températures de la station de Nîmes-Courbessac de l'auteur grâce au fichier météo de Nîmes-Courbessac de Météo France*

L'année 2014 a été une année particulière. En effet, l'étude des températures mensuelles de Nîmes-Courbessac (*Figure 2.10*) montre qu'en hiver elles ont été plus élevées, et en été plus faibles, que la moyenne des années précédentes. Cette réduction d'amplitude des températures ne nous est pas favorable car, il y a eu peu de période de surchauffe au sein des appartements. Il est alors difficile d'étudier les pratiques des individus dans les cas extrêmes.

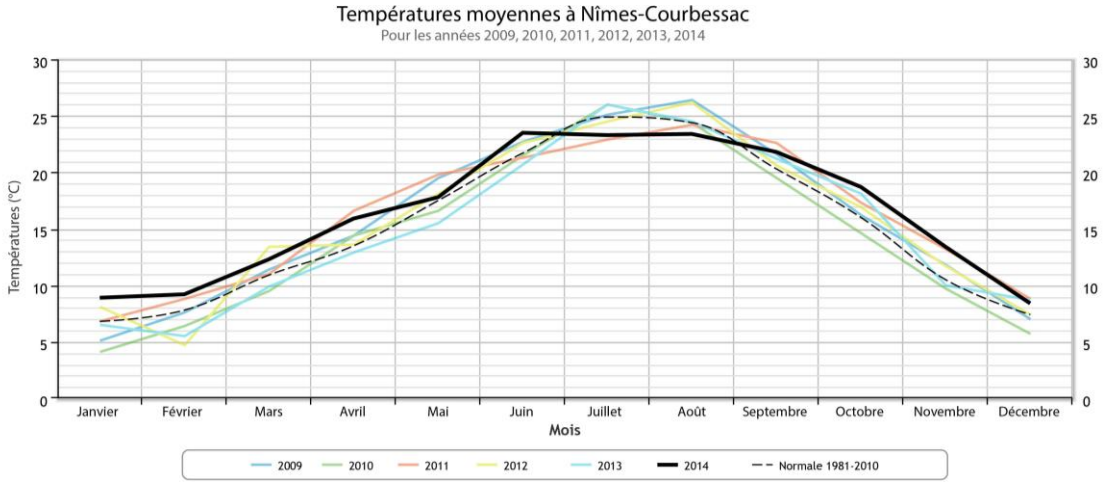


FIGURE 2.10 : *Comparaison des températures moyennes entre 2009 et 2014 à Nîmes-Courbessac*
infoclimat.fr

Afin d'identifier des périodes d'études homogènes nous avons analysé les températures mensuelles moyennes, maximales et minimales sur les 14 mois d'instrumentation (*Figure 2.11* et *Tableau 2.5*). On peut en déduire cinq périodes. La période hivernale est divisée en deux parties et s'étend de décembre 2013 à février 2014 et de décembre 2014 à janvier 2015. Sur cette période la température moyenne est de 8,2 °C (±3,6 °C). La période estivale s'étend de juin à août 2014 avec une température moyenne de 17,8 °C (±4,6 °C). La période de demi-saison a été divisée en plusieurs périodes car les températures mensuelles peuvent avoir des écarts importants. La période de demi-saison froide correspond aux mois de mars et novembre 2014 où la température moyenne est de 12,2°C (±4,2 °C). La période de demi-saison chaude correspond aux mois de mai, septembre et octobre 2014 avec une moyenne de température de 17,8 °C (±4,3 °C). Le mois d'avril 2014 est un mois de transition (demi-saison) avec une température moyenne de 15,5 °C (±4,2 °C).

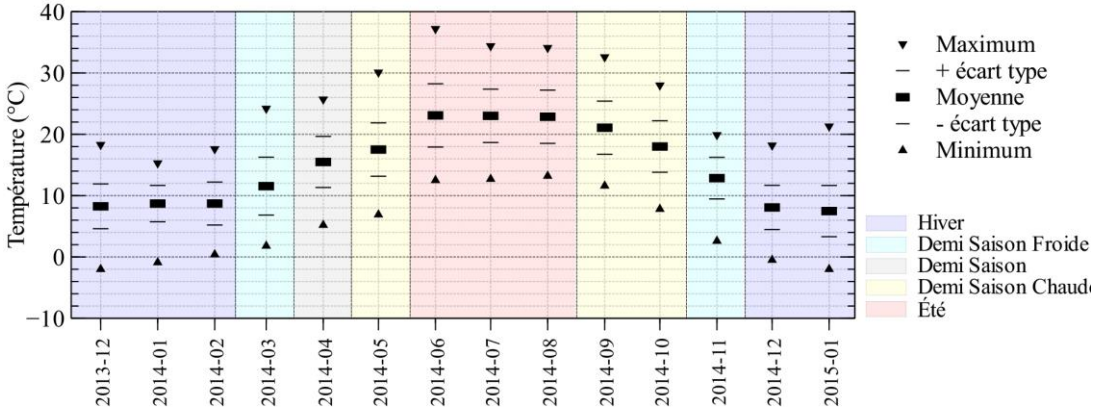


FIGURE 2.11 : *Analyse mensuelle des températures et découpage en cinq saisons d'étude de l'auteur grâce au fichier météo de Nîmes-Courbessac de Météo France*

	Hiver	Demi-Saison Froide	Demi-Saison	Demi-Saison Chaude	Été
Moyenne	8,2	12,2	15,5	17,8	23,0
Écart type	3,6	4,2	4,2	4,3	4,6
Maximum	21,3	24,2	25,7	20,1	37,2
Minimum	-2,0	1,8	5,2	6,9	12,5

TABLEAU 2.5 : *Moyenne, écart-type, maximum et minimum des températures de Nîmes-Courbessac par saisons*
de l'auteur grâce au fichier météo de Nîmes-Courbessac de Météo France

II. Enquête au porte à porte

La réalisation d'une enquête auprès des habitants a deux objectifs. Le premier est l'étude de la différence des comportements et du confort ressenti des occupants en fonction des caractéristiques des résidences. Le second est l'identification d'appartements pour les instrumenter avec des capteurs afin de comparer les ambiances thermiques en fonction des comportements réels des occupants. En effet, ces derniers peuvent varier par rapport aux déclarations faites lors du sondage. L'enquête est basée sur un questionnaire composé de questions fermées et d'une question ouverte permettant de recueillir les avis des locataires. Lors d'une première campagne d'enquête (envoi de questionnaires par La Poste) lancée en avril 2013 auprès de 717 logements de la SEMIGA et de 468 logements d'Un Toit Pour Tous, une partie de leurs parcs immobiliers respectifs, le nombre de réponses était de 16. Ce faible retour nous a conduit à réaliser une enquête au porte à porte en réduisant l'échantillon étudié aux deux résidences de Vauvert précédemment citées. Si les locataires étaient absents, le questionnaire était laissé dans la boîte aux lettres avec pour consigne de le rapporter au gardien d'immeuble.

II.1. Réalisation des questionnaires

Il existe dans la littérature, notamment en sociologie de l'énergie, de nombreux sondages réalisés par l'intermédiaire d'enquêtes quantitatives qui peuvent éventuellement être complétées par des enquêtes semi-directives *(MOUJALLED, 2007 ; VILLOT, 2012)*. Sur la base de ces études et de livres spécialisés dans les enquêtes *(DE SINGLY, 2012 ; MARTIN et DE SINGLY, 2012)*, nous avons réalisé un questionnaire permettant de comprendre le comportement des occupants sur la période hivernale et sur la période estivale. L'enquête a été menée du 3 au 14 octobre 2013 pour la résidence isolée et du 6 et 8 novembre 2013 pour la résidence non-isolée. Afin de respecter l'anonymat, une déclaration auprès de la CNIL[9] a été réalisée.

Le questionnaire d'une durée d'une quinzaine de minutes comprend 49 questions organisées en quatre parties (cf. *Annexe B*). La première partie, intitulée « *Qui êtes-vous ?* », est composée de 10 questions permettant de situer et de connaître les caractéristiques principales du locataire, de sa famille et de son logement. La deuxième partie, nommée « *Chez vous il fait combien ?* », est divisée en deux sous-parties : « *L'ÉTÉ et votre appartement...* » en 15 questions et « *L'HIVER et votre appartement...* » en 14 questions. Cette partie nous permet de connaître les caractéristiques thermiques du logement ainsi que les habitudes d'usages et de comportements des locataires. La troisième partie « *Vous et le Développement Durable ?* » aborde les questions relatives à l'environnement en général pour comprendre l'intérêt du locataire à s'investir dans notre démarche. La quatrième partie appelée « *Un Commentaire, cette partie est à vous...* », fait office de conclusion. Elle permet aux participants de faire des commentaires sur des thèmes qui n'auraient pas été abordés lors du questionnaire et qui leur sembleraient importants pour comprendre les caractéristiques thermiques de leur logement. Enfin, la dernière question anticipe l'instrumentation en demandant aux locataires leur accord pour une étude approfondie de leur appartement afin de cibler les logements à instrumenter.

[9] CNIL : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés

II.2. Analyse des résultats

II.2.1. Participation et répartition

Rencontrer les habitants nous a permis d'une part d'augmenter le taux de participation (60 % en moyenne) mais aussi de nous rendre compte des difficultés que certaines personnes pouvaient avoir à la lecture du questionnaire. En effet, la notion de confort thermique reste pour un certain nombre de personnes assez abstraite. Dans de nombreux cas, nous avons dû reformuler la question en demandant « *s'ils avaient chaud ou froid* ». Ce problème de sémantique nous aide, en partie, à comprendre le faible taux de participation lors de la première enquête. La résidence non-isolée contient moins de logements que la résidence isolée. Plusieurs passages ont pu être effectués afin de rencontrer les locataires permettant d'obtenir un taux de réponse plus important.

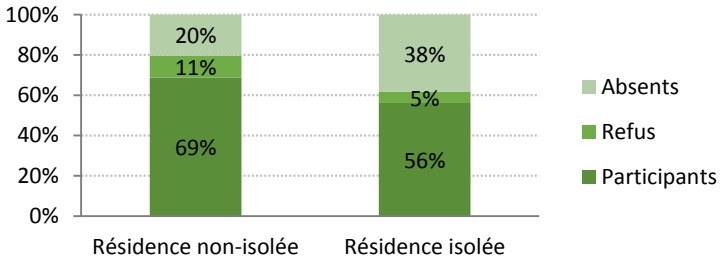


FIGURE 2.12 : *Nombre de participants en pourcentage pour chacune des résidences*
de l'auteur

Certaines questions ont été supprimées après la première journée d'enquête car un trop grand nombre de personnes ne les comprenait pas ou avait du mal à y répondre. Il s'agit des questions faisant la distinction entre le ressenti dans le séjour « *en moyenne* » et « *de temps en temps* ». De même les questions « *vous trouvez cela supportable/insupportable ?* » et « *selon vous et vos consommations d'énergie, vous diriez que votre foyer est sobre/moyen/énergivore* » ont été supprimées. Outre les termes complexes à appréhender, beaucoup de foyers n'avaient pas d'élément de comparaison et avaient du mal à estimer leur logement. Enfin, certaines questions pouvant être renseignées par l'étude des logements, nous les avons également supprimées lors de l'entretien pour le raccourcir.

Dans la majorité des bâtiments, les locataires ont été très accueillants et le taux de réponse varie entre 41,7 % et 70,8 % en fonction des bâtiments.

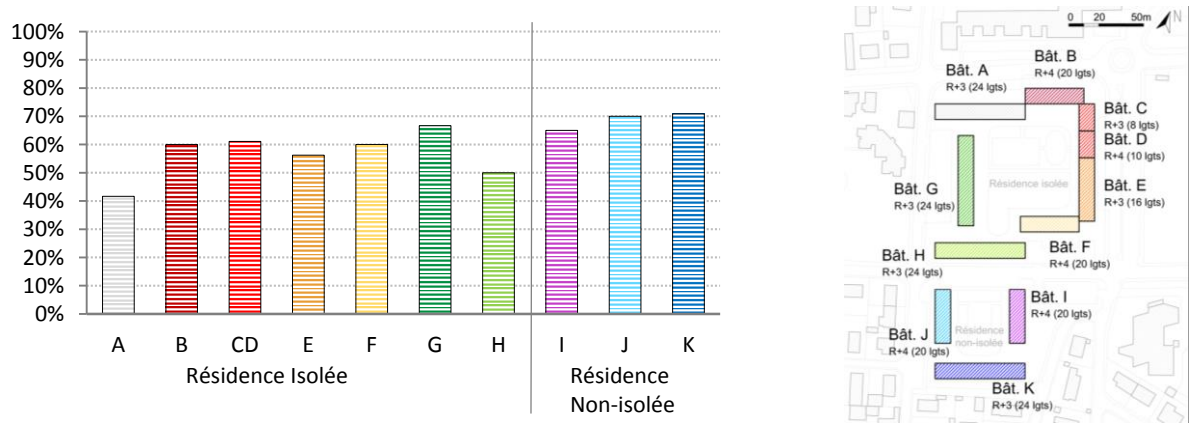


FIGURE 2.13 : *Répartition du pourcentage de participants par bâtiment*
de l'auteur

II.2.1.1. Typologie d'appartements

Conformément aux typologies des immeubles, les personnes interrogées louent plutôt de grands appartements (du T3 au T5) (*Figure 2.14.a*). De même, elles sont réparties sur les différents niveaux : du rez-de-chaussée au 4ème étage (*Figure 2.15.a*). Dû à la composition des deux résidences, le taux de réponse entre les locataires des appartements exposés Nord/Sud et ceux exposés Est/Ouest est sensiblement identique dans la résidence isolée. Au contraire, dans la résidence non-isolée nous avons obtenu plus de réponses de la part des locataires des appartements orientés Est/Ouest. (*Figure 2.15.b*).

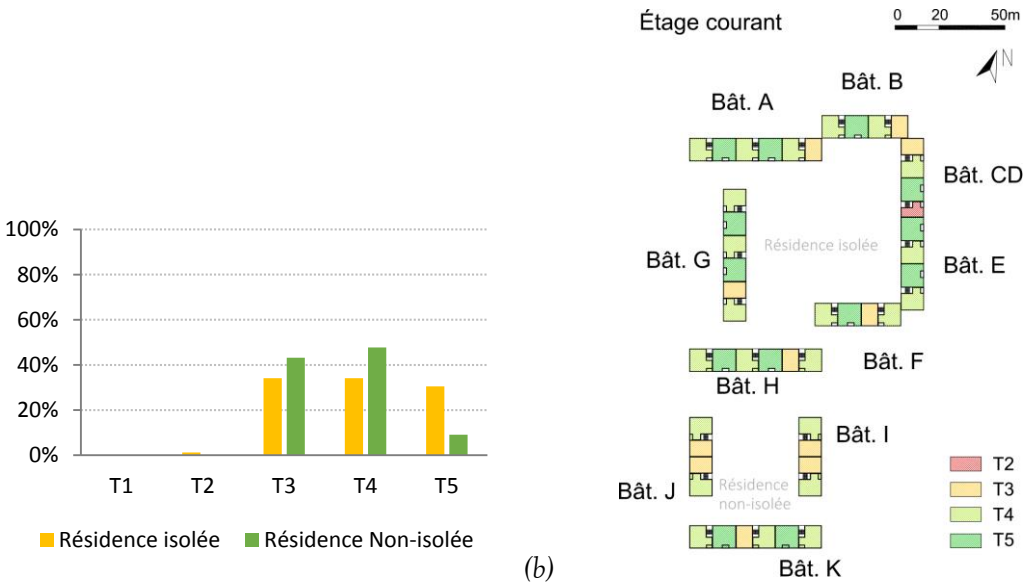


FIGURE 2.14 : *(a) Répartition en pourcentage du type d'appartement des sondés (b) Répartition des typologies d'appartements sur un étage courant*
de l'auteur

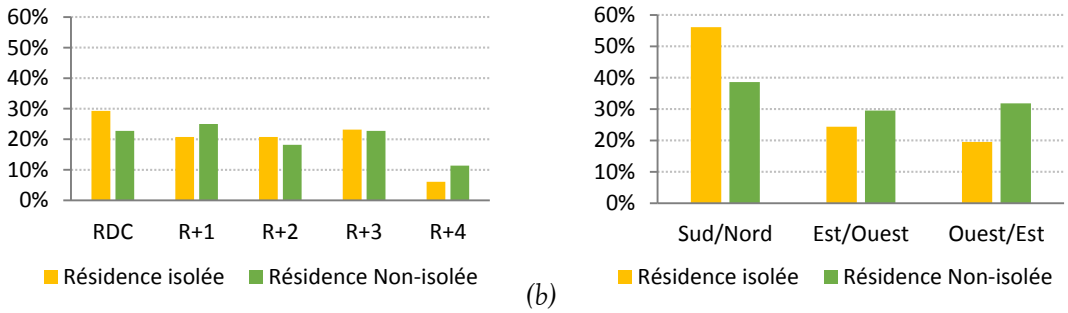


FIGURE 2.15 : *Répartition en pourcentage de (a) l'étage de l'appartement des sondés et (b) l'orientation de leur appartement*
de l'auteur

II.2.1.2. Caractéristiques du ménage

Dans les deux résidences, les personnes interrogées sont principalement des femmes ayant majoritairement entre 31 et 65 ans (*Figure 2.16*). Les personnes âgées, ayant plus de 66 ans, représentent 18 % des sondés en moyenne.

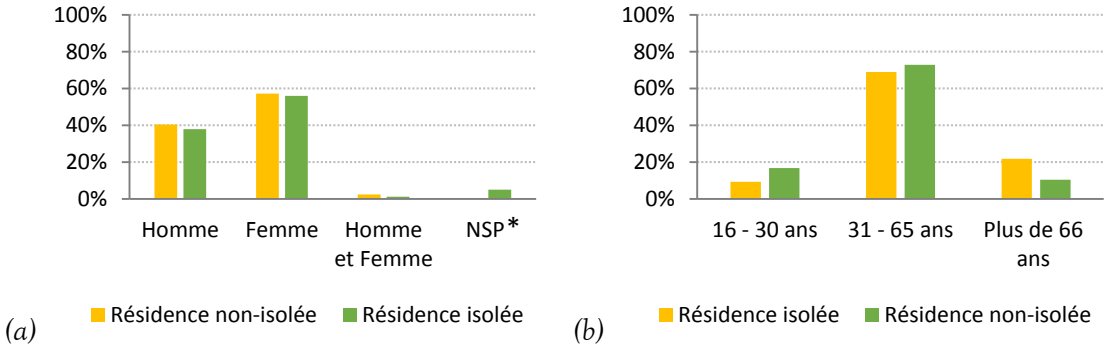


FIGURE 2.16 : *Répartition en pourcentage (a) du sexe et (b) de l'âge des sondés en fonction des résidences (*NSP = Ne se prononce pas)*
de l'auteur

Malgré des tailles similaires, les appartements de la résidence isolée sont plutôt occupés par une ou deux personnes alors que dans la résidence non-isolée, nous constatons un plus fort taux d'occupation avec quatre ou cinq personnes par logement (*Figure 2.17*).

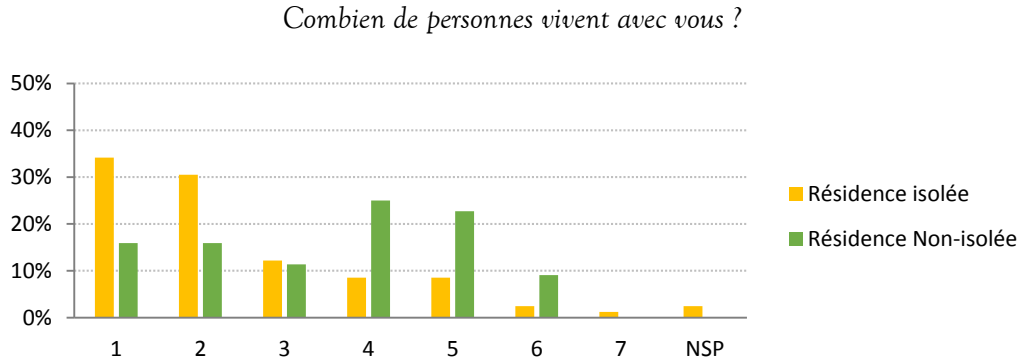


FIGURE 2.17 : *Répartition en pourcentage du nombre de personnes par logement*
de l'auteur

En moyenne, les locataires connaissent leur appartement et les occupent majoritairement depuis plus de trois ans. Le dernier hiver (ou été) n'a donc pas une influence significative sur les réponses suivantes. Lors des interviews, certains nous ont également indiqué être dans leur logement depuis la création de la résidence en 1969, ce qui prouve leur attachement aux lieux. De plus, certains ont changé d'appartement mais sont restés dans la même résidence, et plusieurs familles ont des enfants ou des parents qui vivent dans la même résidence. Les réponses sur leur confort ont généralement pris en compte ce détail car les personnes interrogées comparent leur confort actuel avec celui qu'ils ont connu auparavant.

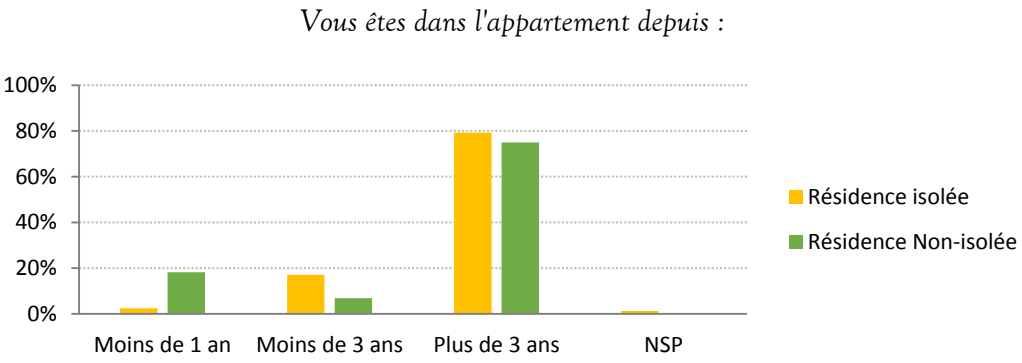


FIGURE 2.18 : *Répartition en pourcentage de l'ancienneté des locataires dans leur logement*
de l'auteur

II.2.2. Le confort

II.2.2.1. En moyenne

À la question « *Thermiquement, trouvez-vous votre appartement confortable ?* », dans la résidence isolée, 67,8 % des personnes interrogées déclarent trouver leur appartement confortable en toute saison alors que dans la résidence non-isolée ce chiffre tombe à 51,3 %. Ces locataires ne se plaignent pas d'un inconfort thermique en été mais plutôt en hiver ou plus généralement en toutes saisons. Au contraire, dans la résidence isolée, les locataires se plaignent du confort d'été (17,2 % des interrogés) et peu du confort en général (5,9 %).

Les réponses sont cependant à prendre avec précaution dans la mesure où certaines personnes interrogées n'ont pas bien compris le sens de la question. La réponse « *Oui, sauf la peinture de la cage d'escalier* » illustre bien ce propos. Lors des entretiens nous avons expliqué ce que nous entendions par thermiquement ; « *vous trouvez qu'il fait trop chaud, trop froid ?* ».

Thermiquement, trouvez-vous votre appartement confortable ?

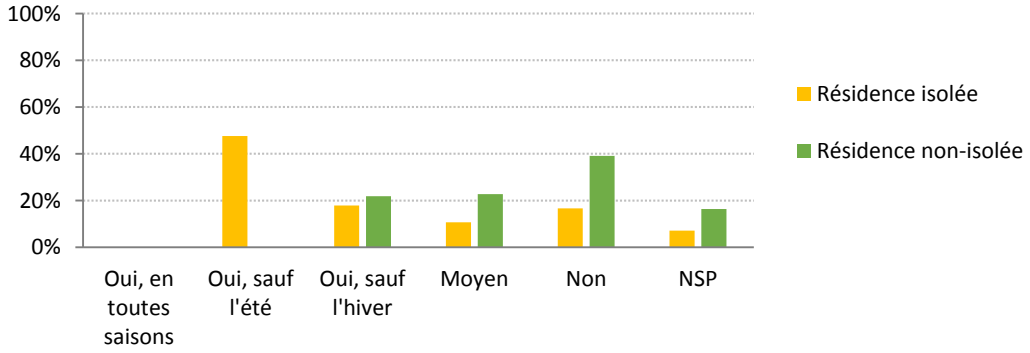


FIGURE 2.19 : *Répartition du confort/inconfort en fonction des saisons et des résidences de l'auteur*

Nous cherchons ensuite à identifier si l'un des bâtiments semble plus inconfortable que les autres d'après les déclarations des habitants. Pour cela, la

*figure 2.**20**.a* présente les pourcentages de confort et d'inconfort en fonction des résidences. Nous avons vu plus haut (cf. *Chapitre 1-II*) que lorsqu'on définit une situation de confort il y a toujours 10 % d'insatisfaits. Nous avons alors traduit sur le plan de l'étage courant (

*Figure 2.**20**.b*) l'inconfort majeur ressenti en fonction des bâtiments. Ainsi, comme nous venons de le voir, dans la résidence non-isolée c'est l'inconfort en général qui est mis en cause (bâtiment I, J, K). Cependant nous remarquons également que le bâtiment dont les séjours sont orientés Sud, semble avoir un inconfort d'hiver plus accentué que les autres bâtiments. Dans la résidence isolée c'est surtout le confort d'été qui est mis en cause (5 bâtiments dont les séjours sont orientés Sud ou Ouest). Dans le bâtiment F, en plus de l'inconfort d'été c'est aussi le confort en général qui est dégradé. Dans les appartements dont les séjours sont orientés Est, les habitants ressentent de l'inconfort l'hiver (bâtiment E) ou un inconfort généralisé (bâtiment CD).

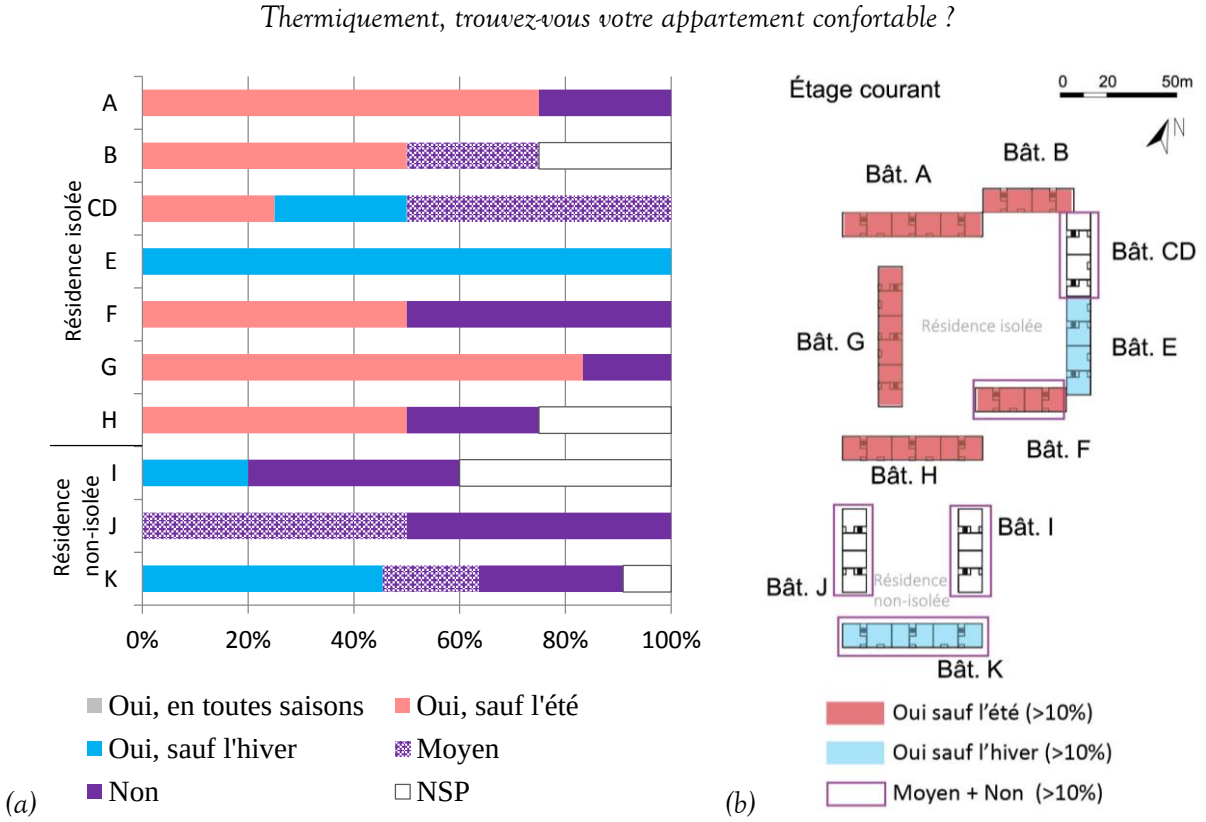


FIGURE 2.20 : *Répartition des réponses à la question « Thermiquement, trouvez-vous votre appartement confortable ? » en fonction des bâtiments (a) en pourcentage et (b) en plan de l'auteur*

II.2.2.2. En été

À la question « *En été, dans votre séjour, vous avez en moyenne :* », les réponses entre les deux résidences sont sensiblement identiques. Dans la résidence isolée, cependant, nous retrouvons la remarque précédente : les locataires se plaignent de la chaleur (réponse « *très chaud* ») à 17,1 % contre seulement 7,3 % dans la résidence non-isolée (*Figure 2.21*). La répartition en plan (*Figure 2.22.b*) des inconforts liés au chaud montre que l'orientation de l'appartement ne semble pas être un facteur déterminant dans l'inconfort. Le bâtiment isolé semble être plus en surchauffe que le non-isolé (les bâtiments A et G sont ressentis comme « chauds » ou « très chauds » par près de 70 % des locataires). Deux hypothèses peuvent être avancées quant à cet inconfort. La première : l'isolation par l'extérieur limite l'évacuation de la chaleur accumulée pendant la journée par une meilleure étanchéité à l'air et par la diminution du refroidissement nocturne grâce aux parois extérieures. La seconde : les pratiques de l'occupant engendrent cette surchauffe. En effet, l'immeuble ayant été isolé depuis trois ans, les locataires n'ont peut-être pas pu ou su mettre en place des stratégies de protection contre la chaleur adaptées à ce nouvel environnement.

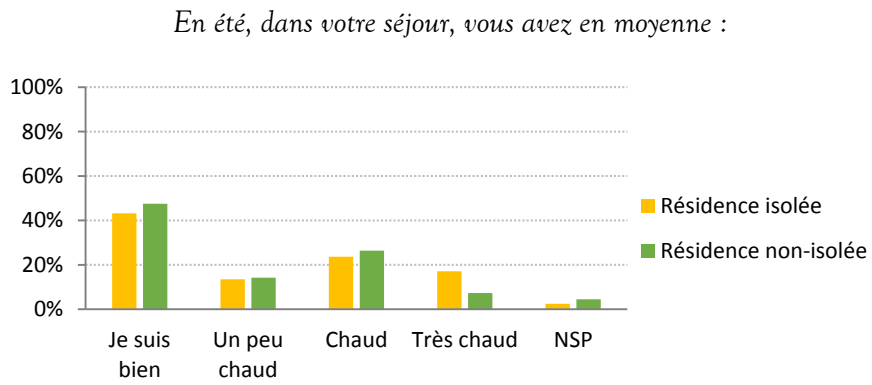


FIGURE 2.21 : *Répartition de la sensation moyenne de confort en fonction des résidences*
de l'auteur

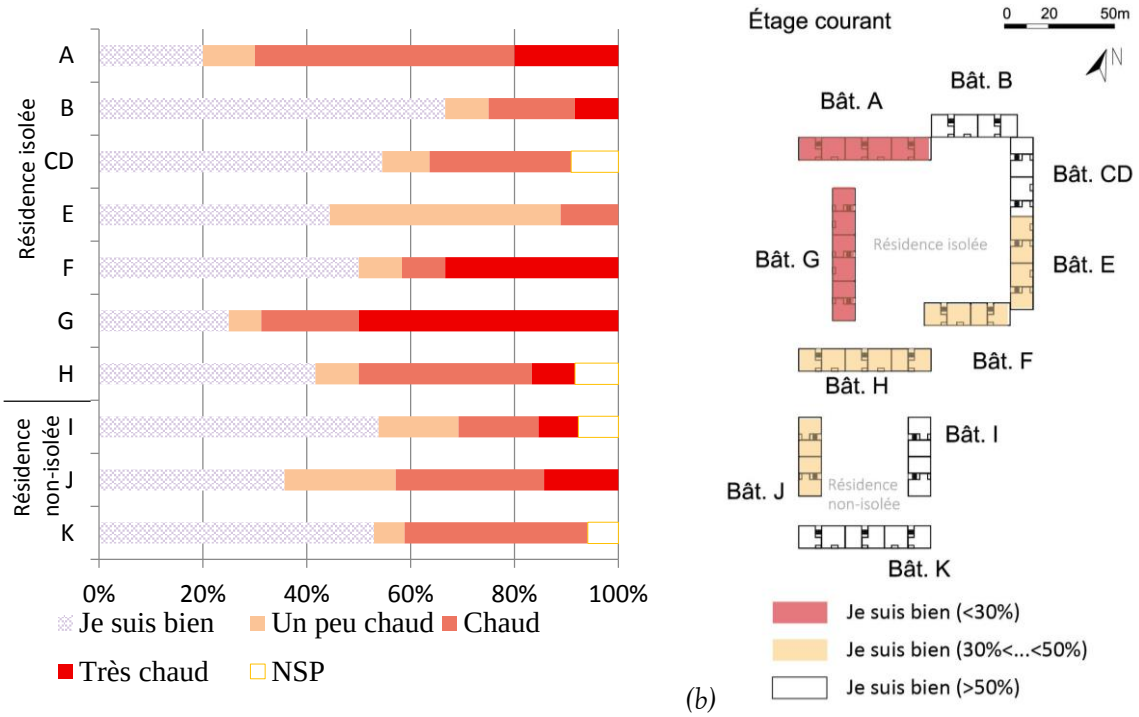


FIGURE 2.22 : *Répartition (a) en pourcentage et (b) en plan de la sensation de confort moyenne en fonction des bâtiments*
de l'auteur

II.2.2.3. En hiver

À la question « *En hiver, dans votre séjour, vous avez en moyenne :* », les réponses entre les deux résidences sont différentes. Les locataires de la résidence non-isolée se plaignent du froid en hiver. Ils sont 46,3 % à déclarer avoir « *Très froid* », « *Froid* », « *Un peu froid* » alors qu'ils ne sont que 9,1 % dans la résidence isolée (*Figure 2.23*). Les locataires, d'après leurs commentaires, ont réellement senti une différence entre avant et après la pose de l'isolation thermique par l'extérieur comme le montre cette phrase entendue de nombreuse fois lors de l'enquête : « *Depuis les travaux, l'hiver c'est super mais l'été, il fait vraiment très chaud !* ». Sur le plan de la *figure 2.24.b*, on observe clairement que les locataires de la résidence non-isolée sont plus dans l'inconfort lié au froid que ceux de la résidence isolée. Cependant, nous pouvons également remarquer que dans la résidence isolée, les appartements dont les séjours sont à l'Est (bâtiments C, D, E) semblent plus frais que les autres, chose qui avait déjà été identifiée lors de l'étude du confort en général.

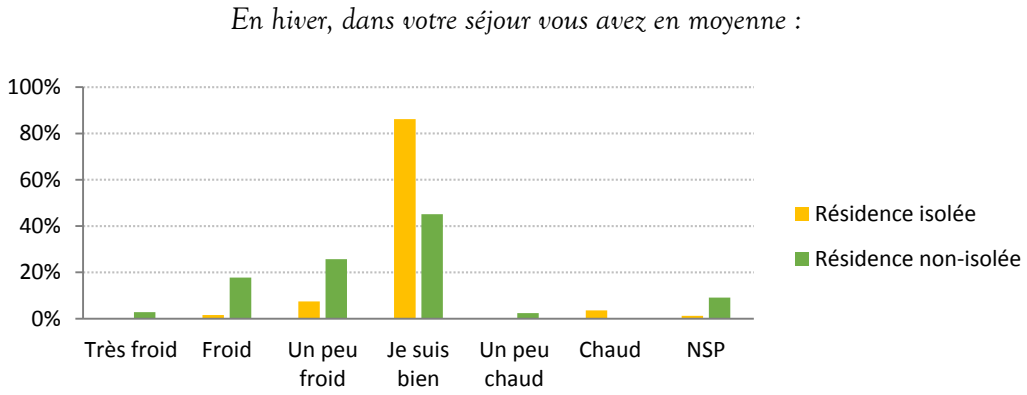


FIGURE 2.23 : *Répartition de la sensation moyenne de confort en fonction des résidences*
de l'auteur

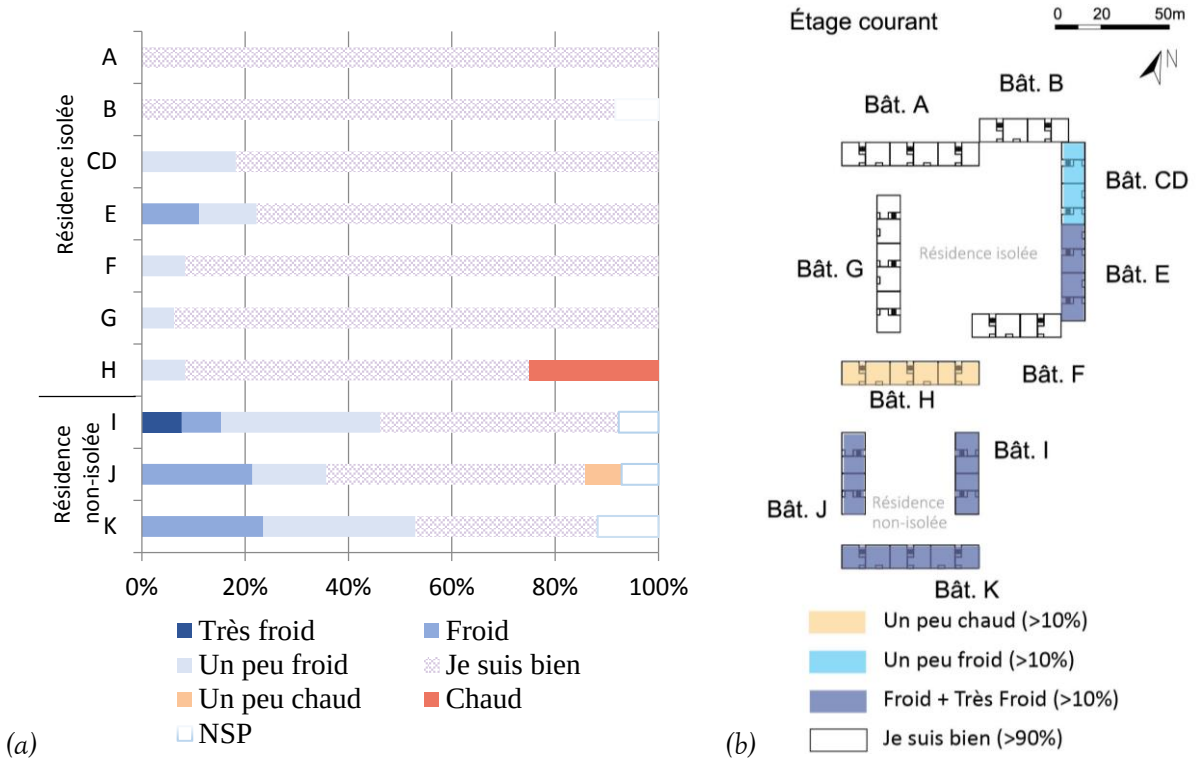


FIGURE 2.24 : *Répartition (a) en pourcentage et (b) en plan de la sensation de confort moyenne en fonction des bâtiments*
de l'auteur

II.2.3. Le comportement estival

II.2.3.1. Ambiance thermique dans les logements

De manière générale, les locataires estiment que l'ambiance thermique de leur logement est homogène (près de 50 % des réponses), l'ensemble des pièces semble être à la même température. Les appartements traversants ont donc deux orientations principales. Les appartements pignons ont, par contre, trois orientations. Dans les appartements orientés Nord/Sud, les pièces situées au Sud (séjours, chambres) sont les plus chaudes (*Figure 2.25.a*) et les pièces au Nord (cuisines, salles de bain, chambres) sont les plus fraîches (*Figure 2.26.a*). Dans les bâtiments orientés à l'Est/Ouest

ou à l'Ouest/Est, les pièces situées à l'Ouest sont considérées comme les plus chaudes (*Figure 2.25.b*) et les pièces à l'Est sont considérées comme les plus fraîches quelle que soit la typologie des pièces (*Figure 2.26.b*). Ces constatations sont classiques lors de l'étude thermique de résidences. En effet, en été, les pièces orientées plein Sud ou Ouest ont des expositions défavorables.

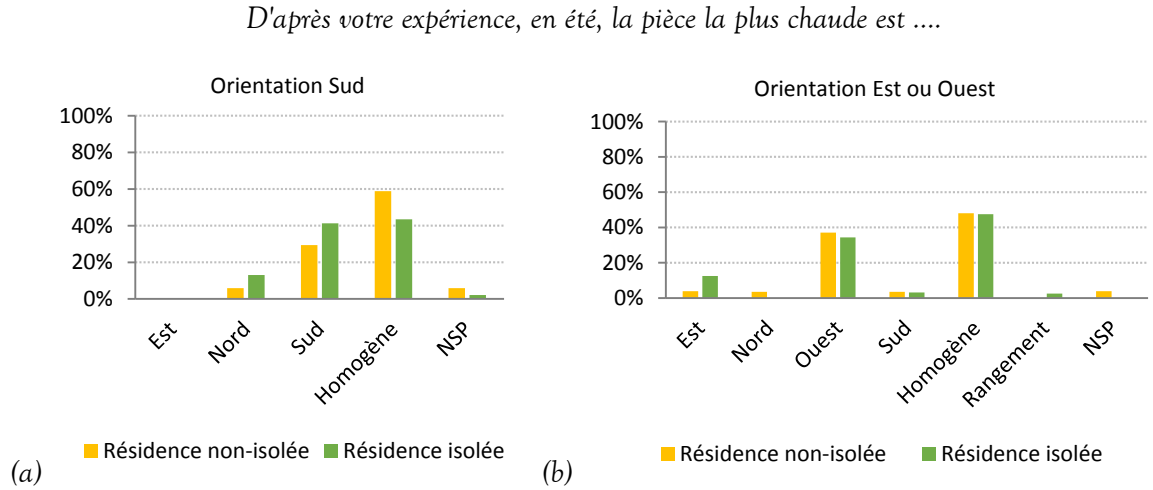


FIGURE 2.25 : *Répartition en pourcentage de la chaleur en fonction de l'orientation des pièces au sein des appartements orientés (a) au Sud et (b) à l'Est ou à l'Ouest*
de l'auteur

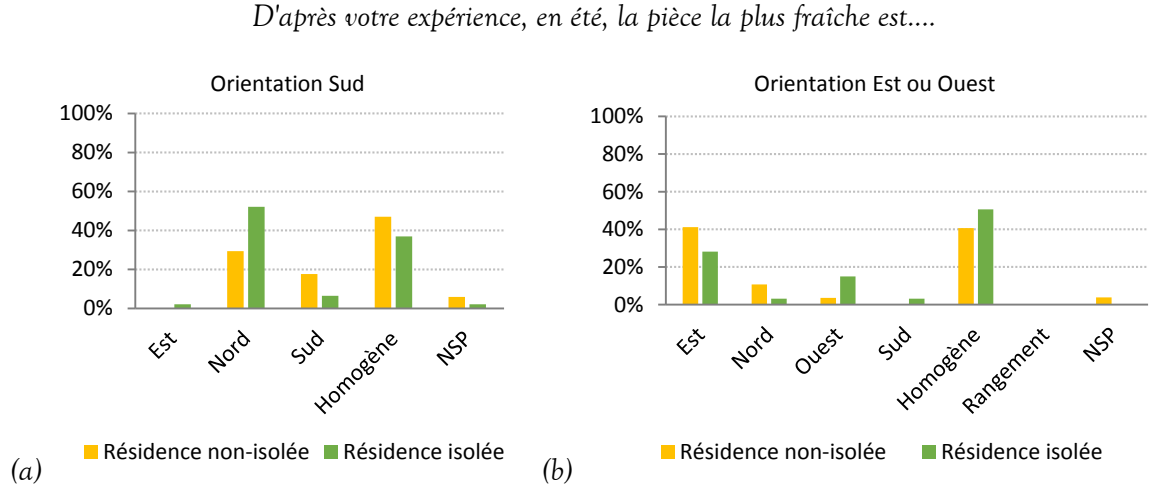


FIGURE 2.26 : *Répartition en pourcentage de la fraîcheur en fonction de l'orientation des pièces au sein des appartements orientés (a) au Sud et (b) à l'Est ou à l'Ouest*
de l'auteur

II.2.3.2. Ouverture des volets et des fenêtres

En été, les locataires déclarent se protéger du rayonnement solaire. En effet, 91 % des locataires ferment leurs volets la journée. Seulement 4 % déclarent ne jamais les fermer en journée.

Seuls 4 % des interrogés déclarent ne pas ouvrir leurs fenêtres en été et ce sont surtout des locataires de la résidence isolée. Parmi ceux qui les ouvrent, nous constatons que chaque locataire a un comportement qui lui est propre en termes de durée et de moment d'ouverture. 22,2 % des locataires de la résidence isolée et 32,2 % de ceux de la résidence non-isolée, ouvrent leur fenêtre toute la journée (*Figure 2.27*).

En été, pour rafraîchir votre appartement et faire courant d'air, ouvrez-vous la fenêtre ? À quel moment ?

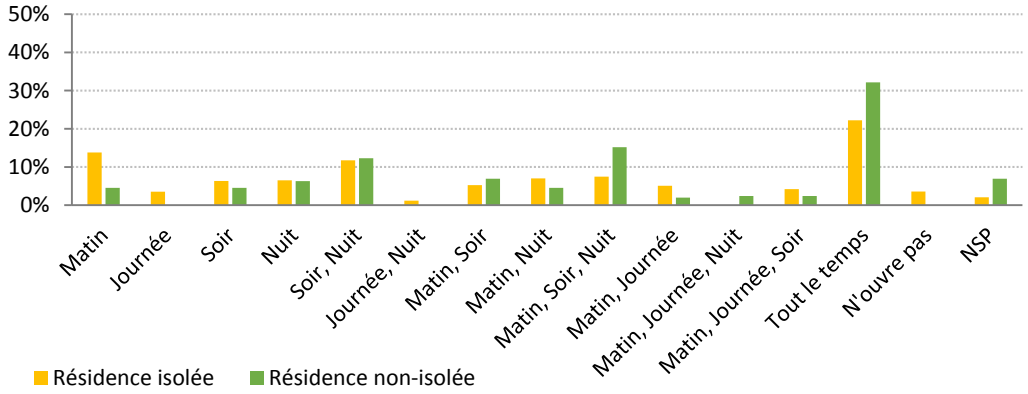


FIGURE 2.27 : *Répartition en pourcentage de l'ouverture des fenêtres en fonction du moment de la journée*
de l'auteur

La relation entre le moment d'ouverture de la fenêtre et le ressenti dans le séjour montre que, quelle que soit la résidence étudiée, ceux qui ouvrent la journée ont un niveau d'inconfort élevé (supérieur à 50 %). Dans la résidence isolée, ceux qui ouvrent au moins la journée ont des niveaux d'inconfort équivalents avec ceux qui ouvrent la nuit. Par contre, dans la résidence non-isolée, ceux qui ouvrent la nuit semblent moins dans l'inconfort que ceux qui ouvrent en journée. (*Figure 2.28* et *figure 2.29*).

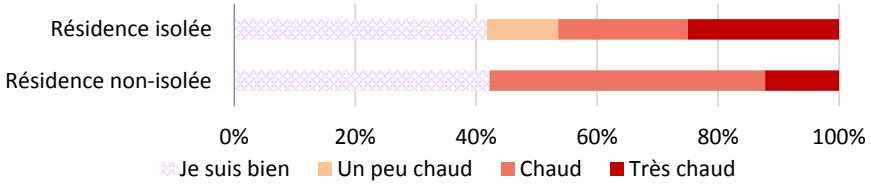


FIGURE 2.28 : *Ressenti (en pourcentage) dans le séjour des locataires qui ouvrent leur fenêtre au moins la journée en été*
de l'auteur

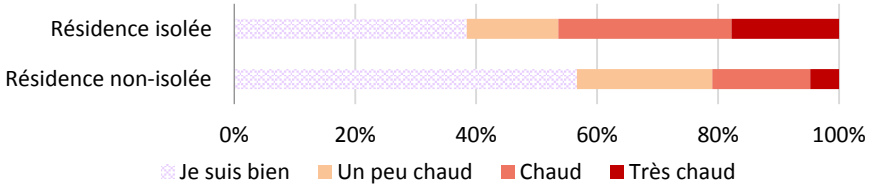


FIGURE 2.29 : *Ressenti (en pourcentage) dans le séjour des locataires qui ouvrent leur fenêtre la nuit, le matin ou le soir en été*
de l'auteur

Parmi les personnes qui ouvrent leurs fenêtres au moins la journée, seuls les locataires des bâtiments dont les séjours sont exposés à l'Est ne se plaignent pas de la chaleur (*Figure 2.30.a*). Nous constatons cependant, que le fait d'ouvrir la nuit n'est pas un facteur de confort. La comparaison par bâtiment du pourcentage d'insatisfaits parmi ceux qui ouvrent au moins la journée et ceux qui ouvrent la nuit permet d'en déduire l'amélioration ou la dégradation du confort en fonction des actions. Dans la résidence non-isolée, ouvrir sa fenêtre la nuit semble rafraîchir les appartements. Les locataires se plaignent moins de la chaleur (*Figure 2.30.b*). Dans la résidence isolée par contre, ouvrir la nuit améliore le confort dans les bâtiments B, F et H et le détériore dans les bâtiments A, CD, E et G. L'orientation ne semble pas expliquer ce phénomène (*Figure 2.31*).

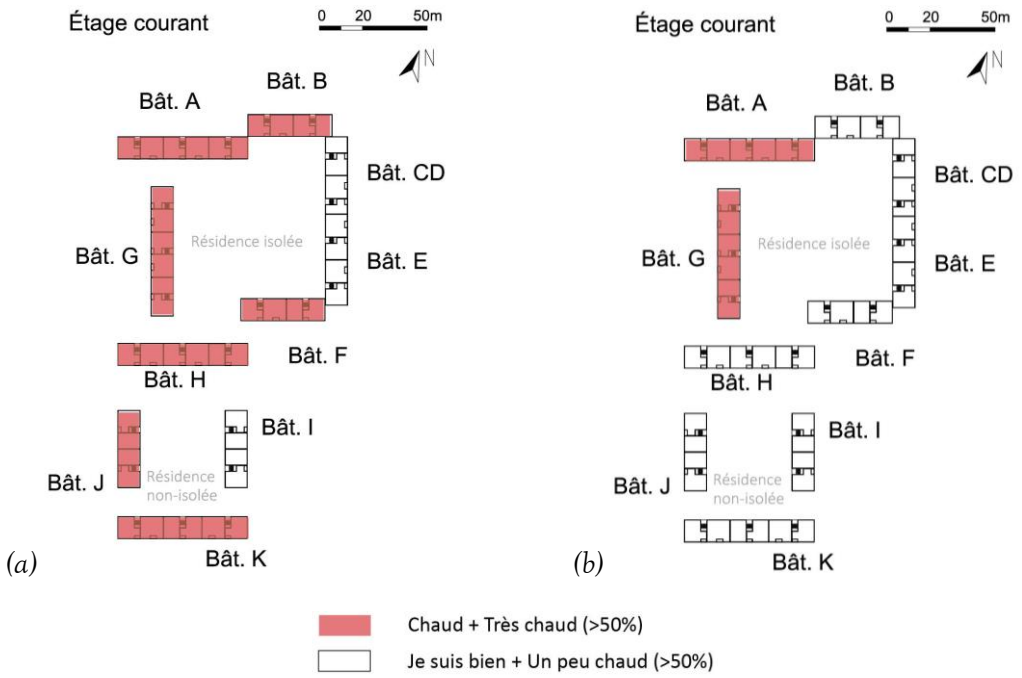


FIGURE 2.30 : *Répartition des bâtiments les plus chauds en fonction des locataires qui ouvrent la fenêtre (a)* ***au moins la journée*** *ou (b)* ***la nuit, le soir ou le matin***
de l'auteur

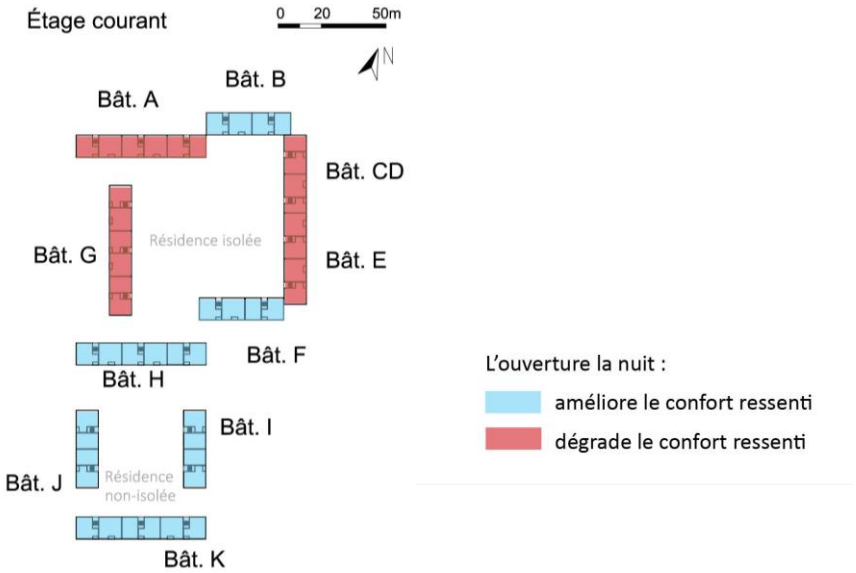


FIGURE 2.31 : *Répartition en plan de l'amélioration/dégradation du confort ressenti des locataires qui ouvrent la fenêtre la nuit par rapport à ceux qui ouvrent la journée*
de l'auteur

II.2.3.3. Mouvements d'air

59,1 % des locataires déclarent que les mouvements d'air sont moyennement présents dans leur appartement. La question « *trouvez-vous cela dérangeant* ? » a été supprimée car elle était sujette aux deux interprétations suivantes : « *trouvez-vous les mouvements d'air (en général) dérangeants ?* » ou « *trouvez-vous votre situation, par rapport aux mouvements d'air, dérangeante ?* ».

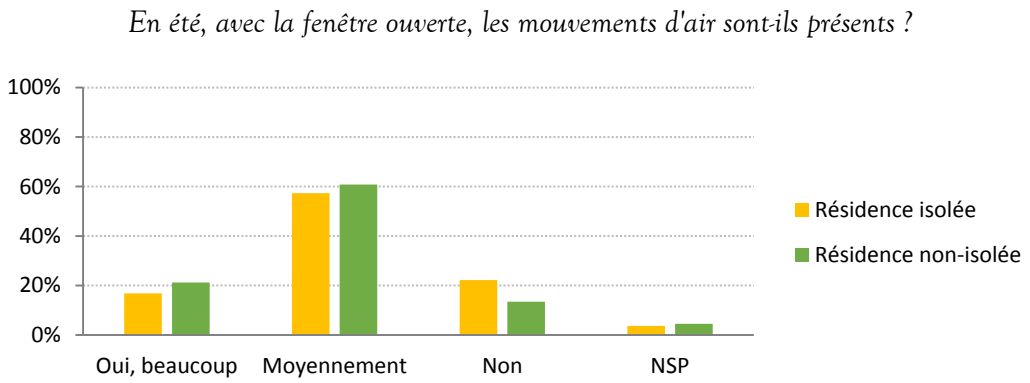


FIGURE 2.32 : *Répartition de l'inconfort dû aux mouvements d'air en fonction des résidences*
de l'auteur

II.2.3.4. Accessoires de rafraîchissement

Les climatiseurs en façade étant interdits, les locataires des deux résidences possèdent plutôt des ventilateurs que des climatiseurs. On constate que dans la résidence isolée, près de 80 % des locataires sont équipés d'un ventilateur et plus de la moitié estiment qu'il améliore leur confort. Dans la résidence non-isolée, 57 % des locataires ne possèdent ni ventilateur ni climatisation ; ceux qui possèdent un ventilateur considèrent qu'il n'améliore que modestement leur confort.

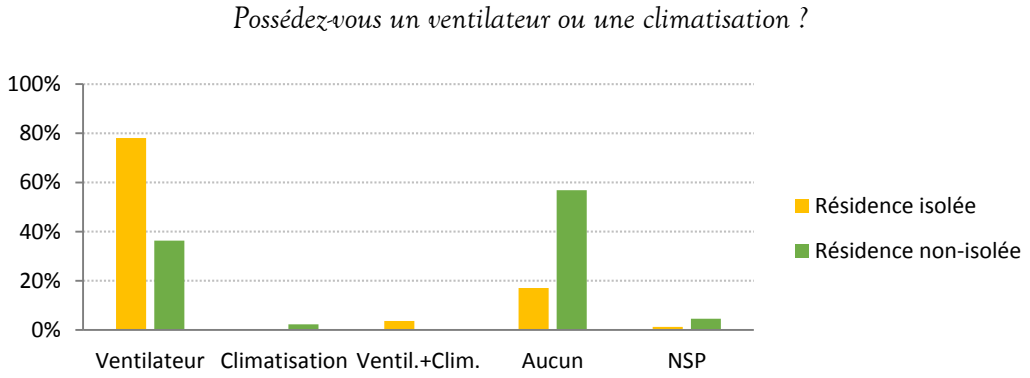


FIGURE 2.33 : *Répartition des locataires possédant un ventilateur ou climatisation*
de l'auteur

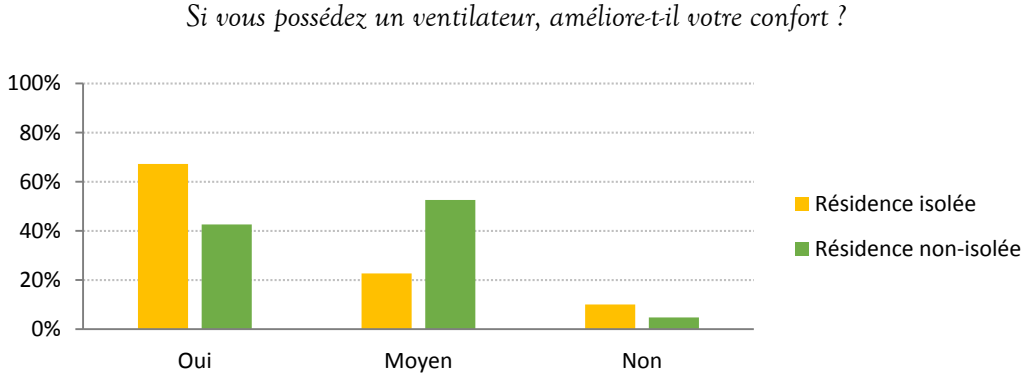


FIGURE 2.34 : *Répartition de l'impact du ventilateur sur le confort en fonction des résidences*
de l'auteur

II.2.4. Le comportement hivernal

II.2.4.1. Ambiance thermique dans les logements

En hiver, l'analyse de la répartition des pièces chaudes ou fraîches comme nous avons fait pour l'été est plus complexe. En effet, l'ambiance thermique des logements est fortement liée à l'utilisation et à l'efficacité du système de chauffage, aux apports internes et externes ainsi qu'à l'enveloppe (perméabilité à l'air, résistance thermique). Si en été, l'orientation des pièces était corrélée avec les sensations de « chaud » ou de « frais, en hiver les réponses sont différentes. En effet, les locataires ont différencié les pièces à vivre des chambres ou les orientations, ou une pièce en particulier qui serait par exemple non chauffée.

II.2.4.2. Ouverture des volets et fenêtres

En hiver, les comportements sont sensiblement identiques d'un appartement à l'autre et d'une résidence à l'autre. Les personnes interrogées ferment leur volet à 84,9 % et aèrent leur appartement à 91 %.

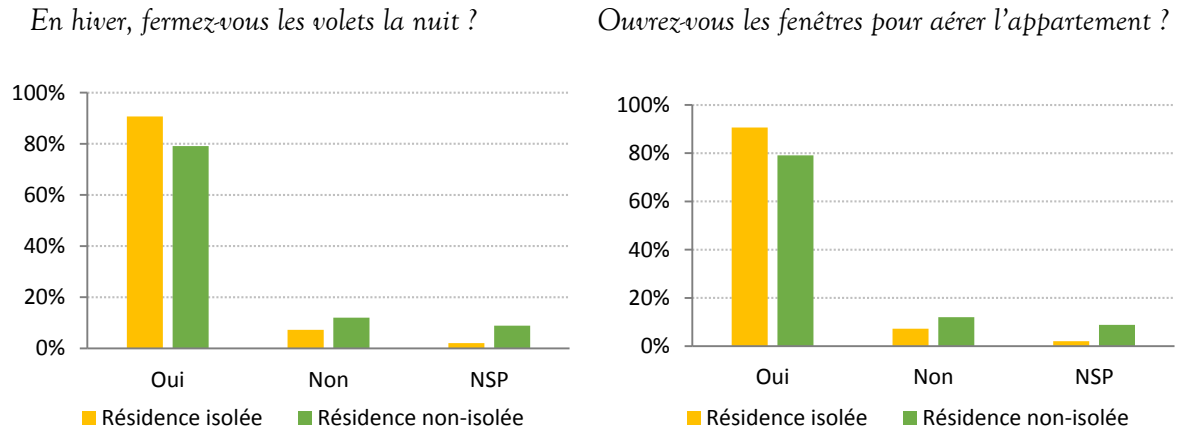


FIGURE 2.35 : *Pourcentage de locataires (a) fermant les volets la nuit et (b) ouvrant les fenêtres pour aérer en journée en fonction des résidences*
de l'auteur

II.2.4.3. Le rapport au chauffage

71 % des personnes interrogées déclarent baisser le thermostat lorsqu'elles quittent leur appartement pour quelques jours. 2,1 % des locataires de la résidence isolée déclarent ne pas allumer le chauffage contre 4,5 % dans la résidence non-isolée malgré la sensation de froid déclarée en hiver. Cela se justifie avec les commentaires de certains locataires interrogés qui ont précisé que, pour eux, le prix de l'énergie est trop élevé et ils choisissent alors de ne pas utiliser leur système de chauffage.

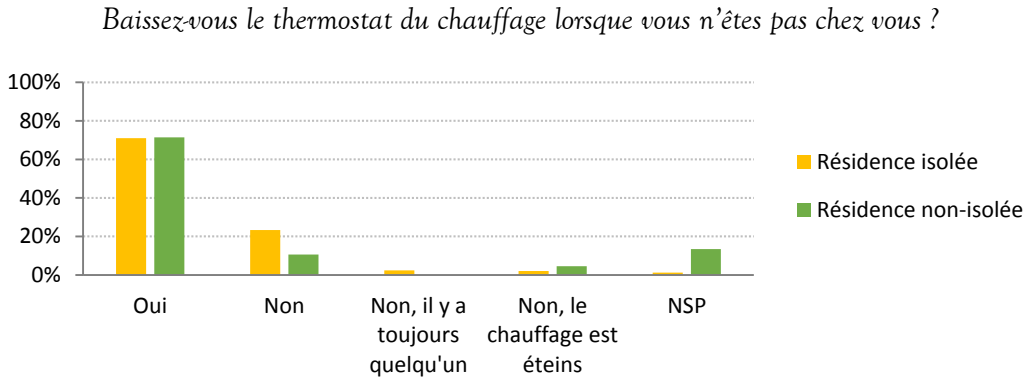


FIGURE 2.36 : *Répartition des réponses à la question « Baissez-vous le thermostat du chauffage lorsque vous n'êtes pas chez vous ? » en fonction des résidences*
de l'auteur

Pour les résidents, le coût du chauffage est perçu différemment en fonction des résidences. La *figure 2.37* montre que pour 41,7 % des locataires de la résidence isolée, le coût du chauffage est raisonnable, le taux baisse à 29,6 % pour ceux de la résidence non-isolée. Cependant, une grande partie des locataires de la résidence non-isolée n'ont pas répondu à la question ou ne savent pas combien ils payent pour le chauffage (17,3 %).

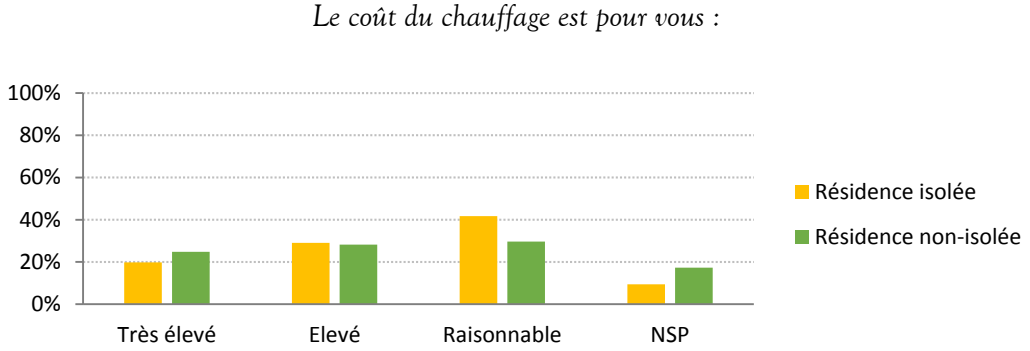


FIGURE 2.37 : *Répartition des réponses à la question « Le coût du chauffage est pour vous : » en fonction des résidences*
de l'auteur

71,3 % des personnes interrogées déclarent préférer mettre un pull plutôt que d'augmenter le chauffage s'ils ont froid quelle que soit la résidence.

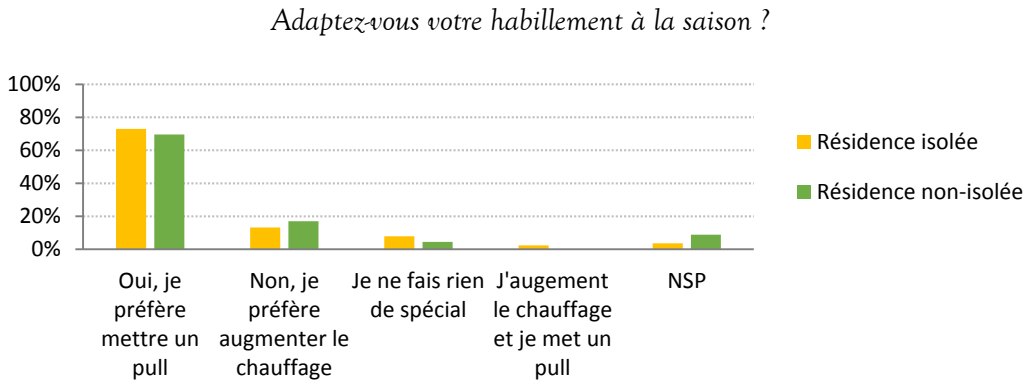


FIGURE 2.38 : *Répartition des réponses à la question « Adaptez-vous votre habillement à la saison ? » en fonction des résidences*
de l'auteur

II.2.4.4. Chauffages d'appoint

Très peu de locataires possèdent un chauffage d'appoint (2,0 % dans la résidence non-isolée et 3,8 % dans la résidence isolée). Parmi eux, la majorité se chauffe à électricité (chauffages soufflants ou radiants). Cependant, on constate que certains possèdent encore des poêles à pétrole qui sont à la fois dangereux et qui dégagent de l'humidité dans les appartements.

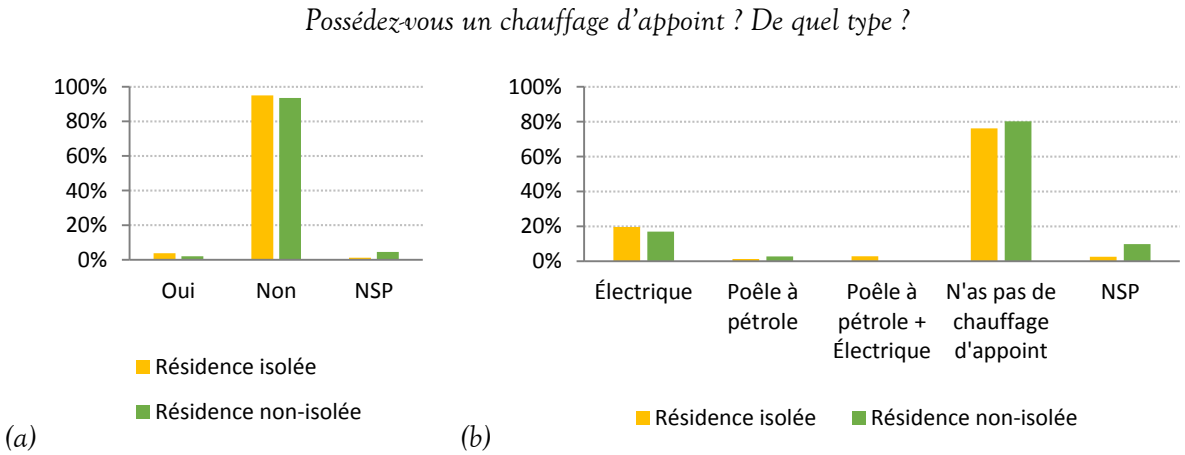


FIGURE 2.39 : *Pourcentage (a) de possession d'un chauffage d'appoint en fonction de la résidence et (b) type de chauffage*
de l'auteur

II.2.5. Rapport au développement durable

64,3 % des locataires sont intéressés par l'environnement et le développement durable. Seulement 8,7 % se déclarent intéressés et « actifs ». Les raisons économiques sont le principal facteur d'incitation à la réduction des consommations énergétiques.

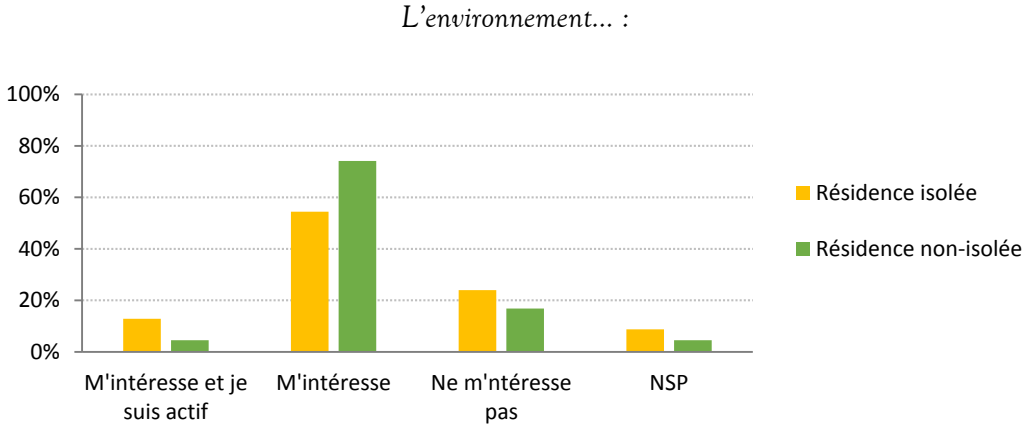


FIGURE 2.40 : *Répartition de l'intérêt des locataires envers l'environnement en fonction des résidences*
de l'auteur

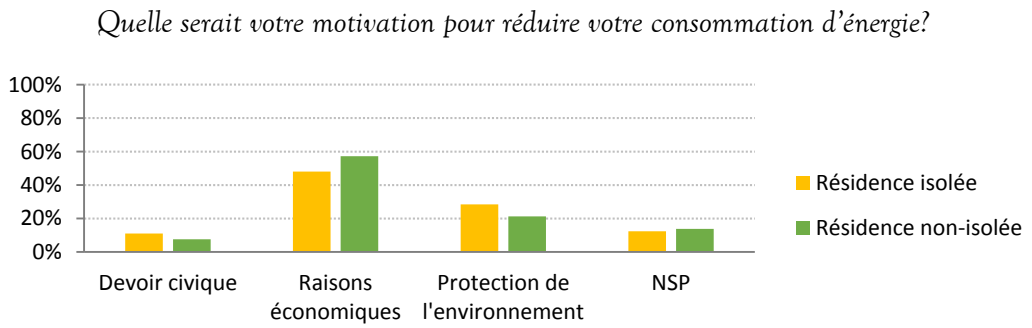


FIGURE 2.41 : *Répartition des réponses à la question « Quelle serait votre motivation pour réduire votre consommation d'énergie? » en fonction des résidences*
de l'auteur

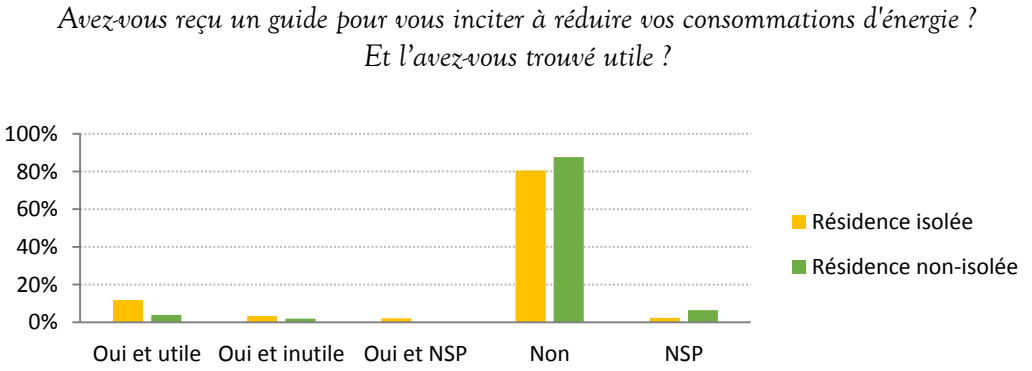


FIGURE 2.42 : *Pourcentage de personnes ayant reçu un guide et leur ressenti en fonction des résidences*
de l'auteur

Dans la résidence isolée, 54,1 % des locataires considèrent que leur appartement est « correct » et ne voient pas de rénovation à effectuer. Les principales remarques concernent la réfection des sols (prévue dans un futur proche) et l'installation de climatiseurs ou d'éléments permettant d'apporter de la fraîcheur en été. Dans la résidence non-isolée, les locataires aimeraient que les parois de leur logement soit isolées (35,3 %). D'autres préfèreraient que le système de chauffage soit changé (14,4 %). Par contre 29,4 % des locataires n'ont rien à signaler. Cette dernière valeur peut être interprétée de deux manières : soit les locataires ont fait eux-mêmes des modifications dans leur logement ou bien ils se sont habitués à leur environnement et ne voient pas l'intérêt d'effectuer des modifications dans leur logement.

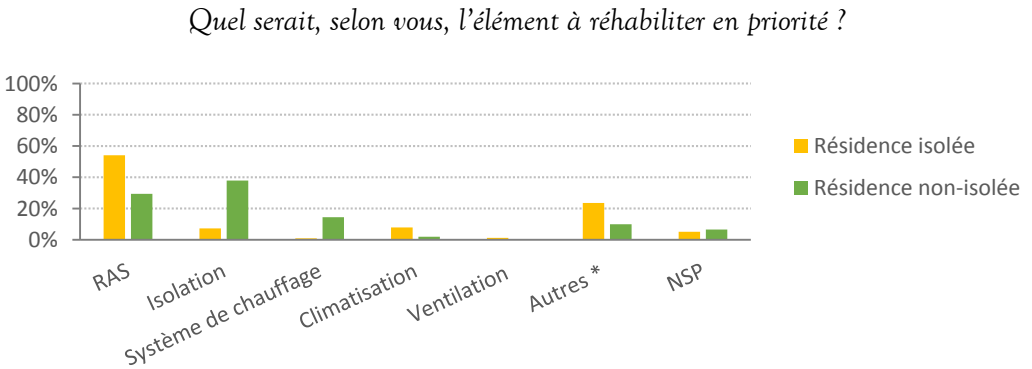


FIGURE 2.43 : *Répartition des réponses à la question « Quel serait, selon vous, l'élément à réhabiliter en priorité ? » en fonction des résidences (*Sols, Fenêtres, Toiture, Porte d'entrée)*
de l'auteur

II.3. Conclusion de l'enquête

L'enquête réalisée auprès de 210 locataires de deux résidences présente un taux de participation de 60 %. Cela nous permet d'étudier le confort et le comportement des locataires pour faire une instrumentation. Entre les deux résidences, le confort ressenti semble différent. Plus de la moitié des interrogés trouvent leur appartement confortable en toutes saisons. Cependant, parmi ceux qui ne le trouvent pas confortable, le confort d'été semble être mis en cause dans la résidence isolée. Au contraire, dans la résidence non-isolée c'est plutôt le confort d'hiver.

Les comportements sont sensiblement identiques dans les deux résidences et ce, quelle que soit l'orientation de l'appartement. Dans de nombreuses études, seules les déclarations sont prises en compte pour déterminer les comportements des individus. Cependant, il peut exister un écart entre les déclarations et la réalité *(ADEME, 2015)*. En effet, lorsqu'un individu répond à un questionnaire, et suivant l'objet de l'étude annoncé, les réponses ne sont pas toujours en corrélation avec les pratiques mais peuvent traduire l'image idéalisée de sa pratique. En d'autres termes, la société et les médias contribuent à véhiculer des messages de comportements exemplaires et lors de sa réponse à des questionnaires, l'individu peut répondre suivant les principes de cette image idéalisée et non suivant ses propres pratiques. C'est un peu comme chercher « la » bonne réponse là où il n'y a ni bonne ni mauvaise réponse puisque nous étudions les comportements dans leur globalité. Pour contourner cet éventuel biais, nous avons choisi de les évaluer par l'intermédiaire de capteurs dédiés.

III. Instrumentation in situ

L'instrumentation *in situ* permet de comparer les ambiances thermiques de différents appartements mais aussi les pratiques de leurs locataires. Après avoir expliqué les données à mesurer, nous nous intéresserons à la réalisation de boîtiers autonomes contenant l'ensemble des capteurs nécessaires à notre étude. Enfin, sur la base du sondage au porte à porte, treize appartements, dont les locataires ont des comportements similaires au moins d'après leurs déclarations, sont sélectionnés afin de pouvoir les comparer. Nous verrons cependant, dans la suite de l'étude que ce n'est pas toujours le cas.

III.1. Une instrumentation pour mesurer quoi ?

Le cahier des charges d'une instrumentation en site occupé sur une année complète requiert la mise en place d'un boîtier de capteurs d'un encombrement minimum et d'un coût réduit. De plus, afin de limiter les dérangements des locataires il ne doit pas être branché sur le secteur et ne pas produire d'ondes. En effet, lors de l'enquête c'est une des questions fréquentes qui nous a été posée avant l'acceptation de l'instrumentation. De plus il a fallu préciser qu'il n'y avait ni caméra, ni enregistreur sonore. D'ailleurs, malgré les précautions prises, au bout de quatre mois, il a fallu les retirer chez deux locataires qui se sentaient espionnés. Nous les avons alors repositionnés dans d'autres appartements.

L'instrumentation *in situ* permet de mesurer les pratiques réelles des habitants sur leur fenêtre et leur volet. Pour notre étude, nous souhaitions obtenir les informations suivantes :

- Température ambiante
- Humidité relative
- Heure d'ouverture ou de fermeture de la fenêtre principale
- Luminosité
- Heure d'ouverture ou de fermeture du volet

Nous avons vu lors du *chapitre 1-III.2*, qu'il existe différentes études qui ont cherché à connaître les paramètres influençant les actions ou la position des fenêtres, des volets, des systèmes, etc. Par l'intermédiaire de nos mesures, nous pouvons caractériser les pratiques des locataires étudiés mais surtout identifier des profils d'occupant qui nous serviront de base pour les simulations de thermique dynamique.

III.2. Réalisation d'un enregistreur de données autonome : la solution Arduino

Nous n'avons pas trouvé dans le commerce un capteur mesurant les différentes données citées précédemment à un prix raisonnable. La seule solution trouvée aurait été de multiplier les boîtiers de réception/acquisition des mesures, engendrant alors un encombrement plus important. Nous nous sommes alors orientés vers les solutions Arduino afin de concevoir nous-mêmes les boitiers de capteurs. Patrice VALORGE et Michel d'AMBRA, électroniciens au service expérimentations du L.M.G.C. et Joël DURAND, enseignant en Génie Électrique et Informatique Industrielle à l'I.U.T. de Nîmes, nous ont aidé pour l'optimisation du montage électrique et pour la consolidation de nos connaissances en programmation.

Notre objectif est double : détecter l'ouverture et/ou la fermeture d'une fenêtre et évaluer toutes les 15 minutes la température, l'humidité et la luminosité. Les données sont horodatées avant d'être enregistrées sur une carte mémoire de type SD (Secure Digital).

III.2.1. La solution Arduino

Le système Arduino est composé d'« *une plateforme open-source d'électronique programmée basée sur une simple carte à microcontrôleur (de la famille AVR), et d'un logiciel, véritable environnement de développement intégré, pour écrire, compiler et transférer le programme vers la carte à microcontrôleur.* » *(HINAULT, 2010a)*. Ce système, très modulable, permet de développer à moindre coût des objets interactifs, pilotant des moteurs, des diodes… ou des objets mesurant les caractéristiques de l'environnement. L'utilisation de ce système nous permet de regrouper tous les capteurs dont nous avons besoin pour notre expérimentation dans un seul boîtier.

Il existe différents types de carte électronique Arduino permettant de s'adapter aux différents projets que l'on peut imaginer. Elles sont fabriquées en Italie et se nomment Arduino Méga, Arduino Leonardo, Arduino Mini, Arduino Uno… Cette dernière est la plus simple et la plus accessible pour des non-initiés car plus robuste mécaniquement et informatiquement. Elle nous a servi pour les premières instrumentations (Annexe C). Les cartes sont peu chères (coût inférieur à 20 euros) et leurs schémas électroniques sont libres d'utilisation et d'adaptation ce qui permet de les rendre très polyvalentes pour tous les projets que l'on peut imaginer.

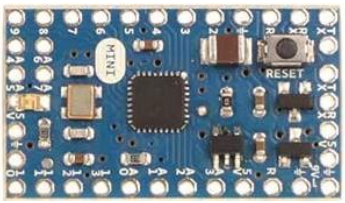
Afin de programmer la carte, il est nécessaire d'installer le logiciel de développement gratuit, open-source et multiplateforme Arduino, écrit en Java. Le langage de programmation Arduino est basé sur l'environnement multimédia de programmation Processing. Il représente donc une base d'apprentissage intéressante pour d'autres langages de programmation. Il existe sur internet, une communauté très active permettant de se familiariser très rapidement avec l'environnement et la programmation Arduino. Des librairies, créées par des passionnés d'électronique, simplifient la programmation du microcontrôleur. Elles sont disponibles sur les forums (Forum Arduino, Snootlab…) *(ARDUINO, 2013)* et sur certains sites spécialisés *(LADYADA, 2012a)*.

Nous présentons ici les éléments qui nous ont permis de réaliser un boîtier de capteurs fonctionnant à l'aide de quatre piles AA. De plus, l'autonomie électrique doit être de l'ordre de deux à trois mois afin de limiter les interventions chez les locataires sélectionnés pour cette instrumentation *in situ*. Toute la démarche de conception est explicitée en *annexe C*.

III.2.2. La carte et ses capteurs

Pour la réalisation du boîtier de capteurs, la carte Arduino nécessite l'ajout des différents capteurs et éléments permettant la mesure et le stockage des informations recherchées. Leurs caractéristiques techniques sont présentées dans les tableaux de l'*annexe D*.

III.2.2.1. Carte avec microprocesseur : Arduino Pro mini



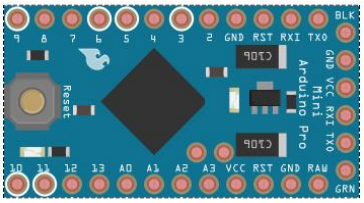
Représenté sur les schémas par


FIGURE 2.44 : *Photographie du capteur de température et d'humidité DHT22*
Arduino.cc

La carte Arduino Pro mini est une carte Arduino miniaturisée. Grâce à sa faible consommation électrique, elle est conçue pour être intégrée dans un projet fini. Elle embarque un microprocesseur qui permettra le stockage et la lecture du programme compilé.

III.2.2.2. Température ambiante et humidité relative

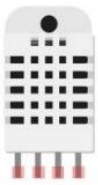

Représenté sur les schémas par


FIGURE 2.45 *: Photographie du capteur de température et d'humidité DHT22*
roboshop.com

Le capteur DHT22, entouré d'une protection en plastique perforée, mesure à la fois la température grâce à une thermistance et l'humidité relative grâce à un capteur capacitif. La durée minimale d'attente entre deux mesures est de deux secondes. Il est donc adapté pour des mesures toutes les 15 minutes. Nous avons programmé ce capteur grâce à l'utilisation de la librairie DHT et des exemples créés par *(LADYADA, 2012a)*.

III.2.2.3. Ouverture/fermeture des fenêtres



Représenté sur les schémas par



FIGURE 2.46 : *Photographie du capteur d'ouverture/fermeture de fenêtre lextronic.fr*

Le capteur d'ouverture/fermeture de fenêtres est un interrupteur de porte magnétique normalement ouvert. Lorsque la fenêtre est fermée, l'aimant (partie mobile) situé contre la partie fixe, ferme l'interrupteur : la tension mesurée est égale à 0 V. Lorsque la fenêtre est ouverte l'interrupteur s'ouvre et la tension est de 5 V. Les boîtiers sont en P.V.C. et sont fixés sur l'ouvrant et le châssis de la fenêtre. La programmation correspond à celle d'un bouton poussoir. Des exemples sont disponibles dans le logiciel Arduino. Lorsqu'un interrupteur est actionné, un certain temps est nécessaire avant que la tension se stabilise, c'est ce qu'on appelle l'effet rebond (*Figure 2.47*). Pour éviter ce phénomène et n'obtenir qu'une seule interruption lors de l'ouverture ou de la fermeture de la fenêtre, un délai, pendant lequel le programme ignore les interruptions involontaires suivantes, est nécessaire, ici 500 ms.

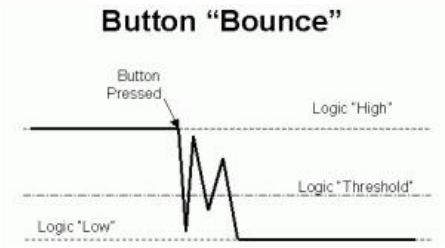


FIGURE 2.47 *: Effet rebond lorsqu'un bouton poussoir/interrupteur est actionné* (LAMBOT, 2013)

III.2.2.4. Luminosité pour évaluer l'ouverture/fermeture des volets

Il existe deux types de capteur de luminosité : des capteurs « intelligents » basés sur la technologie I2C (TSL2561) et d'autres analogiques (GL5528) qui permettent d'avoir un échantillon de mesure de 0 à 1024.

Le capteur TSL2561 (*Figure 2.48*) transforme l'intensité lumineuse en un signal numérique grâce à la connexion I2C (Inter Integrated Circuit Bus). Elle permet de relier le microcontrôleur et le circuit intégré grâce à trois fils et de les faire communiquer facilement par une liaison série synchrone :

- Un fil pour le signal de données (SDA : la broches A4 sur le microcontrôleur)
- Un fil pour le signal d'horloge (SCL : la broche A5 sur le microcontrôleur)
- Un fil pour le signal de référence électrique (la masse)

Les équipements connectés par la connexion I2C peuvent être soit maître, soit esclave. Les échanges ont toujours lieu à partir du maître vers un ou plusieurs esclaves. En l'absence de transmission, les lignes SDA et SCL sont maintenues au niveau « haut ». Les informations sont transmises sur les lignes SDA et SCL par l'intermédiaire de changement de niveau de ces lignes. Lorsque l'on souhaite la lecture des données, le maître envoie à l'esclave une condition « départ » (la ligne SDA bascule en niveau « haut» alors que la ligne SCL reste en niveau « haut »). À la fin de

la transmission, le maître envoie un signal « stop » (la ligne SDA bascule en niveau « haut » alors que la ligne SCL est à un niveau « haut »).

Dans le cas du capteur de luminosité, le microcontrôleur (le maître) demande les informations au capteur (l'esclave). Dans un second temps, le capteur devient maître en envoyant les informations et le microcontrôleur esclave pour les recevoir. Cette communication est gérée par la librairie Wire.h incluse dans le logiciel Arduino. La programmation a été réalisée grâce à la librairie et aux exemples proposés par *(LADYADA, 2012c)*.



FIGURE 2.48 *: Photographie du capteur de luminosité TSL2561*
Lextronic.fr

Le capteur de luminosité GL5528 (*Figure 2.49*) est une photorésistance. Sa résistance diminue lorsque l'intensité de la luminosité ambiante augmente. Il doit être connecté à une broche analogique. Sa programmation a été réalisée grâce aux exemples de *(LADYADA, 2012b)*.



Représenté sur les schémas par

FIGURE 2.49 *: Photographie du capteur de luminosité GL5528*
Lextronic.fr

Afin de choisir le capteur à utiliser pour notre instrumentation, nous les avons placés près d'une fenêtre possédant un rideau de couleur blanche mais pas de volets et nous avons enregistré les mesures toutes les minutes pendant deux jours (31 août et 1er septembre 2013 - *Figure 2.50*).

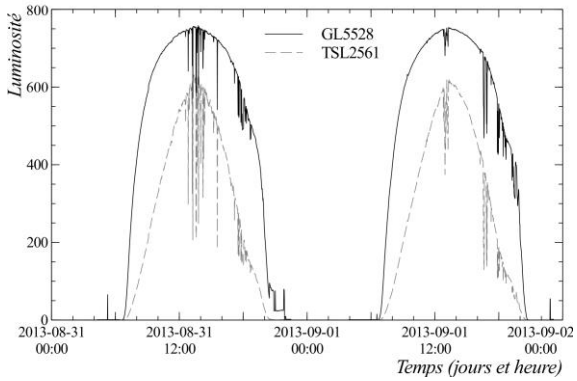


FIGURE 2.50 : *Mesure de la luminosité avec les deux capteurs*
de l'auteur

L'analyse de la *figure 2.50* nous montre deux courbes très proches aux allures de cloches. La comparaison des courbes avec les actions effectuées dans l'appartement montre que le capteur GL5528 détecte les périodes où la lumière a été allumée le matin ou le soir alors que le TSL2561 ne le fait pas. Le capteur GL5528 est donc plus sensible à une faible luminosité. Pour les simulations de thermique dynamique, nous souhaitons connaître la position des volets en journée par l'intermédiaire de la luminosité, ainsi que l'état allumé/éteint de l'éclairage artificiel. Nous avons alors choisi le capteur GL5528 qui permet de mesurer ces deux éléments. Cependant, nous verrons par la suite que détecter la position des volets grâce à cette technique est complexe. Nous aurions peut être obtenu de meilleurs résultats en conservant les deux capteurs lors de l'instrumentation finale.

III.2.2.5. Horodatage



Représenté sur les schémas par

FIGURE 2.51 : *Photographie de l'horloge temps réel (RTC)*
Roboshop.com

Il s'agit d'une horloge à temps réel qui possède deux alarmes (une à heures fixes ou une à durée fixe par exemple tous les quarts d'heure). Une fois que l'heure est réglée, comme elle est alimentée par sa propre pile, il n'y a plus besoin de la réinitialiser, l'incrémentation est automatique. Cette horloge communique avec la carte Arduino grâce à la connexion S.P.I..

La connexion S.P.I. (Serial Peripheral Interface), communique selon un schéma maître-esclave (*Figure 2.52*). Il contient quatre signaux logiques :

- SCK Horloge (généré par le maître)
- MOSI Master Output, Slave Input
  (maître en « sortie » et esclave en « entrée », généré par le maître)
- MISO Master Input, Slave Output
  (maître en « entrée » et esclave en « sortie », généré par l'esclave)
- SS Slave Select, Actif à l'état « bas », (sélection de l'esclave, généré par le maître)

Avec une communication en S.P.I., le maître sélectionne l'esclave avec lequel il veut communiquer et l'esclave répond aux requêtes du maître. La sélection du destinataire se fait sur une ligne dédiée : le slave select (SS). Lorsque cette ligne est à un niveau « bas », la communication commence et les données sont échangées sur les lignes MOSI et MISO. Lorsque la communication est terminée, on remet le « slave select » à un niveau « haut ».

Nous avons deux éléments qui communiquent grâce à la liaison S.P.I. : l'horloge DS3234 et le lecteur de carte mémoire. Ils partagent les lignes SCK, MOSI et MISO. Le « slave select » (SS) sera individuel à chacun des appareils de manière à communiquer avec eux au moment voulu. (D10 pour l'horloge et D9 pour le lecteur de carte mémoire). La programmation en niveau « haut » ou « bas » de chacune des lignes nous permet de choisir l'esclave avec qui le maître doit travailler. L'horloge DS3234 est capable de générer via son alarme un signal « bas » sur la ligne SQW. C'est cette caractéristique qui nous permet de « réveiller » la carte Arduino pour faire les mesures toutes les 15 minutes. La programmation de l'horloge est faite grâce au code fourni par le fabriquant *(SPARKFUN ELECTRONICS, 2011)*. L'alarme quant à elle a été programmée via la librairie DS3234 réalisée par *(RODAN, 2013)*.

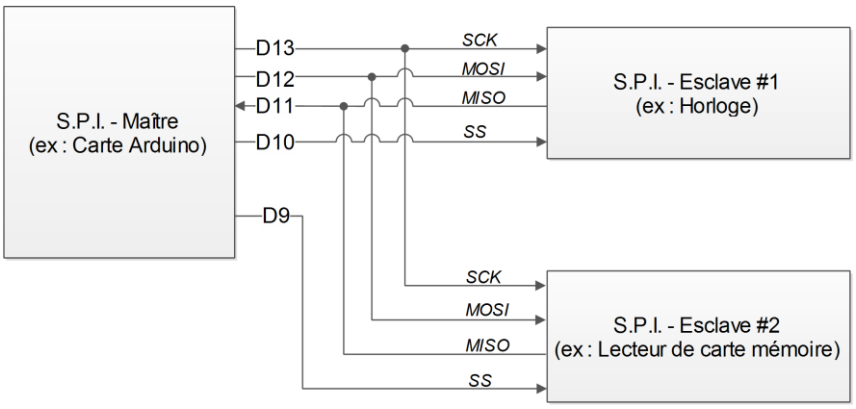
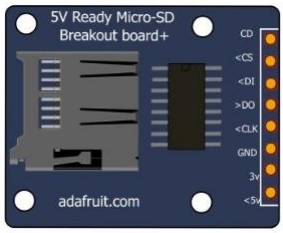


FIGURE 2.52 : *Schéma de la connexion de deux composants à la carte Arduino à partir de* (BOXALL, 2011)

III.2.2.6. Enregistrement des données sur une carte mémoire





Représenté sur les schémas par

FIGURE 2.53 : *Photographie du module lecteur de carte mémoire SD Roboshop.com*

Les données, que nous obtenons grâce aux différents capteurs précédents, sont ensuite enregistrées sur une carte mémoire. Le lecteur de carte communique avec la carte Arduino grâce à la communication S.P.I. comme l'horloge. La programmation a été réalisée grâce à la librairie SdFatLib *(GREIMAN, 2013)* et l'exemple de code de *(HINAULT, 2010b)*.

III.2.3. Montage et programmation compilés dans le boîtier de capteurs

Sur la *figure 2.54*, les différents capteurs, le lecteur de carte mémoire et l'horloge sont connectés à un circuit imprimé lui-même relié à une carte Arduino Pro Mini. Les alimentations continues (VCC) sont représentées en rouge alors que les connexions à la masse (GND) sont en noir. Les capteurs de température, d'humidité, de luminosité et le lecteur de carte SD sont alimentés par différentes bornes digitales programmées en « sortie » lorsque la lecture ou l'enregistrement des données est nécessaire. Les liaisons en blanc symbolisent les connexions de la communication par S.P.I. (cf. *Figure 2.52*). Les connexions en couleur permettent le passage des données entre les composants et la carte Arduino Uno. Cette dernière est alimentée par quatre piles AA de 1,5 V chacune.

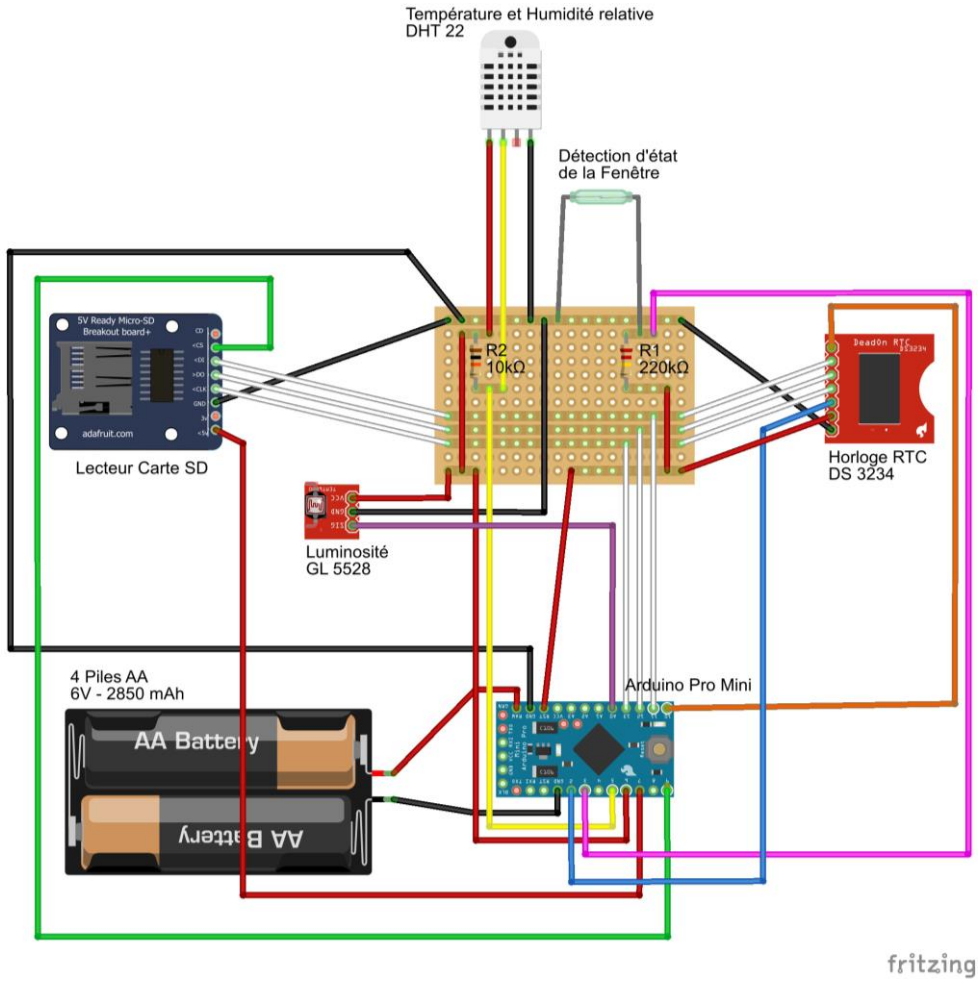


FIGURE 2.54 : *Schéma de montage final des capteurs sur la carte Arduino Pro mini.*
de l'auteur

La programmation finale de la carte, schématisée sur le diagramme de la *figure 2.56*, comporte différentes étapes :

- Un en-tête déclaratif pour déclarer les éléments utilisés dans le programme
- Une fonction SETUP pour initialiser les capteurs et la carte mémoire
- Une fonction LOOP qui correspond à la phase de mesure.

Cette programmation nous permet d'obtenir un fichier texte de la forme de celui présenté sur la *figure 2.55*. Il est enregistré sur une carte mémoire dont les données peuvent ensuite être lues dans un tableur.

```
Date ; Heure ; Température ; Humidité Relative ; Luminosité ; État fenêtre
29/8/13;17:12:1;28.2;34.5;660;1;
29/8/13;17:13:1;28.2;34.5;657;1;
29/8/13;17:14:1;28.2;34.4;655;1;
29/8/13;17:14:15;28.2;34.4;655;0;
29/8/13;17:15:1;28.2;34.4;656;0;
29/8/13;……..
```

FIGURE 2.55 : *Exemple de données extraites de la carte SD*
de l'auteur

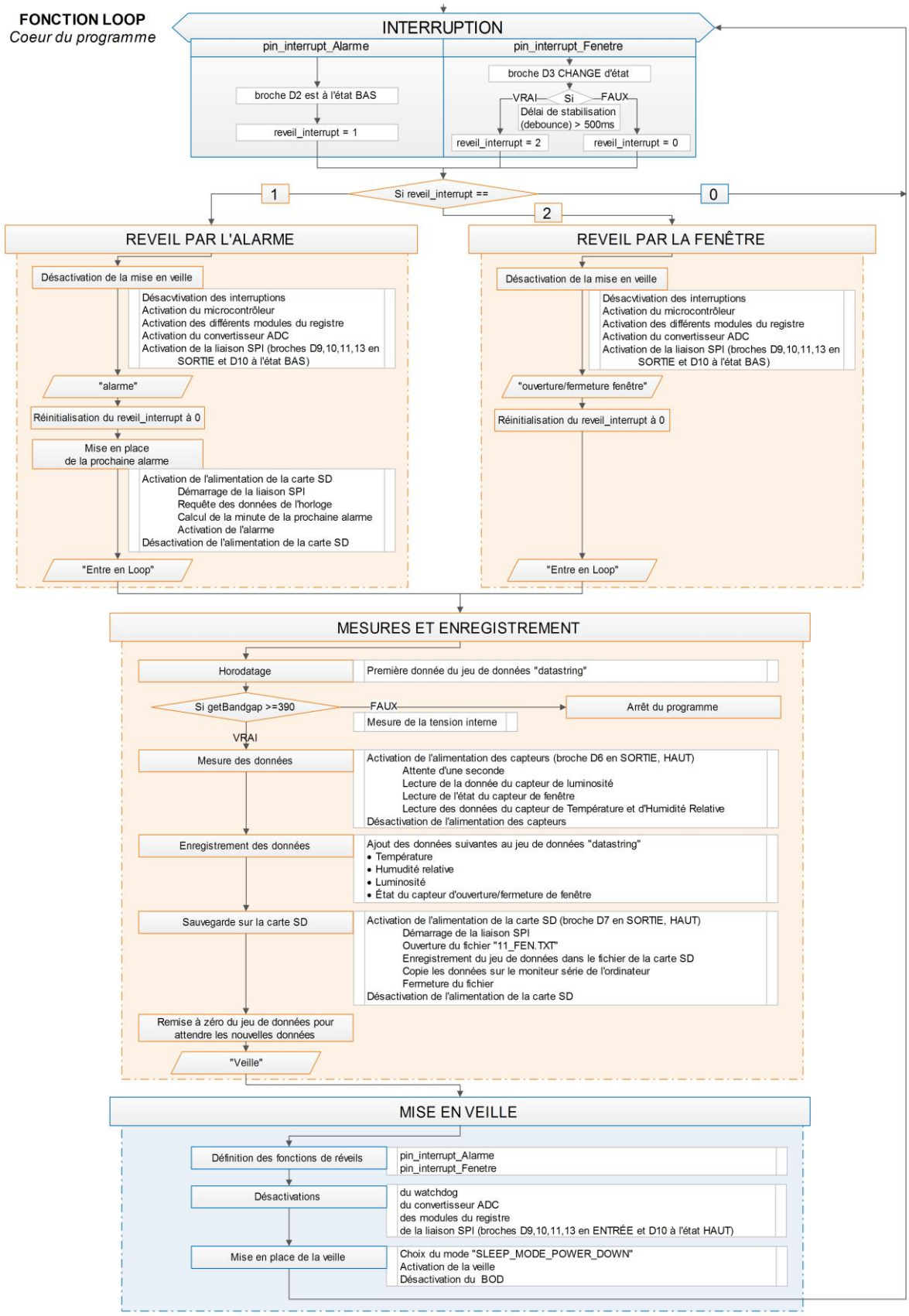


FIGURE 2.56 *: Diagramme du programme téléchargé dans la carte de l'auteur*

III.2.4. Ergonomie du boîtier de capteurs

Afin de réduire au maximum l'encombrement du capteur, nous avons réalisé un circuit imprimé (*Figure 2.57*) permettant de réduire les connexions câblées. Seuls les capteurs déportés sur l'extérieur du boîtier restent câblés afin de les positionner plus facilement sur le boîtier. Grâce à une imprimante 3D, (MakerBot : Replicator 2x : *figure 2.59*), nous avons réalisé le boîtier permettant de positionner tous les capteurs (*Figure 2.58*). Le coût total du boîtier de capteurs pour le fonctionnement sur une année est estimé à 100 euros.

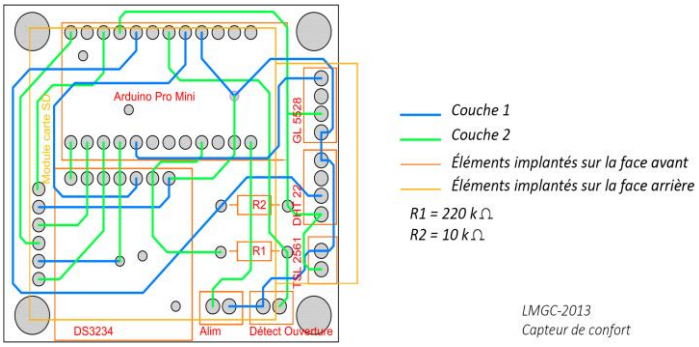


FIGURE 2.57 : *Dessin du circuit imprimé*
de l'auteur

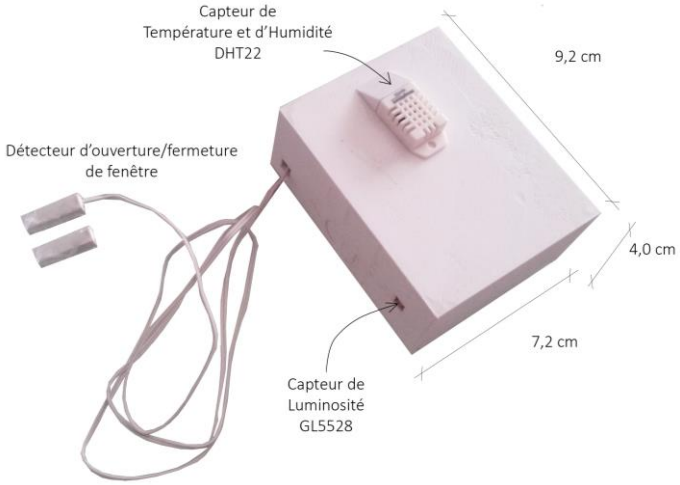
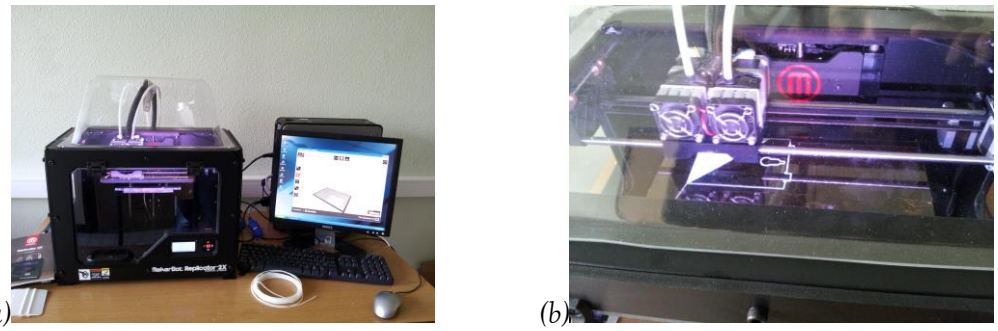


FIGURE 2.58 : *Photographie du boîtier de capteurs*
de l'auteur



(a) (b)

FIGURE 2.59 : *Photographie (a) de l'imprimante MakerBot : Replicator 2x et (b) de l'impression d'un couvercle du boîtier*
de l'auteur

III.3. Choix des appartements et positionnement des capteurs

Dans les deux résidences, plus de la moitié des locataires (58,9 % dans la résidence isolée et 81 % dans la résidence non-isolée) ont accepté de poursuivre l'étude, ce qui nous a permis d'avoir un panel suffisant pour sélectionner les appartements à instrumenter.

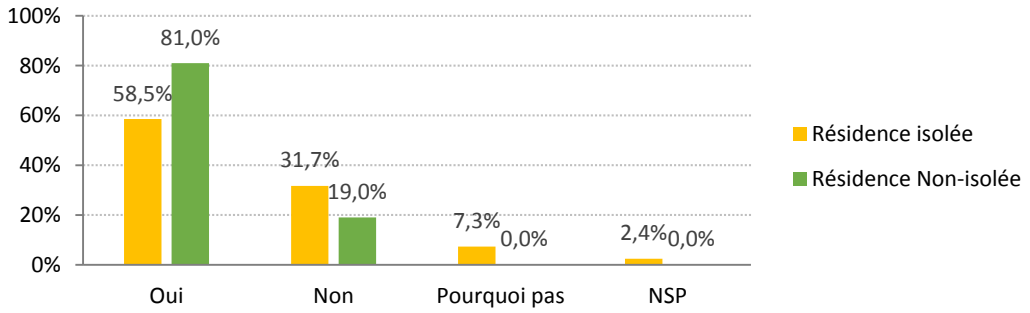


FIGURE 2.60 : *Répartition en pourcentage du nombre de personnes acceptant ou non la poursuite de l'étude par une instrumentation*
de l'auteur

III.3.1. Méthode de sélection des appartements étudiés

Les questionnaires ont révélé une forte variabilité de comportements parmi les locataires. Afin d'identifier des appartements suffisamment semblables pour être comparés, les locataires, ayant accepté de participer à l'instrumentation, ont été répartis par catégories en fonction des déclarations qu'ils avaient faites.

Les caractéristiques des appartements sont des données objectives. Elles ont donc constitué la base de la répartition qui a été faite à partir du type de la résidence (isolée ou non-isolée) et de l'exposition du séjour (Sud, Est ou Ouest). Nous avons ensuite identifié les tranches d'âges des chefs de famille (16-30 ans, 31-65 ans, plus de 66 ans) et recherché des appartements avec des locataires présents toute la journée avec des comportements similaires. Chacune des branches du diagramme en *figure 2.61* permet d'obtenir des appartements dont les critères cités précédemment sont semblables. Par souci de confidentialité, nous avons supprimé les numéros d'appartements correspondants à chacune des branches. Grâce à cette organisation, nous avons sélectionné des appartements dont les caractéristiques sont similaires d'après les déclarations des occupants.

Pour étudier le comportement des individus nous avons restreint l'étude aux personnes âgées de 31 à 65 ans et nous avons choisi deux personnes ayant plus de 66 ans afin de comparer les pratiques et le confort malgré des déclarations identiques. Les treize appartements sélectionnés (*Figure 2.62*) ont au moins une personne présente toute la journée ce qui permet de comprendre ses actions au cours de la journée. Enfin, les pratiques d'adaptations estivales et hivernales ont induit une répartition des locataires en plusieurs catégories. Nous avons choisi des appartements dont les locataires ont un comportement « actif » vis-à-vis de leur confort. En été, ils préfèrent ouvrir leurs fenêtres la nuit. L'hiver, ils choisissent de se couvrir en cas de chute des températures intérieures. Cependant, lors de la prise de contact avec les locataires pour l'instrumentation de leur appartement, certains se sont rétractés. Nous avons alors choisi des appartements avec des déclarations similaires ou ayant une correspondance dans l'autre résidence. Les caractéristiques des appartements étudiés sont identifiées en *annexe F*.

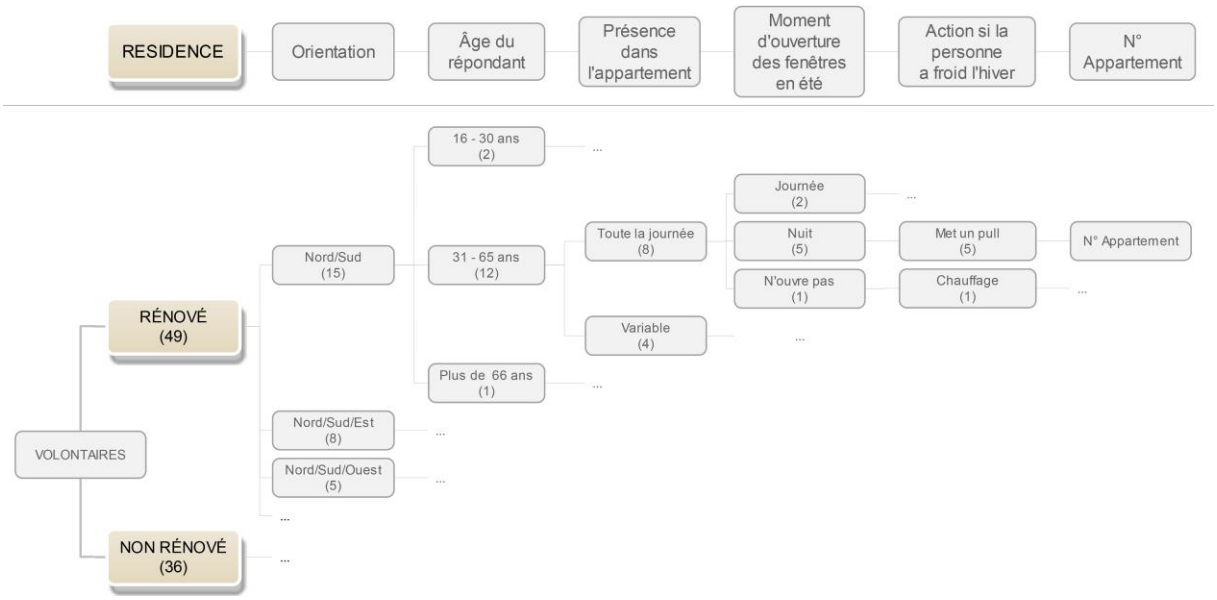


FIGURE 2.61 : *Diagramme de répartition des appartements*
de l'auteur



FIGURE 2.62 : *Axonométrie des appartements instrumentés*
de l'auteur

Pour identifier les appartements, nous avons établi une codification basée sur les caractéristiques de l'appartement et des locataires synthétisées dans le *tableau 2.6*. La première information concerne le type de résidence isolée (I) ou non-isolée (N). Ensuite, les appartements étant traversants, l'exposition du séjour est définie (au Sud (SN), à l'Est (EO) ou à l'Ouest (OE)), puis l'étage de l'appartement est caractérisé grâce à un numéro. Pour finir, la tranche d'âge des locataires est mentionnée. Les personnes de 31 à 65 ans sont considérées comme des adultes (A) et les personnes plus âgées comme des séniors (S).

Code	Résidence	Exposition du séjour	Étage	Locataire
I-SN-0-A	Isolée	Sud	R.D.C.	Adulte
I-SN-1-A	Isolée	Sud	R+1	Adulte
I-SN-2-A	Isolée	Sud	R+2	Adulte
I-SN-3-A	Isolée	Sud	R+3	Adulte
I-SN-3D-S	Isolée	Sud	R+3 - Dernier étage	Sénior
I-EO-2-A	Isolée	Est	R+2	Adulte
I-OE-2-A	Isolée	Ouest	R+2	Adulte
N-SN-0-A	Non-isolée	Sud	R.D.C.	Adulte
N-SN-1a-A	Non-isolée	Sud	R+1	Adulte
N-SN-1b-A	Non-isolée	Sud	R+1	Adulte
N-SN-3D-A	Non-isolée	Sud	R+3 - Dernier étage	Adulte
N-SN-2-S	Non-isolée	Sud	R+2	Sénior
N-EO-1-A	Non-isolée	Est	R+1	Adulte

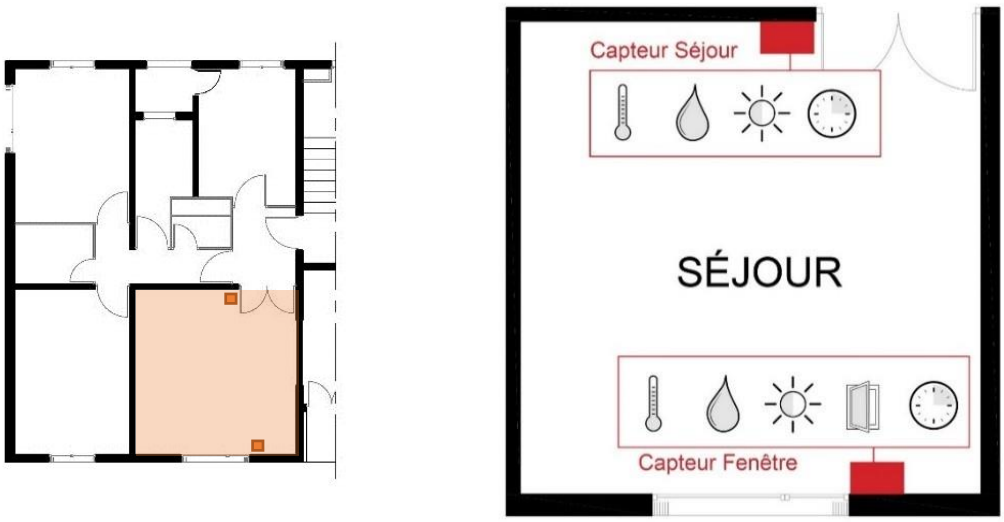
TABLEAU 2.6 : *Tableau explicatif de la codification des appartements*
de l'auteur

III.3.2. Positionnement des capteurs

Du 2 décembre 2013 au 5 février 2015, treize appartements ont été équipés de deux boîtiers de capteurs (le « capteur séjour » et le « capteur fenêtre ») au sein du séjour de leur logement (*Figure 2.63*). Nous avons choisi d'instrumenter uniquement le séjour car, d'une part, nous ne souhaitions pas entrer dans l'intimité des chambres et, d'autre part, c'est la pièce dont le taux d'occupation est probablement le plus important au cours de la journée. Dans le *tableau 2.7*, sont répertoriées les mesures effectuées au sein des logements. La température, l'humidité relative et la luminosité sont relevées toutes les 15 minutes grâce à nos boîtiers de capteurs. Le premier est situé au centre du séjour : le « capteur séjour ». Il est positionné dans un environnement stable, protégé des rayonnements directs du soleil et des mouvements d'air. Le second, « capteur fenêtre » relève également l'état ouvert/fermé des fenêtres. Il est donc positionné près de la fenêtre du séjour qui est déclarée comme principalement ouverte. Tous les deux mois, lors du relevé des données enregistrées et de l'entretien des boîtiers de capteurs, nous avons réalisé un suivi des consommations d'énergie (électricité et gaz) grâce à un relevé des compteurs situés sur les paliers. À cette occasion, nous avons également fait des mesures des températures des parois du séjour (mur extérieur, sol, plafond, mur intérieur) et un relevé des débits d'air aux bouches d'extraction de la V.M.C. (cuisine, salle de bain, toilettes). Lors de ces visites, nous avons également pu interroger les locataires sur leurs pratiques et dans certaines situations comprendre leur motivation pour agir de telle ou telle manière.

Mesure	*« Capteur Séjour »*	*« Capteur Fenêtre »*	*Sur place*
Fréquence	15 minutes	À l'ouverture/fermeture de la fenêtre 15 minutes	Tous les deux mois
Données recueillies	Température ambiante Humidité relative Luminosité	Température ambiante Humidité relative Luminosité État de la fenêtre	Électricité Gaz (chauffage + E.C.S.) Températures des parois Débits d'air V.M.C.
Commentaire	Éviter l'influence des radiations solaires et des mouvements d'air	Sur la fenêtre que les locataires ouvrent principalement	Cahier de suivi

TABLEAU 2.7 : *Détail des relevés*
de l'auteur



(a) *(b)*

FIGURE 2.63 : *(a) Plan type d'un appartement (T3) et (b) positionnement des capteurs dans le séjour*
de l'auteur

Conclusion

L'étude de l'ambiance thermique, du confort et des comportements individuels est réalisée au sein de deux résidences identiques, situées dans la région méditerranéenne, dont une seule a été thermiquement isolée par l'extérieur. Une enquête au porte à porte, auprès des occupants de ces deux résidences, a permis de mettre en évidence une différence de confort ressenti :

- De l'inconfort en hiver dans la résidence non-isolée
- De l'inconfort d'été dans la résidence isolée.

D'après les déclarations, dans les deux résidences, le coût du chauffage est majoritairement élevé ou très élevé ce qui laisse supposer que les consommations énergétiques n'ont pas ou peu été modifiées par la pose de l'isolation par l'extérieur. De plus, les comportements semblent similaires entre les deux résidences, la mise en place de l'isolation par l'extérieur ne semble pas avoir été accompagnée d'un changement de pratiques. Cependant, nous identifions des typologies de comportement des locataires. Le classement de ces typologies permet d'identifier des appartements avec des locataires ayant un comportement similaire.

13 appartements dont les locataires étaient volontaires ont été instrumentés avec deux boîtiers de capteurs que nous avons réalisés avec la technologie Arduino. Grâce à la mesure de la température ambiante, de l'humidité relative, de l'état ouvert/fermé de la fenêtre et du volet (déterminé grâce à un capteur de luminosité) nous pouvons estimer l'ambiance thermique ainsi que le comportement réel des locataires au niveau de leur fenêtre et leur volet. Grâce à cette campagne de mesure d'une durée d'un an avec des mesures toutes les 15 minutes nous obtenons plus de 4,5 millions de points de mesure. Nous décrivons, dans le chapitre suivant, le traitement et l'interprétation de ces données afin de déterminer des scénarios de comportement réel d'occupants pour réaliser des simulations de thermique dynamique.

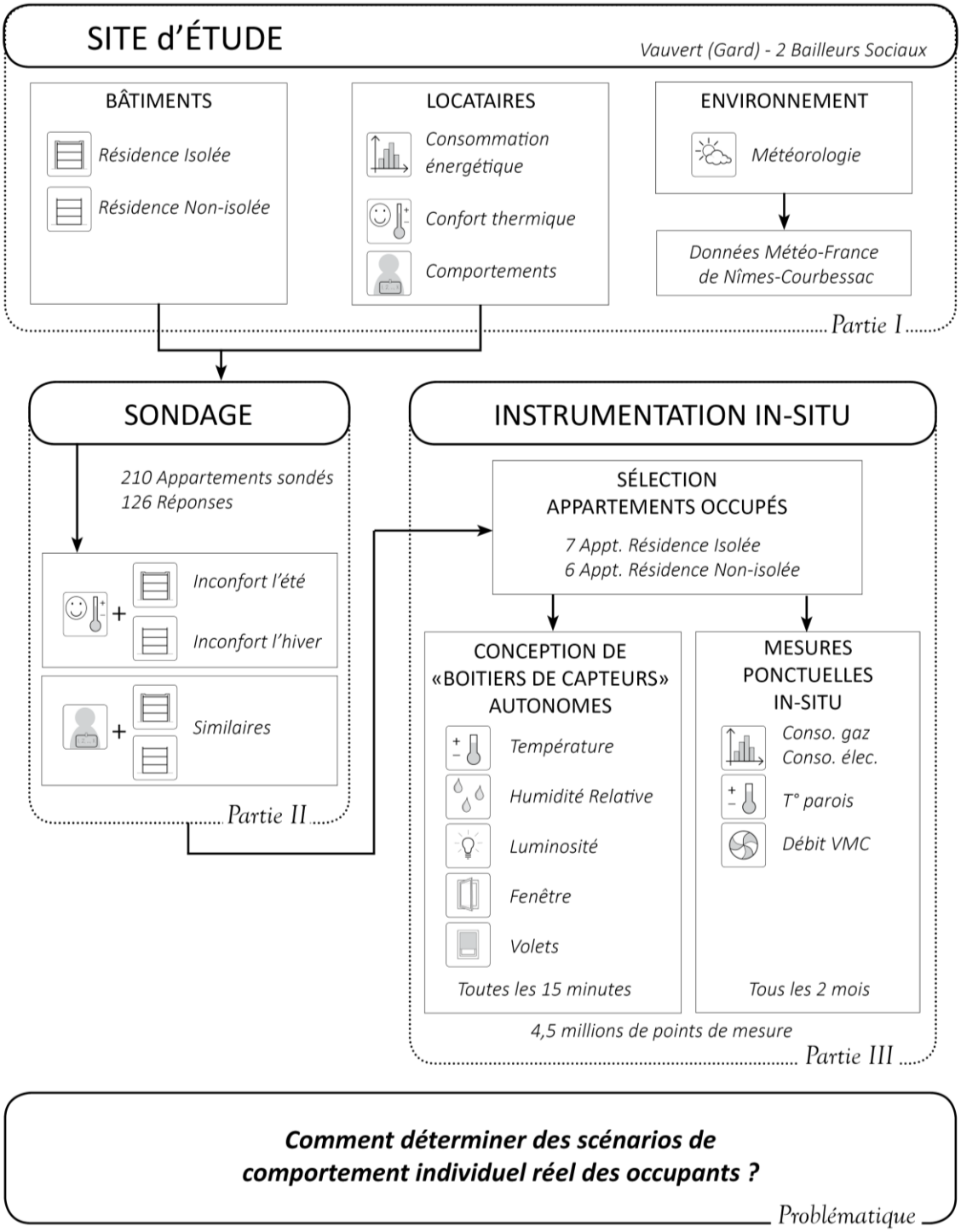


FIGURE 2.64 : *Schéma conclusion du chapitre 2*
de l'auteur

Chapitre 3 : ANALYSE EXPÉRIMENTALE : COMPORTEMENTS INDIVIDUELS, CONSOMMATIONS ET CONFORT THERMIQUE DANS DES BÂTIMENTS ISOLÉS ET DANS DES BÂTIMENTS NON-ISOLÉS

« Il n'y a pas de fait en soi. Ce qui arrive est un groupe de phénomènes, choisis et groupés par un être qui les interprète. »
Nietzsche, philosophe (1844-1900)

Introduction

Afin de réduire les consommations énergétiques des bâtiments nous avons vu lors du *chapitre 1* que la réglementation thermique 2012 prévoit la conception des bâtiments grâce à des logiciels de thermique dynamique. Les caractéristiques constructives, les données météorologiques, les systèmes mais aussi les pratiques des individus y sont modélisés. Ces dernières se basent sur des scénarios standardisés prenant en compte le comportement d'un individu idéal. Or, la communauté scientifique admet que le comportement individuel peut expliquer les écarts de consommations énergétiques entre les prévisions et la réalité.

Le *chapitre 2* nous a permis de décrire l'instrumentation mise en place au sein de 13 appartements occupés afin d'identifier des scénarios basés sur le comportement réel des occupants. Au cours de ce chapitre nous analysons les consommations énergétiques, le confort et les actions des occupants. L'objectif étant de définir les actions réelles des occupants et de caractériser l'impact des couples d'actions fenêtre-volet sur le confort et sur les consommations de chauffage. Cette analyse nous permet de définir des profils d'occupant qui serviront de base aux futures simulations de thermique dynamique.

L'analyse des pratiques des occupants des appartements étudiés, du fait de leur faible nombre (13 au total), n'a pas vocation à être statistiquement représentative des pratiques globales mais plutôt à révéler une réalité qui pourra être comparée avec les données standardisées.

Les données des différents appartements sont représentées selon un ordre établi en fonction des orientations et des étages des appartements et non en regroupant les données similaires. Ceci afin de faciliter une étude comparative entre les saisons et les différents éléments étudiés (usages de la fenêtre ou du volet, étude du confort et des consommations) répartis tout au long du chapitre.

I. Confort et consommations - résidence isolée et résidence non-isolée

Notre site d'étude se compose de deux résidences aux caractéristiques constructives distinctes. Dans la majorité des cas l'enjeu de la mise en place d'une isolation thermique par l'extérieur est de lutter contre la précarité énergétique des locataires de bâtiments anciens. L'objectif étant alors de réduire les consommations de chauffage tout en augmentant le confort thermique. Dans cette partie, nous comparons le confort et les consommations de chauffage entre la résidence thermiquement isolée et celle qui ne l'est pas afin de vérifier cette hypothèse.

I.1. Étude des consommations énergétiques annuelles

Lors de l'instrumentation *in situ*, nous avons également réalisé des relevés bimensuels des consommations de gaz et d'électricité au niveau des compteurs situés sur les paliers de chaque appartement.

– Consommations de gaz

Dans les deux résidences, le gaz est l'énergie utilisée pour le système de chauffage, la cuisson, et l'eau chaude sanitaire. Afin d'isoler la part attribuée au chauffage, nous avons soustrait aux consommations d'hiver l'équivalent des consommations de gaz d'été. Ce procédé n'est pas parfait puisque les habitudes de consommation (d'eau chaude sanitaire (E.C.S.) et de cuisson) peuvent varier suivant les saisons. Toutefois, nous estimons, dans un premier temps, que ces différences impactent peu les consommations propres au chauffage. L'analyse de la *figure 3.1* montre trois points particuliers :

– La non mise en route du chauffage chez certains locataires : un seul appartement (N-EO-1-A) est concerné dans la résidence non-isolée et deux dans la résidence isolée (I-SN-3-A et I-EO-2-A). Cette remarque va dans le sens des déclarations faites par les occupants lors des entretiens bimensuels.
– Les consommations maximales : le locataire qui consomme le plus d'énergie pour le chauffage dans la résidence non-isolée consomme 46,4 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ contre 68,5 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ dans la résidence isolée. Les parties suivantes nous permettent d'étudier le confort et les pratiques au sein des appartements. Nous verrons que ces consommations de chauffage élevées ne conduisent pas forcément à un confort maximal et que les pratiques individuelles influent fortement. Par exemple, le locataire de la résidence isolée laisse souvent une fenêtre ouverte ce qui entraine ces consommations importantes.
– Les moyennes des consommations de gaz entre les deux résidences montrent cependant un niveau de consommation similaire (41 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ dans la résidence non-isolée, dont 17,7 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ pour le chauffage, et respectivement 42 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ et 19,5 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ dans la résidence isolée).

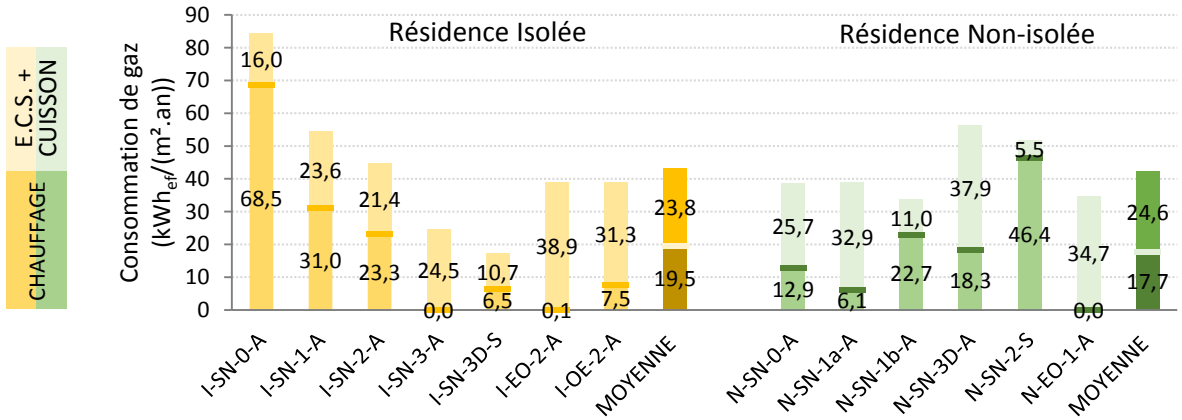


FIGURE 3.1 : *Consommation de gaz ($kWh_{ef}/(m^2.an)$) différenciée entre la part attribuée au chauffage et celle pour la cuisson et l'eau chaude sanitaire (E.C.S.) en fonction des appartements*
de l'auteur

Il est difficile de faire une statistique représentative des appartements de chacune des résidences sur la base de l'étude d'un échantillon réduit (13 appartements). Cependant, il est vrai que la pose d'une isolation thermique par l'extérieur a vocation à réduire les factures énergétiques des locataires de bâtiments anciens pour un même niveau de température intérieure dû au gain de résistance thermique sur les parois extérieures isolées. Mais les niveaux similaires de consommation des deux résidences laissent supposer que les économies escomptées n'ont pas été réalisées. Toutefois, ils expliquent dans la suite de l'étude le meilleur confort hivernal identifié dans la résidence isolée.

Le calcul du coefficient de déperdition thermique (H), selon l'équation *[Éq. 3.1]*, permet de comparer la déperdition thermique (par renouvellement d'air/infiltrations et par les parois) des appartements des deux résidences à partir des consommations réelles. Les apports gratuits (T_G) sont estimés sur la période de non-chauffage moyennés pour chaque résidence (3 °C pour la résidence non-isolée et 3,5 °C pour la résidence isolée). Nous identifions, sur la *figure 3.2*, une grande variabilité du coefficient H suivant les appartements et suivant les mois étudiés. Ces fortes fluctuations mettent en évidence deux points : d'une part les comportements individuels influent fortement sur les déperditions des bâtiments et d'autre part, l'estimation de la consommation de chauffage que nous avons réalisée semble très incertaine. En effet, nous nous basons sur une présence des occupants identique en été comme en hiver. Or, même s'ils sont présents, la consommation liée à l'eau chaude sanitaire ou à la cuisson peut varier d'une saison à l'autre en fonction du nombre d'occupants ou des habitudes individuelles. En conséquence, en moyenne, le coefficient de déperdition thermique qui semble identique dans les deux résidences, laisse supposer que l'installation de l'isolation par l'extérieur n'a eu aucun effet sur les performances énergétiques du bâtiment. Les analyses faites au *chapitre 4* montrent que c'est plutôt notre estimation des consommations de chauffage qui est à mettre en question.

$$H = \frac{C_{ch}}{[(T_i - T_e)_{moy} - \Delta T_g] * durée} \qquad \text{[Éq. 3.1]}$$

- H : *Coefficient de déperdition thermique, W/(m².°C)*
- C_{ch} : *Consommation de chauffage sur la durée, kWh/m²*
- $(T_i - T_e)_{moy}$: *Écart moyen de températures intérieure/extérieure sur la durée, °C*
- ΔT_G : *Gain thermique dû aux apports gratuits, °C*
- *Durée* : *Durée d'étude, kh*

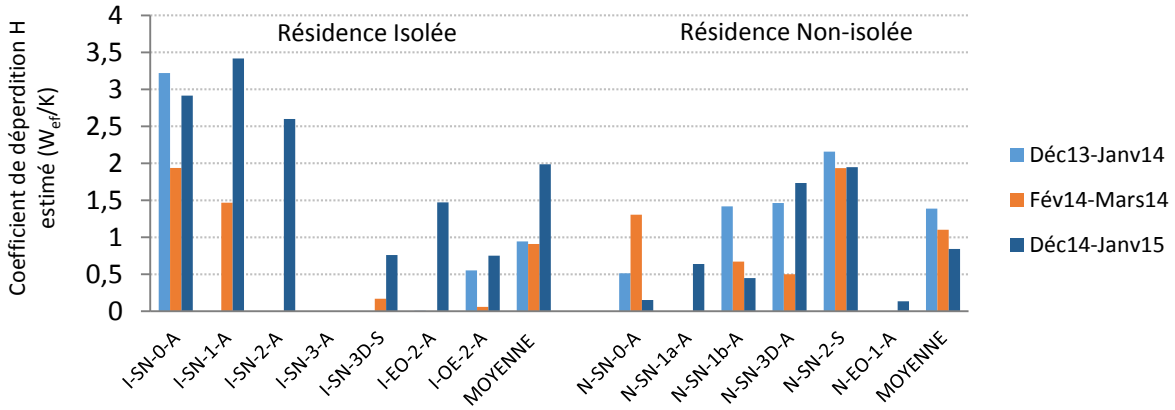


FIGURE 3.2 : *Estimation du coefficient de déperdition H en fonction des périodes de mesure (hiver 2013-2014 et hiver 2014-2015) et des appartements*
de l'auteur

– Consommations d'électricité

Contrairement à la résidence non-isolée, dans la résidence isolée, les consommations d'électricité n'ont été relevées qu'à partir du mois de juin. Pour un même ménage, elles sont stables dans le temps ; on observe une consommation bimensuelle presque identique quelle que soit la saison étudiée. Nous nous sommes donc basés sur la moyenne des relevés que nous avions pour déterminer la consommation annuelle de chacun des ménages. Les moyennes par résidence (*Figure 3.3*) montrent, comme pour les consommations de gaz, une similitude avec 29 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ pour la résidence isolée et 28,2 $kWh_{ef}/(m^2.an)$ pour la non-isolée.

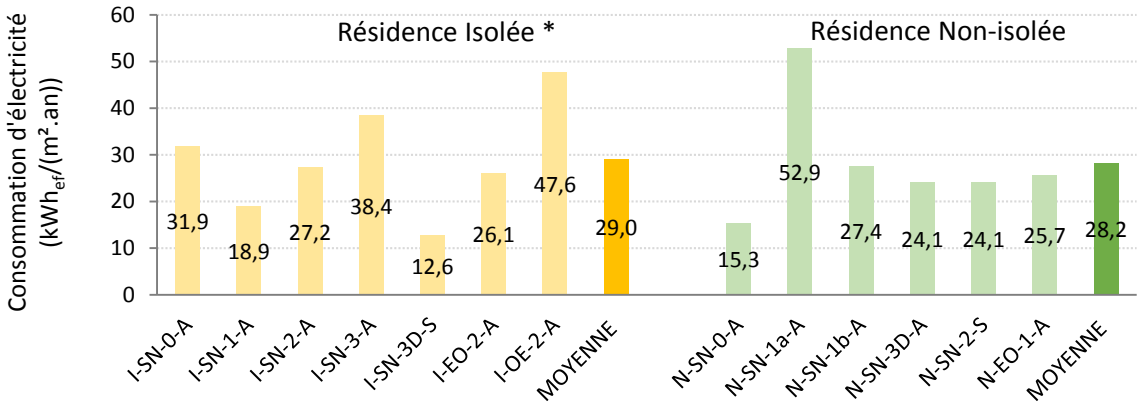


FIGURE 3.3 : *Consommation d'électricité ($kWh_{ef}/(m^2.an)$) (*estimation à partir des relevés partiels pour la résidence isolée)*
de l'auteur

L'analyse des consommations énergétiques ne montre que de très faibles différences entre les moyennes des deux résidences. Sur la base de cet échantillon restreint et des estimations (peut-être erronées), on peut dire que l'isolation par l'extérieur de la résidence n'a pas conduit les locataires à faire des économies d'énergie, et donc à réduire leurs factures énergétiques, comme cela a pu être avancé lors de la programmation des travaux.

I.2. Étude du confort/inconfort

Les bâtiments étudiés, malgré la présence d'une V.M.C., peuvent être considérés comme des bâtiments à ventilation naturelle dans le sens où, en été, ils ne sont pas rafraîchis par un climatiseur, mais par l'action des occupants sur leur fenêtre et leur volet. Étant donnés les modèles de confort thermique existants (cf. *Chapitre 1-II*) et les mesures réalisées (cf. *Chapitre 2-III*), nous avons choisi d'utiliser l'équation de confort développée dans le cadre de la démarche adaptative (cf. *[Éq. 1.17]*).

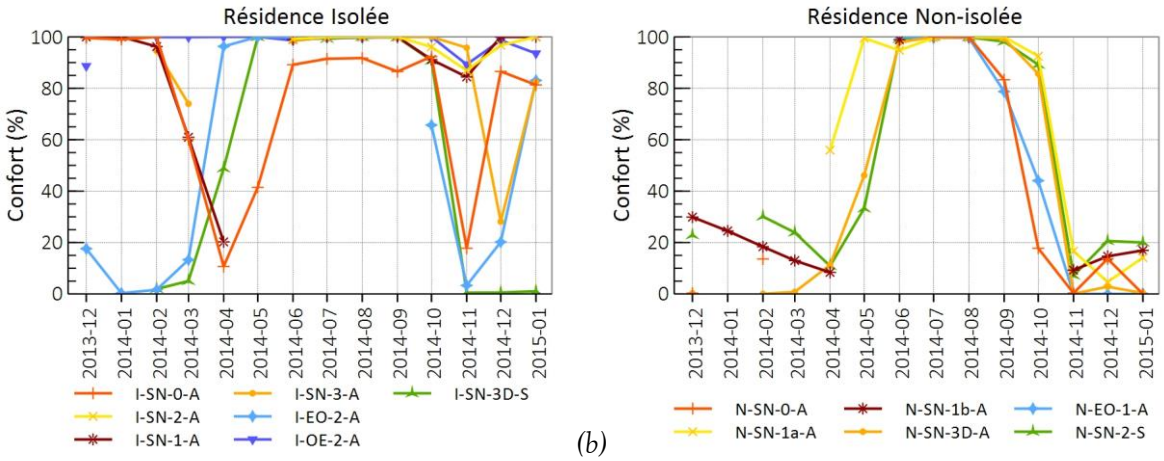
Dans un premier temps, nous analysons le confort mensuellement. Lors de la phase d'instrumentation, il est arrivé que les capteurs s'arrêtent pour une raison indéterminée. L'analyse mensuelle du confort ne sera donc faite que si nous avons plus de 20 jours de mesures sur le mois étudié. Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'évolution du confort en fonction du temps dans chaque résidence. Dans la résidence isolée (*Figure 3.4.a*), nous observons des profils très variés :

- L'appartement I-OE-2-A, orienté à l'Ouest, est le seul avec un niveau de confort supérieur à 80 % toute l'année.
- Deux appartements (I-SN-3D-S et I-EO-2-A) ont un niveau de confort inférieur à 20 % en hiver mais qui passe à plus de 80 % dès le mois d'avril.
- Pour ceux dont l'appartement est confortable en hiver, nous observons aux mois de mars et avril une diminution du confort qui ne revient maximal qu'au mois de mai. Cela laisse supposer une adaptation comportementale différenciée des locataires en fonction de l'utilisation ou non du système de chauffage.
- Pour l'ensemble des appartements étudiés, le confort des locataires a diminué au mois de novembre 2014. Cela marque la transition entre une période où le système de chauffage n'est pas utilisé et une période où il l'est, et où il est efficace.

Dans la résidence non-isolée (*Figure 3.4.b*), nous observons que les six appartements ont un profil annuel de confort identique.

- Entre décembre 2013 et avril 2014 ainsi qu'entre novembre 2014 et janvier 2015, nous obtenons une moyenne de 13,8 % de confort ce qui est très faible.
- Entre juin et août 2014, le confort est maximal pour tous les appartements.
- Au mois de septembre, alors que trois appartements (N-SN-3D-A, N-SN-2-S et N-SN-1a-A) ont encore un niveau de confort à 100 % les autres voient le leur commencer à diminuer.
- Le mois de novembre semble être le plus inconfortable. On peut supposer que cela est dû à la non-réactivation des thermostats par les locataires.

L'analyse des évolutions du confort sur un peu plus d'une année montre que les mois de mars-avril et octobre-novembre sont des mois qui marquent la transition entre l'hiver et l'été impliquant un confort dégradé. De plus, il semble que l'orientation de l'appartement ne soit pas un critère d'amélioration ou de dégradation du confort.



(a) *(b)*

FIGURE 3.4 : ***Pourcentage de confort en fonction des mois pour les appartements de (a) la résidence isolée et (b) la résidence non-isolée***
de l'auteur

Comme nous pouvons définir la sévérité d'un hiver en calculant les DJU_{18} (cf. *[Éq. 2.1]*), nous définissons deux paramètres permettant d'estimer l'importance de l'inconfort lié d'une part au froid et d'autre part au chaud : le cumul des Degré-Heures d'Inconfort supérieur à une limite haute de température de confort (T_{C+3}) pour l'inconfort lié à la chaleur (DHI_{+3} donné par l'équation *[Éq. 3.2]*) et le cumul des Degré-Heures d'Inconfort inférieur à une limite basse de température de confort (T_{C-3}) pour l'inconfort lié au froid (DHI_{-3} donné par l'équation *[Éq. 3.3]*). Il s'agit, sur une durée donnée, de la somme des écarts positifs en degré-heures de la température opérative intérieure à une température de référence (la température de confort +3 °C (T_{C+3}) pour les périodes de chaleur et la température de confort -3 °C (T_{C-3}) pour les périodes de froid).

L'étude de l'inconfort est faite sur plusieurs durées au cours de cette thèse. Dans un premier temps (cf. *suite de ce paragraphe*), nous étudions l'inconfort au sein des appartements d'après les mesures réalisées *in situ*. Nous prendrons donc en compte la « durée de mesure » correspondant à chaque saison. Cependant afin de comparer les appartements entre eux, alors que les durées de mesures ne sont pas identiques dans tous les appartements (données manquantes sur certaines périodes), nous calculons le cumul des Degré-Heures d'Inconfort journalier (soit le DHI_{+3}^{j} pour l'inconfort lié au chaud et le DHI_{-3}^{j} pour l'inconfort lié au froid). Il correspond au cumul des Degré-Heures d'Inconfort rapporté au nombre de jours avec des données complètes (cf. *[Éq. 3.4]*).

Au *chapitre 4*, nous étudions deux périodes de mesures : trois jours caractéristiques (les trois jours les plus chauds de 2014 ou de 2015) puis la période estivale (répartie sur trois mois entre juin et août).

Pour l'inconfort lié au chaud (DHI_{+3}) : $Si\ T_{op}(t) > T_{C+3}(t)$

$$\boldsymbol{DHI_{+3}} = \int \left[T_{op}(t) - T_{C+3}(t)\right] . dt \qquad \text{[Éq. 3.2]}$$

- DHI_{+3} : *Cumul des Degré-Heures d'Inconfort supérieur à T_{C+3}, °C.h*
- T_{op} : *Température opérative intérieure, °C*
- T_{C+3} : *Température de confort +3°C, °C*
- t : *Temps, h*

Pour l'inconfort lié au froid (DHI_{-3}) : $Si\ T_{op}(t) < T_{C-3}(t)$

$$\boldsymbol{DHI_{-3}} = \int \left[T_{C-3}(t) - T_{op}(t)\right] . dt \qquad \text{[Éq. 3.3]}$$

- DHI_{-3} : *Cumul des Degré-Heures d'Inconfort inférieur à T_{C-3}, °C.h*
- T_{op} : *Température opérative intérieure, °C*
- T_{C-3} : *Température de confort -3°C, °C*
- t : *Temps, h*

Dans le cadre de durées non-similaires (DHI^{j}_{+3} et DHI^{j}_{-3}) :

$$\boldsymbol{DHI^{j}_{+3/-3}} = \frac{DHI_{+3/-3}}{j} \qquad \text{[Éq. 3.4]}$$

- $DHI^{j}_{+3/-3}$: *Cumul des Degré-Heures d'Inconfort supérieur à T_{C-3}/inférieur à T_{C-3} journalier, °C.h/j*
- $DHI_{+3/-3}$: *Cumul des Degré-Heures d'Inconfort supérieur à T_{C-3}/inférieur à T_{C-3}, °C.h*
- j : *Nombre de jours de mesure, j*

I.2.1. La saison estivale

En été, les niveaux d'inconfort liés à la chaleur sont très faibles (de l'ordre de 1°C.h/j). Cette faible valeur peut s'expliquer par la caractéristique météorologique de l'année 2014 puisque nous n'avons pas eu de période de chaleur importante (cf. *Chapitre 2-I.3.2*). Cependant, on observe un appartement, dans la résidence isolée, avec un DHI^{j}_{+3} important de l'ordre de 5,7 °C.h/j (soit près de 6 h par jour avec une température supérieure de 1 °C à la limite supérieure de confort). Ce résultat est à mettre en relation avec les caractéristiques de l'appartement. En effet, au début de l'instrumentation, le « capteur séjour » a été positionné de manière à éviter des variations trop importantes. Or, nous nous sommes rendu compte en cours d'étude que le locataire avait déplacé un lampadaire halogène en dessous du capteur. Ainsi, et nous le verrons dans l'analyse des comportements par la suite, la luminosité est très importante en début de soirée et nous notons à

cette période une forte augmentation de la température. C'est donc ce luminaire qui a fait augmenter la température de manière significative entrainant alors une détection d'un inconfort dans son environnement immédiat. Cependant, le reste de la pièce n'est que faiblement impacté.



FIGURE 3.5 : *Degré-Heures d'Inconfort journalier lié au froid et au chaud en fonction des appartements lors de l'**été 2014***
de l'auteur

I.2.2. La demi-saison

Nous avons vu au cours du *chapitre 2-I.3.2*, que nous pouvions diviser la période de demi-saison en trois en fonction des moyennes mensuelles des températures extérieures : la demi-saison chaude (mai, septembre, octobre), la demi-saison (avril) et la demi-saison froide (mars et novembre).

En demi-saison chaude (*Figure 3.6*), pour l'appartement I-SN-0-A, le luminaire présent impacte l'inconfort lié au chaud comme en été. À cette période, les radiateurs ne sont plus ou pas encore allumés. Dans la résidence isolée, les inconforts (liés au froid ou au chaud) sont très faibles. Au contraire dans la résidence non-isolée, nous observons en général un inconfort lié au froid plus important. De plus, deux appartements (N-SN-0-A et N-EO-1-A) ont un DHI^j_{-3} important de l'ordre de 5 °C.h/j ce qui indique que si les radiateurs fonctionnent, la consigne de température doit être très basse.

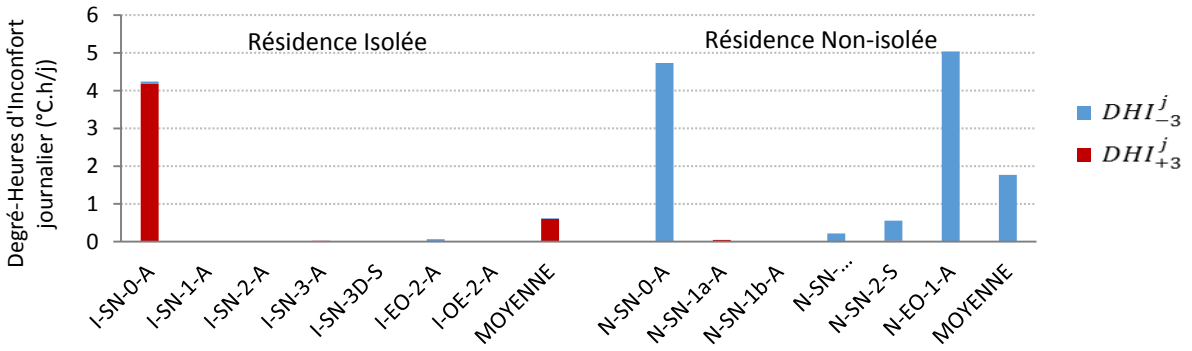


FIGURE 3.6 : *Degré-Heures d'inconfort lié au froid et au chaud en fonction des appartements en **demi-saison chaude***
de l'auteur

En demi-saison (au mois d'avril - *Figure 3.7*), nous n'avons pas de données pour certains appartements. Nous ne les avons pas représentés sur le graphique. Dans les deux résidences, l'inconfort lié au froid prédomine en cette saison de transition. Cependant, nous observons que le confort semble plus dégradé dans la résidence non-isolée que dans la résidence isolée. De plus, dans la résidence isolée, les appartements qui sont orientés Est ou Ouest ne semblent pas avoir de périodes d'inconfort. Dans les deux cas, les consommations de gaz mesurées laissent supposer une faible utilisation du chauffage mais la différence de confort met en évidence un gain d'inertie thermique pour la résidence isolée et donc un meilleur bénéfice des apports internes et externes limitant ainsi l'inconfort.

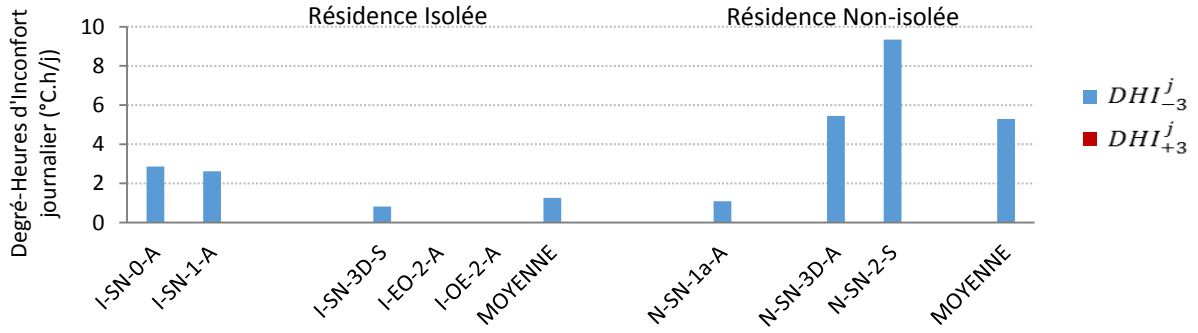


FIGURE 3.7 : *Degré-Heures d'Inconfort lié au froid et au chaud en fonction des appartements en **demi-saison (mois d'avril 2014)***
de l'auteur

En demi-saison froide (mars et novembre - *Figure 3.8*), le confort est très proche de celui que l'on peut observer en hiver comme décrit dans le paragraphe suivant (beaucoup plus élevé dans la résidence non-isolée que dans la résidence isolée).

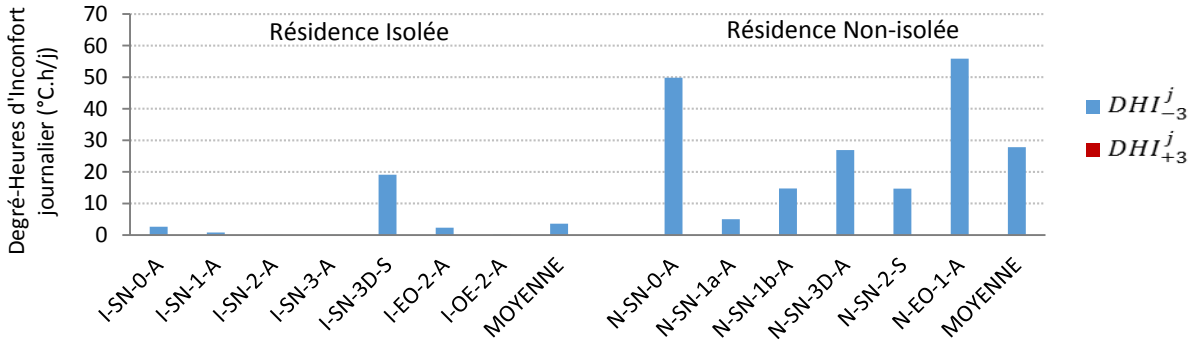


FIGURE 3.8 : *Degré-Heures d'Inconfort lié au froid et au chaud en fonction des appartements en **demi-saison froide***
de l'auteur

I.2.3. La saison hivernale

En hiver, on observe une forte différence de confort entre les deux résidences. Le DHI^{j}_{-3} moyen est de 8,3 °C.h/j dans la résidence isolée et de 43,3 °C.h/j dans la résidence non-isolée. Dans la résidence non-isolée, les appartements (N-SN-1b-A et N-SN-2-S) ont le DHI^{j}_{-3} le plus faible (17 °C.h/j) alors que dans la résidence isolée, le plus faible est de l'ordre de 0 °C.h/j pour

cinq appartements. Cependant dans la résidence isolée, l'appartement I-SN-3D-S a un niveau d'inconfort proche de ceux de la résidence non-isolée ce qui laisse supposer que le chauffage n'a pas été allumé dans cet appartement, ou bien que sa position de dernier étage lui est très défavorable. Dans la résidence isolée, deux appartements (N-SN-0-A et N-EO-1-A) ont un DHI_{-3}^{j} proche de 80 °C.h/j ce qui signifie, que la température intérieure est, en moyenne, inférieure de 3,3 °C à la limite inférieure du confort tout au long de la journée.

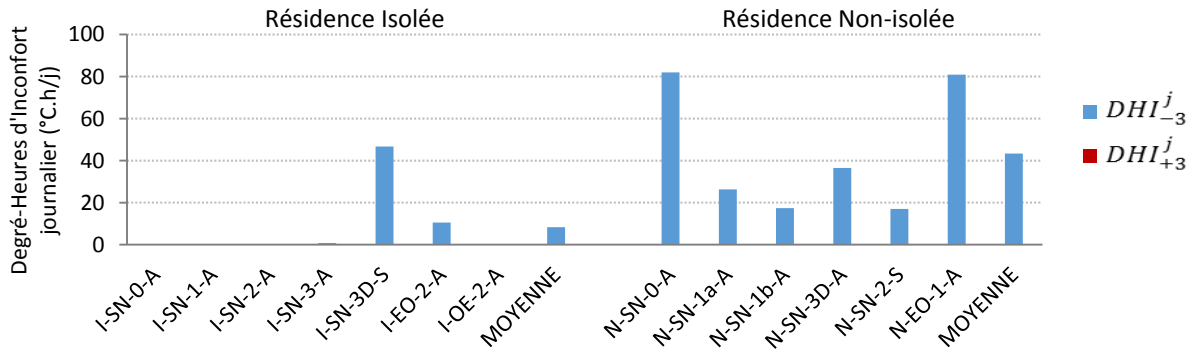


FIGURE 3.9 : *Degré-Heures d'inconfort lié au froid et au chaud en fonction des appartements en* ***hiver 2014***
de l'auteur

L'analyse du DHI_{-3}^{j} en fonction des consommations de chauffage estimées permet de comprendre les variabilités de l'inconfort. Sur la *figure 3.10*, nous observons très bien que malgré des niveaux moyens de consommation de chauffage estimée similaires, les appartements des deux résidences ont des niveaux d'inconfort très différents.

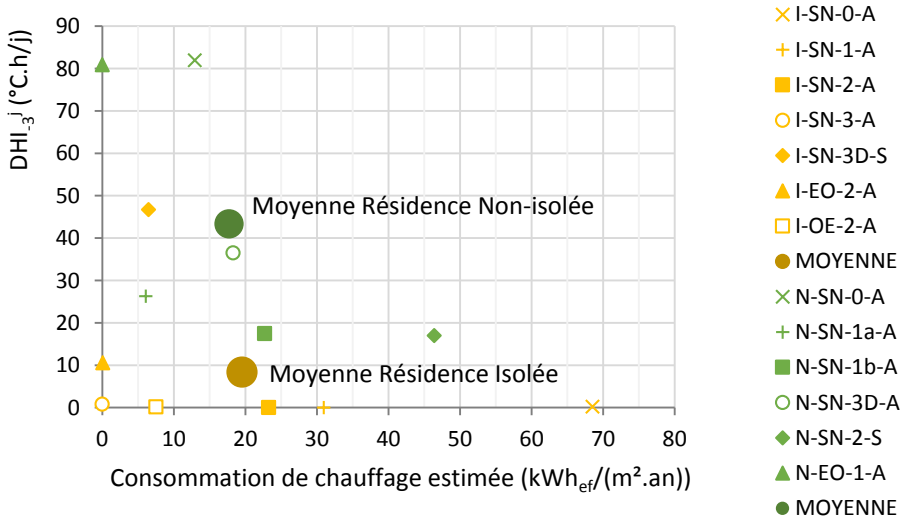


FIGURE 3.10 : *DHI_{-3}^{j} en hiver en fonction de la consommation de chauffage estimée en fonction des appartements*
de l'auteur

Dans la résidence isolée, les deux appartements qui ne se chauffent pas (I-SN-3-A et I-EO-2-A) ont des niveaux d'inconfort différents. L'appartement orienté au Sud, a un DHI_{-3}^{j} proche de zéro. Il semble bénéficier davantage des apports solaires. Deux appartements

(I-SN-3D-S et I-OE-2-A) ont des consommations similaires mais des niveaux d'inconfort opposés. L'un a un DHI_{-3}^{j} nul alors que pour l'autre, il est très élevé. Nous pouvons supposer que l'appartement I-SN-3D-S étant un appartement en dernier étage, ses déperditions sont plus importantes ce qui engendre un confort dégradé. L'autre appartement orienté Ouest, malgré des surfaces déperditives réduites, ne profite que de manière limitée, des apports solaires gratuits. Les pratiques des locataires sont ici à questionner. L'appartement I-SN-0-A a une forte consommation de chauffage pour un inconfort très réduit alors que d'autres (I-SN-1-A et I-SN-2-A) ont une consommation de chauffage réduite pour le même niveau d'inconfort. Les habitudes personnelles du locataire sont ici à analyser. En effet comme nous le verrons par la suite, ce locataire est fumeur et sa fenêtre est souvent ouverte en hiver induisant une forte consommation de chauffage.

Dans la résidence non-isolée, l'appartement qui ne se chauffe pas (N-EO-1-A) est celui qui a un DHI_{-3}^{j} le plus élevé avec l'appartement N-SN-0-A qui, pourtant, utilise son système de chauffage. Les locataires de l'appartement N-SN-3D-A, situé au dernier étage, se chauffent et leur inconfort est modéré. On peut supposer, comme pour la résidence isolée, que cela est sûrement dû aux déperditions qui sont plus importantes pour cet appartement de dernier étage. L'appartement N-SN-2-S est celui qui consomme le plus d'énergie pour le chauffage. Cependant, son niveau d'inconfort est élevé (DHI_{-3}^{j} = 17 °C.h/j). Toutefois, il reste avec l'appartement N-SN-1b-A, l'appartement le plus confortable de la résidence non-isolée.

En moyenne, les estimations de consommation de chauffage semblent identiques entre les deux résidences. Cependant, il semble que l'utilisation du chauffage n'a pas les mêmes effets sur le niveau de confort/inconfort. En effet, pour une même consommation, les appartements de la résidence isolée ont un DHI_{-3}^{j} moyen de l'ordre de 8,3 °C.h/j alors que pour la résidence non-isolée, le DHI_{-3}^{j} moyen est 43,3 °C.h/j. Les populations de ces deux résidences étant similaires, cette étude semble montrer que l'isolation par l'extérieur n'a pas fait diminuer les consommations de chauffage mais augmenter le niveau de confort. Il s'agit d'un effet rebond classique que l'on retrouve dans la littérature *(DUJIN et MARESCA, 2010)*. Les occupants reportent leur consommation d'énergie pour améliorer leur confort. Il est donc fort probable que l'isolation de la résidence non-isolée conduise au même résultat malgré des estimations de consommation de chauffage plus précises.

I.3. Analyses complémentaires

I.3.1. Les débits d'extraction d'air

L'analyse des débits d'air aux bouches d'extraction situées dans la cuisine, la salle de bain et les toilettes, montre (*Figure 3.11*), dans la résidence non-isolée, des débits entre 60 et 120 m^3/h avec une moyenne à 80 m^3/h. On mesure cependant dans deux appartements des débits d'air extrait nuls en décembre 2014. Les mesures reprennent leur valeur initiale lors de la visite suivante. On peut supposer que cela peut être dû à un arrêt ponctuel du système pour réparation par exemple. Dans la résidence isolée (*Figure 3.12*), les débits varient entre 20 et 140 m^3/h. La moyenne est également de 80 m^3/h. On observe une grande disparité entre les appartements ce qui laisse supposer un problème d'équilibrage. Ces études de VMC sont à considérer car elles constituent une part non négligeable des déperditions globales des logements d'autant plus que la résidence est isolée par l'extérieur.

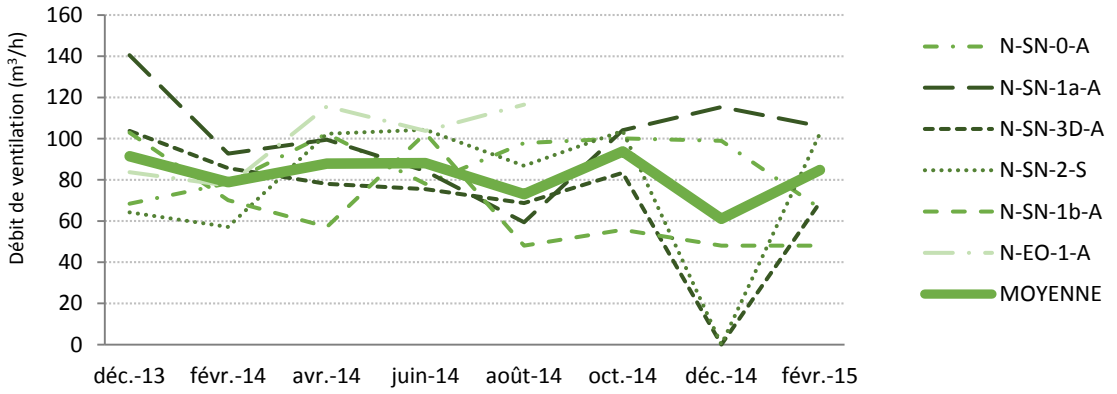


FIGURE 3.11 : *Débits d'air aux bouches d'extractions en fonction des mois dans la* ***résidence non-isolée***
de l'auteur

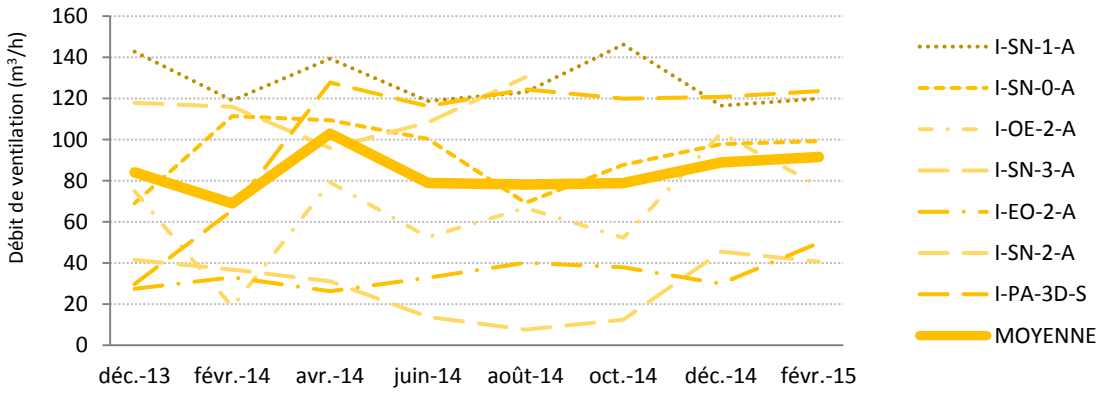


FIGURE 3.12 : *Débits d'air aux bouches d'extractions en fonction des mois dans la* ***résidence isolée***
de l'auteur

I.3.2. L'humidité relative

Grâce à nos capteurs, nous avons pu mesurer l'humidité relative au sein des différents appartements. Cependant, ces données ne seront pas exploitées dans la suite de l'étude dans la mesure où nous avons finalement choisi une méthode d'évaluation du confort se basant uniquement sur les températures intérieures et extérieures (cf. *Chapitre 1-II.4.3*). En effet, dans nos latitudes, l'humidité n'est pas un facteur majeur d'inconfort. Si le site d'étude avait été en zone tropicale, il aurait, bien évidemment, fallu s'attarder sur ces mesures. Toutefois, l'étude sommaire des données nous a permis d'identifier certaines périodes avec une humidité relative très importante (supérieure à 90 %) qui peuvent être expliquées par une météo pluvieuse ou un manque de ventilation de l'appartement comme nous avons vu au paragraphe précédent. La présence d'une humidité importante au sein des appartements pouvant conduire à de la condensation et à des moisissures, une étude plus approfondie pourrait être menée pour étudier ce phénomène dans le cadre d'une rénovation réelle. Nous nous concentrons donc, ici, sur le confort thermique.

II. Gestion du couple fenêtre-volet

Nous avons installé deux boîtiers de capteurs au sein des logements. Les mesures de position de la fenêtre sont issues du « capteur fenêtre » alors que les données de température (dont on en déduit le confort) et de luminosité (définissant la position du volet) sont issues du « capteur séjour ». Ce dernier, situé au centre du logement, mesure l'ambiance thermique, lumineuse et hygrométrique. Le « capteur fenêtre », quant à lui, mesure les mêmes éléments mais il est plus sensible aux radiations solaires directes et se retrouve parfois occulté lors de l'ouverture du rideau. Ses données sont donc moins fiables. Les occupants de bâtiments naturellement ventilés peuvent agir sur le couple fenêtre-volet afin de maintenir leur confort. L'identification des pratiques des occupants montre une évolution saisonnière de leurs actions.

II.1. Étude de l'ouverture et de la fermeture de la fenêtre

Comme nous l'avons vu lors de l'étude bibliographique, la fenêtre joue un rôle essentiel sur le taux de renouvellement d'air. Elle contribue donc à l'évolution des températures intérieures (mais aussi de l'humidité) et par conséquence elle impacte le confort thermique des occupants.

II.1.1. Analyse saisonnière de la durée d'ouverture

Sur l'année, l'analyse de la durée d'ouverture journalière (*Figure 3.13*) montre des variations saisonnières importantes au sein d'un même appartement. Seul l'appartement N-SN-0-A a des durées d'ouverture de la fenêtre très faibles sur l'année complète. La discussion avec le locataire a mis en évidence que l'appartement était très peu occupé.

Dans la majorité des cas étudiés, c'est en été que la durée d'ouverture de la fenêtre est la plus longue et en hiver qu'elle est la plus faible. Les périodes de demi-saison marquent les transitions de comportement. Seul l'appartement N-SN-2-S ne suit pas cette évolution. En effet, dans cet appartement, les périodes où la fenêtre est le plus longtemps ouverte sont le tout début de l'été puis l'automne.

Sur la période d'été, l'appartement I-SN-1-A a des données partielles, nous ne le prenons pas en considération pour cette analyse. Les locataires de l'appartement N-SN-1b-A ont été absents la moitié de l'été, ce qui perturbe l'interprétation. Nous écartons également cet appartement sur cette période d'étude. Cependant, pour huit appartements sur 11, la durée d'ouverture, en été, dépasse 15 heures par jour et cinq d'entre eux laissent leur fenêtre ouverte en continu (I-SN-0-A, I-OE-2-A, N-SN-1a-A, N-SN-3D-A, N-EO-1-A). Seuls deux appartements ont des durées d'ouverture de la fenêtre plus faibles : l'appartement N-SN-2-S (de l'ordre de 9 h/j) et l'appartement I-SN-2-A (de l'ordre de 12 h/j).

En hiver, les comportements sont très différents d'un appartement à l'autre. Si la majorité des locataires ouvre leur fenêtre moins d'une heure par jour, d'autres au contraire l'ouvrent presque 3 h/j (I-SN-0-A, I-SN-1-A, I-EO-2-A) (*Figure 3.14*). La transition entre le comportement d'été et celui d'hiver se fait, de manière générale, brutalement. En quelques jours, la durée d'ouverture atteint 24 heures par jour. Au contraire la transition entre l'été et l'hiver se fait plus en douceur. On observe une diminution progressive de la durée d'ouverture essentiellement sur les mois de septembre et octobre.

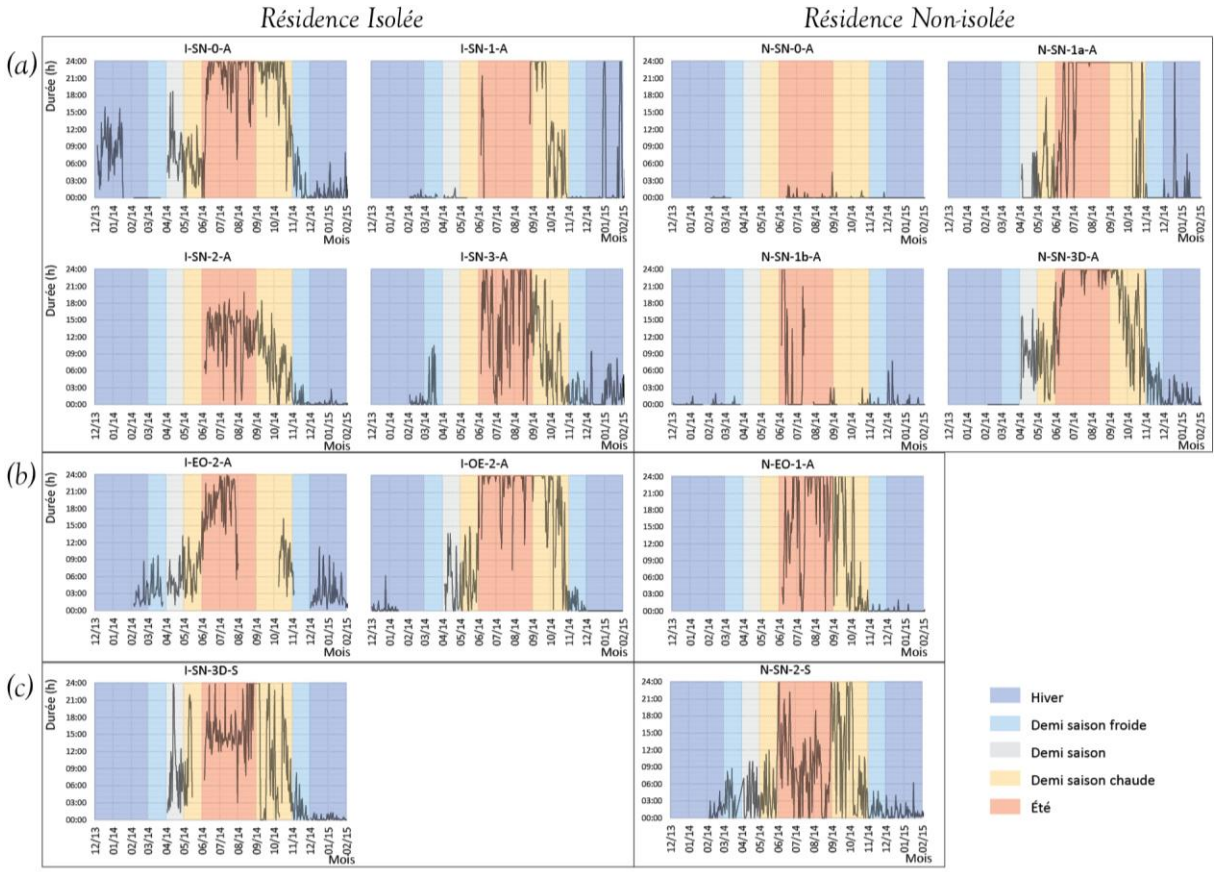


FIGURE 3.13 : *Durée d'ouverture journalière en fonction des mois de l'année pour les deux résidences dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

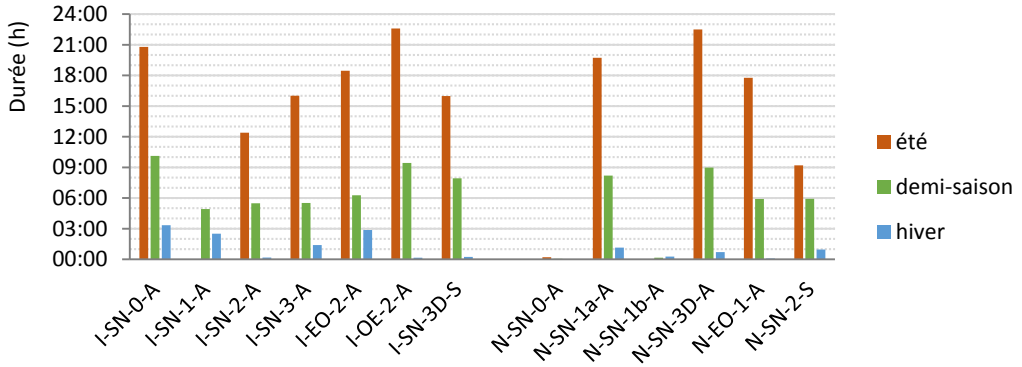


FIGURE 3.14 : *Durée moyenne d'ouverture journalière de la fenêtre en fonction des saisons et des appartements*
de l'auteur

Comme pour les études de la bibliographie (*Chapitre 1-III.2.2*), la durée d'ouverture semble donc reliée aux variations climatiques saisonnières. La *figure 3.15* montre que l'évolution de la durée d'ouverture dépend de la température extérieure en moyenne glissante journalière (T_{RM7}, définie lors du *chapitre 1-II.4.3*). Cependant, comme nous l'avons vu avec l'étude saisonnière de la durée d'ouverture, plusieurs profils apparaissent. Dans la majorité des appartements la durée d'ouverture augmente avec l'augmentation de T_{RM7}. Nous observons également une différence de comportement en hiver. En effet, dans les appartements I-SN-0-A, I-SN-1-A, I-EO-2-A, lorsque T_{RM7} est inférieur à 12 °C, la durée d'ouverture de la fenêtre reste importante.

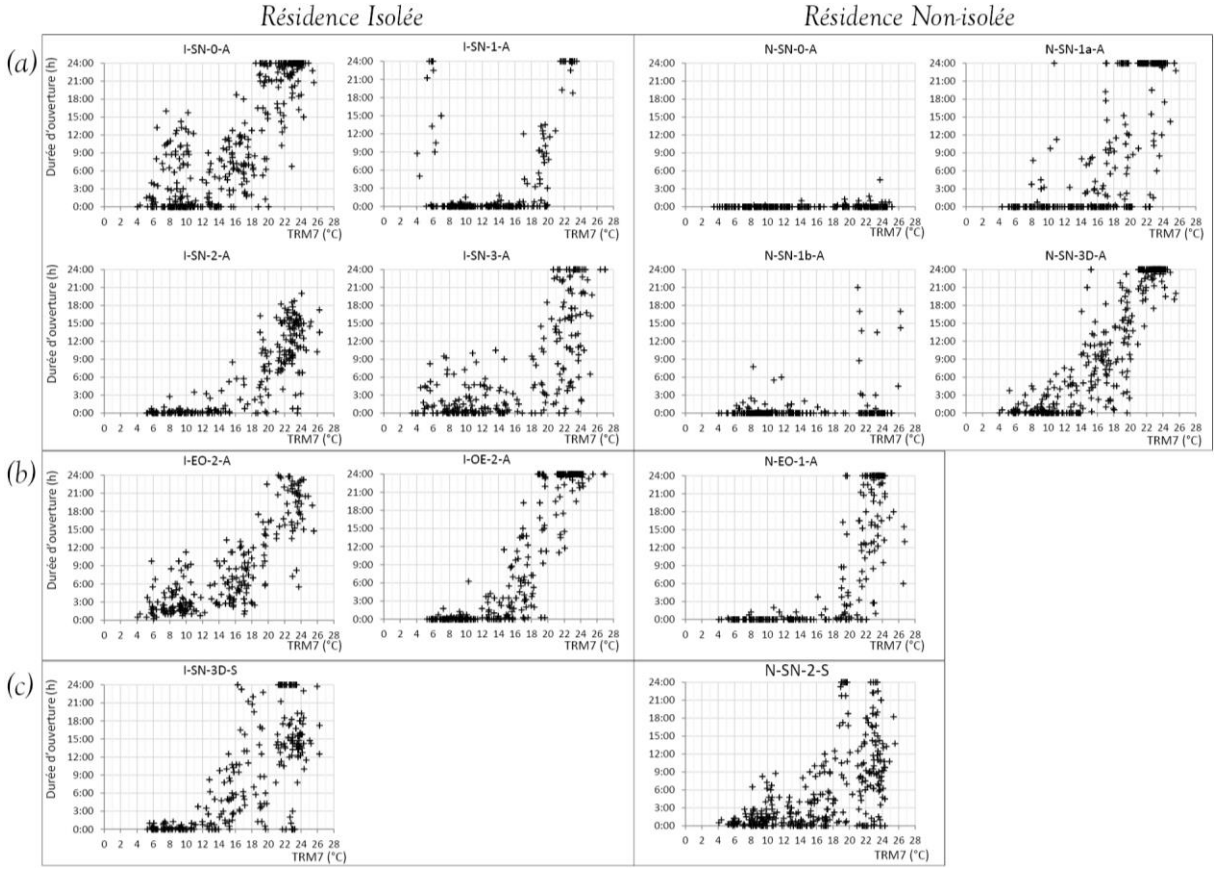


FIGURE 3.15 : *Durée d'ouverture de la fenêtre en fonction de TRM7 pour les deux résidences et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

Nous n'identifions pas de différences majeures entre les durées d'ouverture des appartements de la résidence isolée et celles de la résidence non-isolée. Il semble donc que la différence d'isolation ne soit pas un critère impliquant une modification des comportements. Cependant, on observe que la durée d'ouverture augmente avec l'augmentation de T_{RM7}. Les durées d'ouverture semblent donc être corrélées avec les températures extérieures. Cette analyse nous permet d'identifier les profils des pratiques des occupants en fonction des saisons.

II.1.2. Typologies des usages de la fenêtre

Afin de caractériser les usages journaliers de la fenêtre en fonction des saisons, nous identifions neuf possibilités ou échantillons d'ouverture ou de fermeture de la fenêtre ayant des conséquences thermiques différentes dans les appartements. À chaque action envisagée correspond une durée d'ouverture spécifique sur une plage horaire déterminée (*Tableau 3.1*). Nous distinguons l'ouverture courte (inférieure à 3 h) qui peut avoir lieu à n'importe quel moment de la journée et l'ouverture plus longue qui peut être identifiée à différents moments de la journée. Enfin, la fenêtre peut être laissée ouverte ou fermée toute la journée. Si aucun des paramètres n'est identifié, le profil est laissé comme indéterminé.

Code	Action/Nom	Durée	Plage horaire	
r	Aération réduite	≤ 3 h	00 :00	23 :45
m	Aération le matin	> 2 h	06 :00	09 :45
j	Aération la journée	> 2 h	10 :00	16 :45
s	Aération le soir	> 2 h	17 :00	21 :45
n	Sur-ventilation nocturne	≥ 6 h	00 :00 22 :00	05 :45 23h45
f	Fermé	= 24 h	00 :00	23 :45
o	Ouvert	≥ 20 h	00 :00	23 :45
i	Indéterminé			
d	Absence de donnée			

TABLEAU 3.1 : *Définition des échantillons des usages de la fenêtre*
de l'auteur

Les occupants pouvant avoir une action à différents moments de la journée, ces échantillons se combinent. L'analyse des données des différents appartements nous permet d'obtenir 22 combinaisons différentes. Cependant, comme le montre le *tableau 3.2*, nous les regroupons suivant 10 catégories dont les implications thermiques au sein du logement sont similaires.

Code	Correspondances	Nom	Couleur
D	*d*	Absence de données	
R	*r, rm, rs*	Aération réduite	
M	*m*	Aération le matin	
J	*mj, j*	Aération en journée	
L	*mjs, mjn, jsn, js, jn*	Aération journée longue	
O	*o, mjsn*	Ouverture supérieure à 20 h/j	
S	*s*	Aération le soir	
N	*mn, sn, msn, n, ms*	Sur-ventilation le matin, le soir ou la nuit	
F	*f*	Fermeture toute la journée	
I	*i*	Indéterminé	

TABLEAU 3.2 : *Définition des typologies de pratiques journalières pour l'ouverture et la fermeture de la fenêtre*
de l'auteur

II.1.3. Des stratégies saisonnières

II.1.3.1. Analyse des usages en été

La *figure 3.16* représente, de juin à août 2014 (période estivale), en bleu foncé les périodes d'ouverture de la fenêtre et en bleu clair les périodes de fermeture. Elle met en évidence des comportements individuels différents en fonction des appartements. On observe que deux appartements (N-SN-0-A et N-SN-1b-A) ont des périodes d'ouverture très faibles, dues à l'absence

de leurs locataires respectifs ce qui limite l'étude de leur pratique estivale. De plus, comme vu précédemment, le capteur d'ouverture/fermeture de la fenêtre de l'appartement I-SN-1-A a été défaillant. Les données sont donc manquantes. Parmi les autres appartements, on constate des comportements très différenciés. Cependant, dans la majorité des cas, pendant les premiers jours du mois de juin le comportement diffère du reste de l'été. L'analyse du fichier météo (*Figure 3.17*) montre une forte élévation des températures aux alentours du 9 juin ce qui semble être l'élément déclencheur du changement des pratiques. Même si suite à cet épisode les températures extérieures ont diminué, le comportement des locataires, quant à lui, n'a pas ou très peu été modifié.

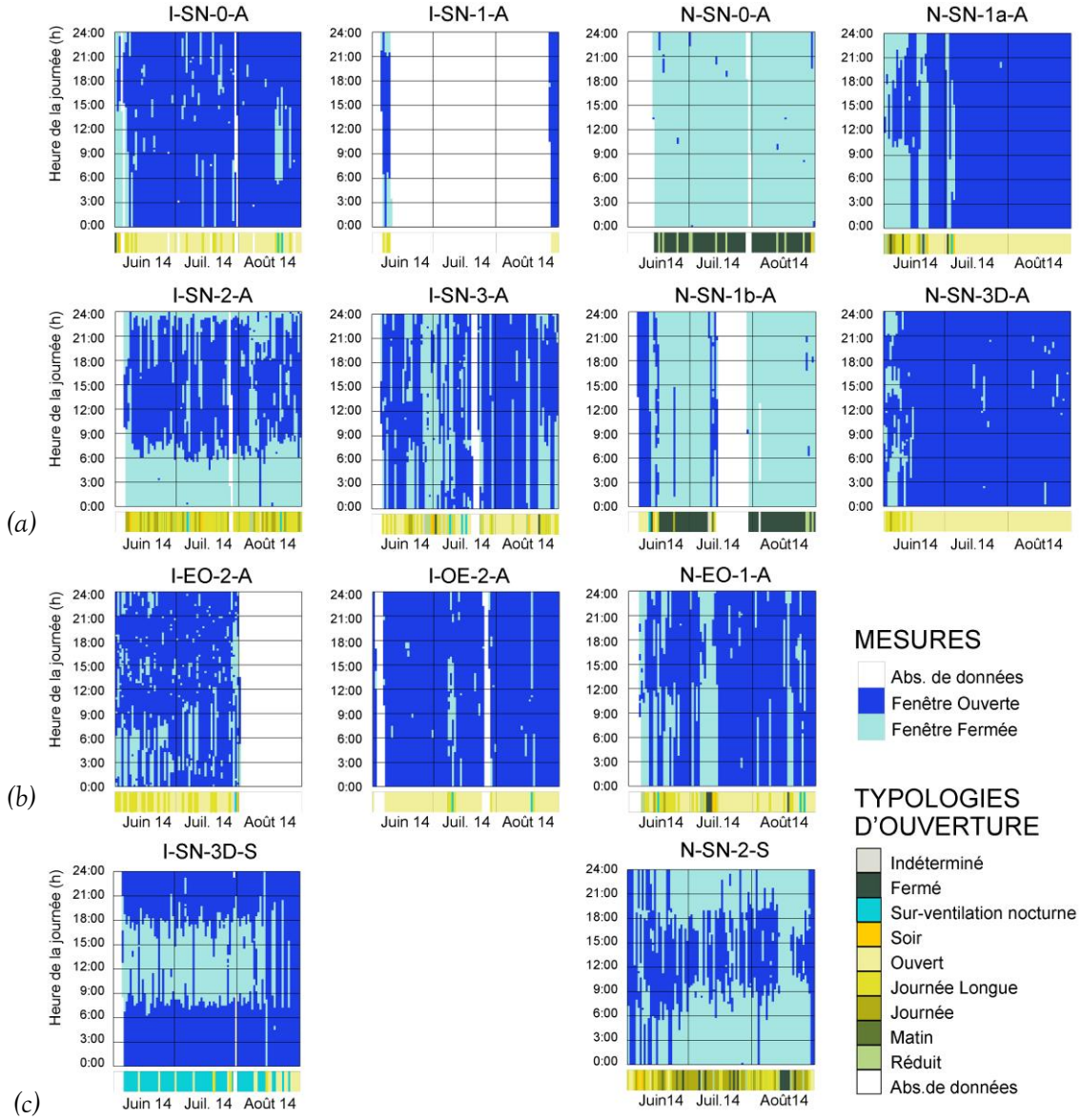


FIGURE 3.16 : *États « ouvert » et « fermé » de la **fenêtre** en fonction des jours en **été** associés aux typologies de pratiques journalières dans les **deux résidences** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

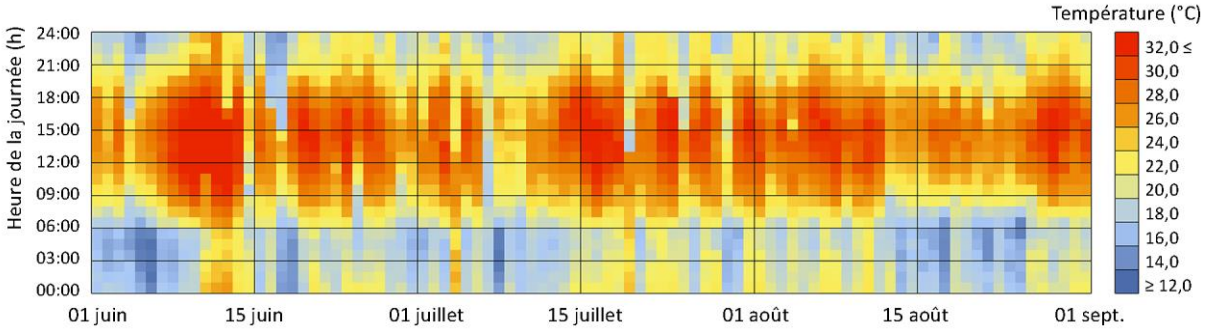


FIGURE 3.17 : *Température extérieure en fonction des jours en **été***
de l'auteur d'après les données de Nîmes Courbessac de Météo-France

C'est sur la base des catégories définies dans le *tableau 3.2* que nous avons identifié les typologies des usages journaliers de la fenêtre représentées sur la *figure 3.16*. Leur analyse nous montre une variété de pratiques. Cependant nous pouvons les regrouper en sept catégories suivant le pourcentage d'occurrence de la typologie sur la période estivale (*Figure 3.18*):

- Les locataires qui laissent leur fenêtre ouverte toute la journée plus de 90 % de la saison estivale (I-OE-2-A et N-SN-3D-A)
- Les locataires qui laissent leur fenêtre ouverte toute la journée environ 80 % de la saison estivale et la ferment le matin près de 10 % de la période étudiée (I-SN-0-A et N-SN-1a-A)
- Les locataires qui la ferment près de 80 % du temps (N-SN-0-A et N-SN-1b-A)
- Les locataires qui font de la sur-ventilation nocturne plus de 70 % du temps (I-SN-3D-S)
- Les locataires qui ouvrent toute la journée près de 50 % du temps et qui ferment le matin près de 20 % (I-SN-1-A, I-SN-3-A, I-EO-2-A et N-EO-1-A)
- Les locataires qui ouvrent uniquement la journée près de 60 % de la période estivale et qui ferment le matin près de 30 % du temps (I-SN-2-A)
- Les locataires qui ouvrent uniquement la journée près de 40% de la période estivale et qui ferment le matin près de 30 % du temps et qui ferment complètement plus de 10 % du temps (N-SN-2-S)

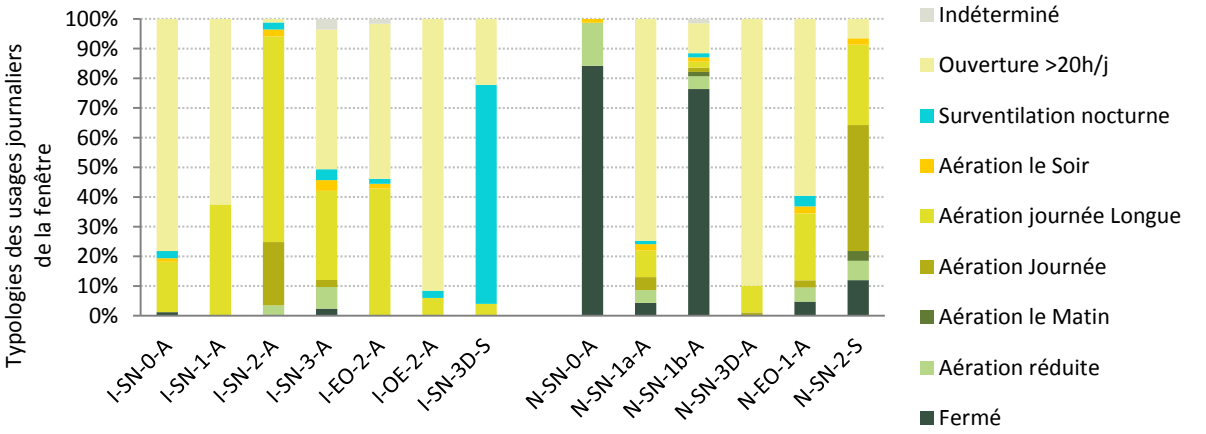


FIGURE 3.18 : *Pourcentage de typologies des usages journaliers de la fenêtre sur la période **estivale** en fonction des appartements*
de l'auteur

La fenêtre peut être ouverte ou fermée à n'importe quel moment de la journée. La *figure 3.16* le met déjà en évidence, mais l'analyse des fréquences des heures d'ouverture et de fermeture de la fenêtre sur la *figure 3.19* le confirme. Nous n'observons pas de distinction entre les différentes orientations des appartements, ni leurs étages respectifs. Cependant chez certains locataires nous identifions des fréquences d'ouverture ou de fermeture plus importantes à certains moments de la journée.

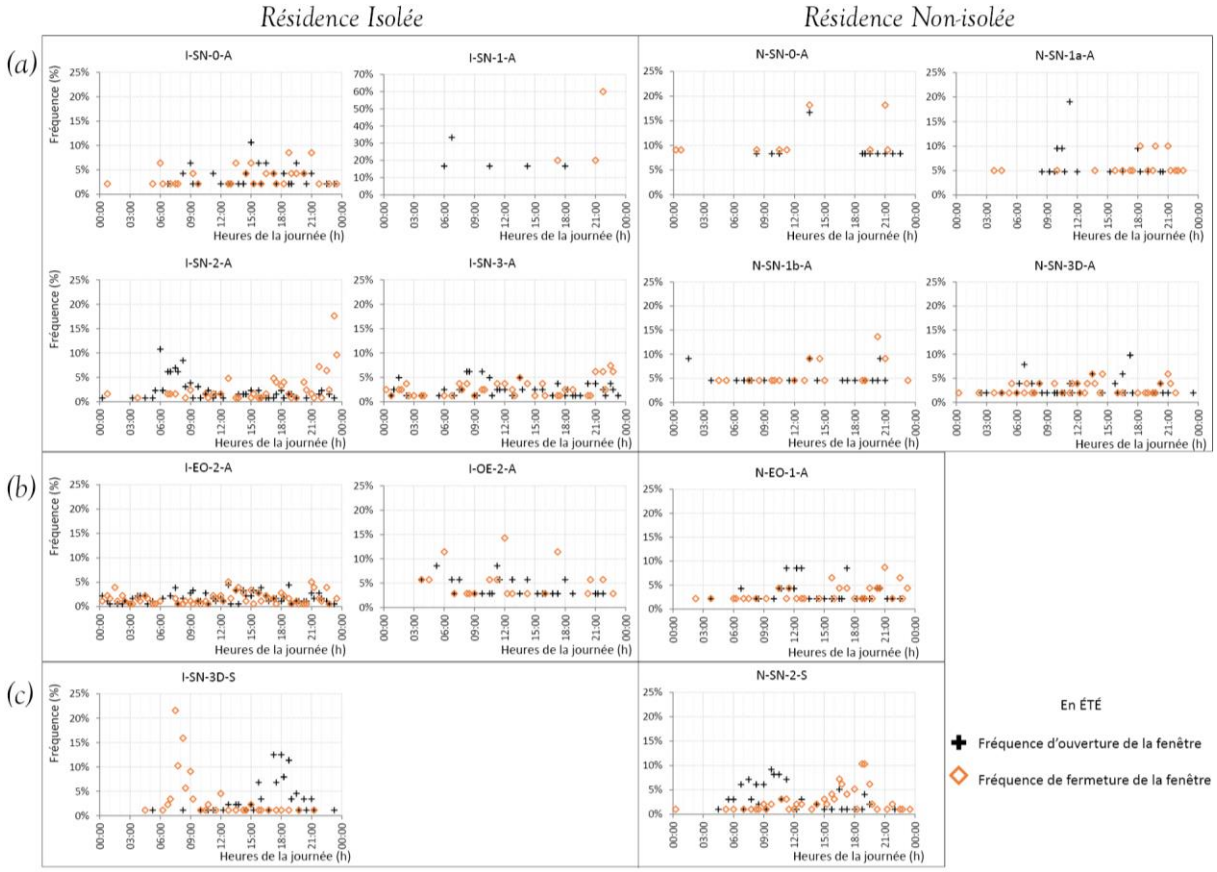


FIGURE 3.19 : *Fréquence d'heure d'ouverture et de heure de fermeture en **été** pour les deux résidences dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

Les personnes âgées semblent être les personnes dont l'usage de la fenêtre est le plus régulier. En effet, dans les deux cas, nous observons des fréquences d'ouverture ou de fermeture importantes à des moments clés de la journée. Dans l'appartement I-SN-3D-S (*Figure 3.20.a*) l'ouverture a lieu majoritairement vers 18 h et la fermeture vers 7 h 30. L'occupant a donc un comportement dit « expert » (cf. *Chapitre 3-III.2*). Il ventile son appartement la nuit, moment le plus frais de la journée. Au contraire, dans l'appartement N-SN-2-S (*Figure 3.20.b*) la fréquence d'ouverture est plus importante le matin vers 9 h et la fréquence de fermeture plus importante en fin d'après-midi vers 19 h. On observe deux stratégies d'ouverture de la fenêtre radicalement opposées. Ces fréquences élevées laissent penser que les pratiques d'ouverture et de fermeture de la fenêtre sont ancrées dans des habitudes quotidiennes. D'autres appartements ont également des fréquences d'ouverture et de fermeture plus importantes à certains moments de la journée comme ceux identifiés dans l'appartement N-SN-2-S. Il s'agit des appartements I-SN-2-A et N-SN-1a-A.

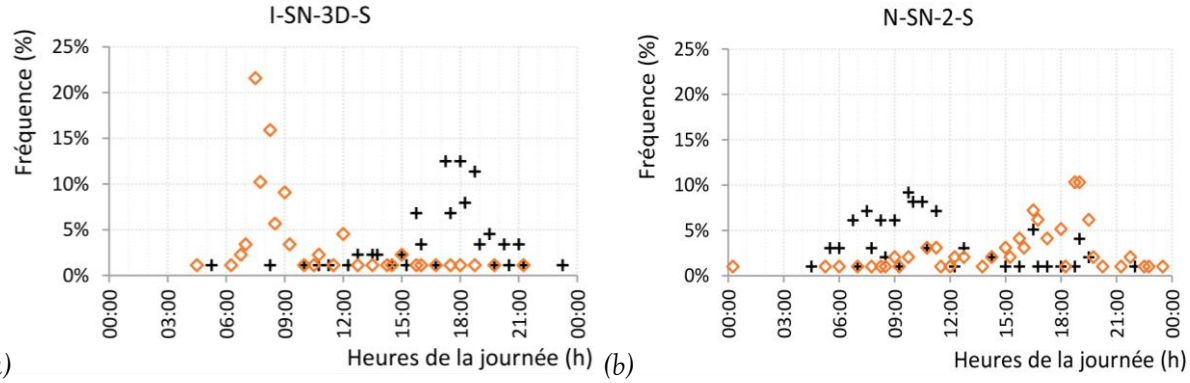


FIGURE 3.20 : *Fréquence d'heure d'ouverture et d'heure de fermeture en **été** chez des personnes âgées dans la résidence (a) isolée, (b) non-isolée*
de l'auteur

Nous l'avons vu, l'ouverture de la fenêtre influe sur les taux de renouvellement de l'air. Elle a aussi un fort impact sur les températures intérieures. Ainsi, l'été, afin de rafraîchir les appartements, il est recommandé d'ouvrir la fenêtre lorsque la température intérieure est plus élevée que la température extérieure, ce qui arrive principalement la nuit. Les charges internes des appartements étant différentes et la météo étant changeante d'un jour à l'autre, il est difficile de définir une heure précise à laquelle les fenêtres doivent être ouvertes. Cependant, l'analyse, à postériori, des données de températures intérieures et extérieures montre que dans de nombreux cas l'action sur la fenêtre n'est pas optimale et peut conduire à de l'inconfort comme nous le verrons dans la suite de l'étude (cf. *Chapitre 3-III.2*). Sur la *figure 3.21*, sont représentées en vert les périodes où la fenêtre a une position optimale (ouverte quand la température extérieure est inférieure à la température intérieure et fermée dans l'autre cas). Le pourcentage de chacune des positions a été analysé sur la *figure 3.22*. Nous observons que le taux maximum (79 %) de bon comportement est celui de l'occupant de l'appartement I-SN-3D-S qui n'ouvre sa fenêtre que de 18 h à 7 h 30, il fait donc de la sur-ventilation nocturne. Ensuite, les comportements qui permettent d'optimiser la baisse de température grâce à la température extérieure sont les appartements dont la fenêtre est ouverte 24 h/24 h (I-SN-0-A, I-OE-2-A, N-SN-1a-A, N-SN-3D-A). Le pourcentage d'ouverture de la fenêtre pendant les périodes optimales est de 66 %, 74 %, 65 % et 65 % pour chacun des appartements précédemment cité. Les locataires qui ouvrent souvent leur fenêtre en continu mais pas tout le temps (I-SN-3-A, I-EO-2-A, N-EO-1-A), ont un taux qui baisse aux alentours de 55 %. Enfin, que la fenêtre soit fermée toute la journée ou que l'occupant ait mis en place une stratégie d'ouverture en journée, le pourcentage chute à 32 % en moyenne, le comportement est alors plus défavorable pour un rafraîchissement de l'appartement.

En été, le scénario réglementaire prévoit une ouverture de la fenêtre uniquement pour faire du rafraîchissent passif (cf. *Chapitre 4-II.2.1.5*). La fenêtre peut alors être ouverte que si la température extérieure est inférieure à la température intérieure. Cette analyse montre que sur 13 appartements, seul un locataire (I-SN-3D-S) ouvre sa fenêtre uniquement la nuit pour effectuer ce rafraîchissement sur toute la période estivale. L'analyse des usages en été met en évidence des pratiques très variées contrairement à la réglementation qui ne prévoit qu'une pratique optimale pour limiter l'inconfort d'été. Si cette diversité n'est pas prise en compte lors de la conception du bâtiment, l'inconfort peut apparaître dans les logements incitant les locataires à installer des climatiseurs.

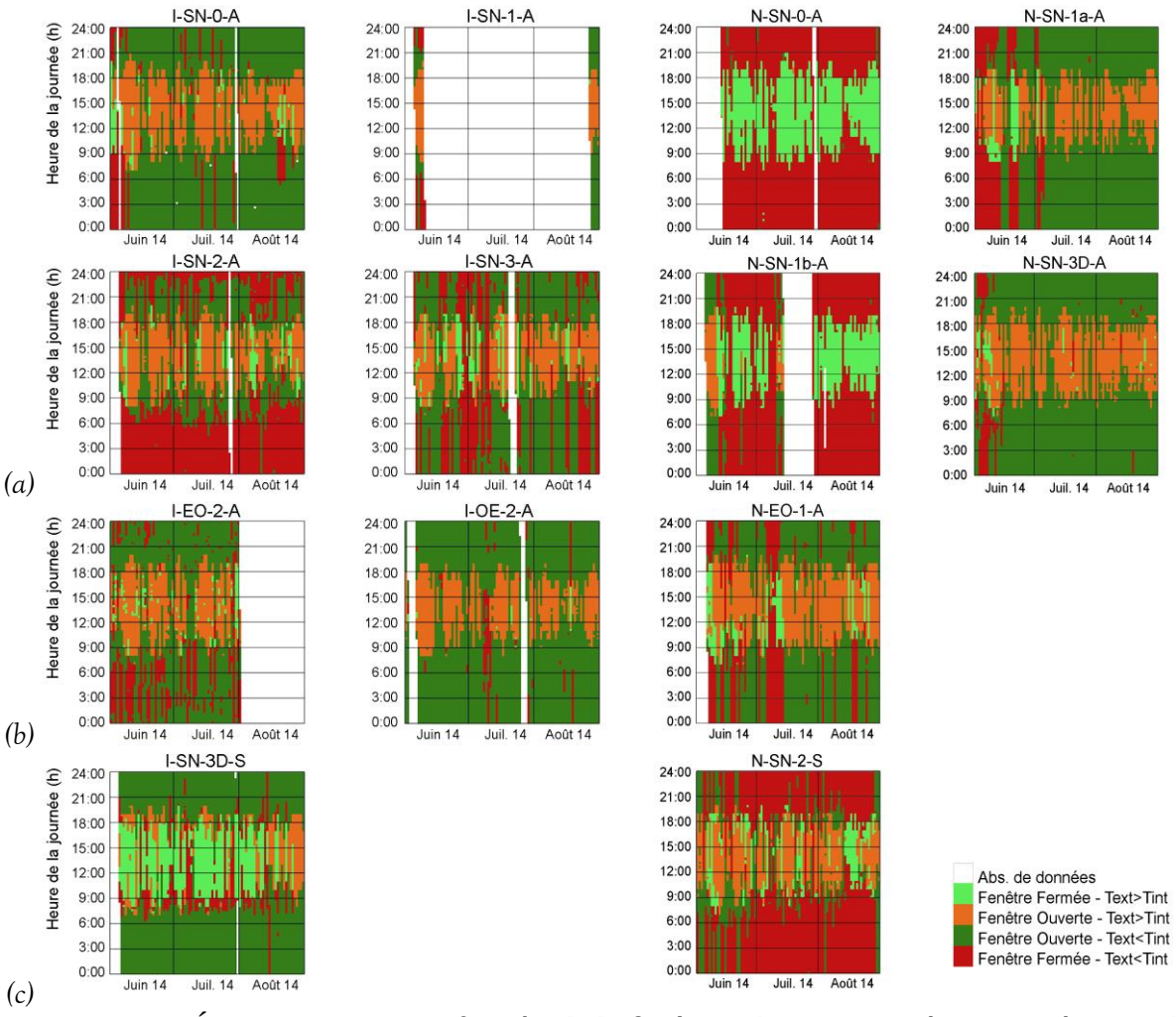


FIGURE 3.21 : *États « ouvert » et « fermé » de la **fenêtre** selon une température intérieure plus ou moins élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur, sur la **période estivale** dans les **deux résidences**, en fonction des appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

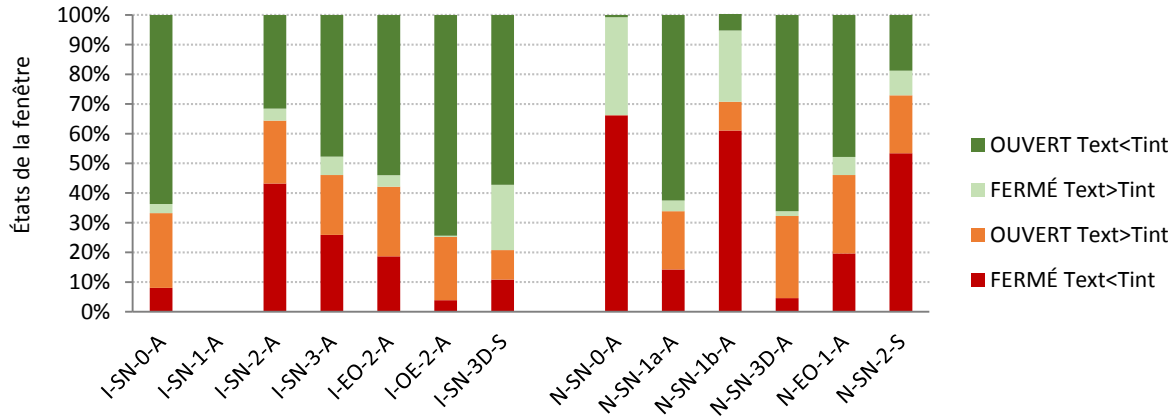


FIGURE 3.22 : *Pourcentage d'occurrence des états « ouvert » et « fermé » de la fenêtre selon une température intérieure plus ou moins élevée à l'intérieur qu'à l'extérieur, en **été**, pour chaque appartement*
de l'auteur

II.1.3.2. Analyse des usages en hiver

Comme nous l'avons vu au début de ce paragraphe, les usages de la fenêtre en hiver sont complètement différents des pratiques estivales. La durée d'ouverture est nettement inférieure en hiver. La *figure 3.23* et la *figure 3.24* montrent, comme pour l'été, en bleu foncé les périodes où la fenêtre est ouverte et en bleu clair les périodes où elle est fermée. Nous observons chez tous les locataires un comportement qui semble similaire entre les deux périodes d'hiver (décembre 2013- février 2014 et décembre 2014- janvier 2015). Seul le locataire de l'appartement I-SN-0-A a un comportement très différencié entre ces deux périodes. Les données que nous avons ne nous ont pas permis d'expliquer cette différence de comportement mais nous pouvons supposer qu'une autre fenêtre a préférentiellement été ouverte ou que la présence du locataire dans le logement a été différente entre les deux périodes.

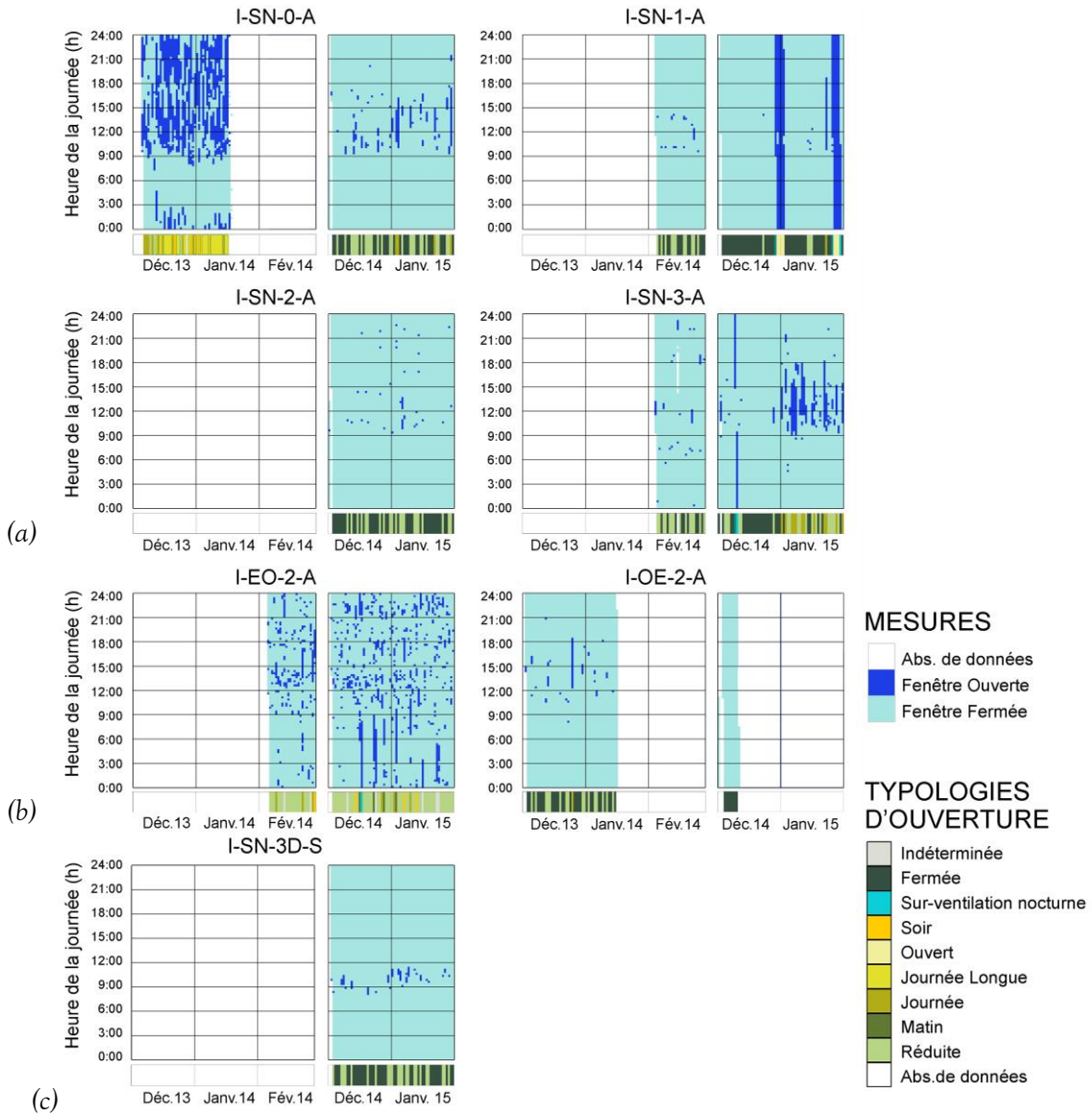


FIGURE 3.23 : *États « ouvert » et « fermé » de la **fenêtre** en fonction des jours en **hiver** associés aux typologies d'usages journaliers dans la **résidence isolée** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

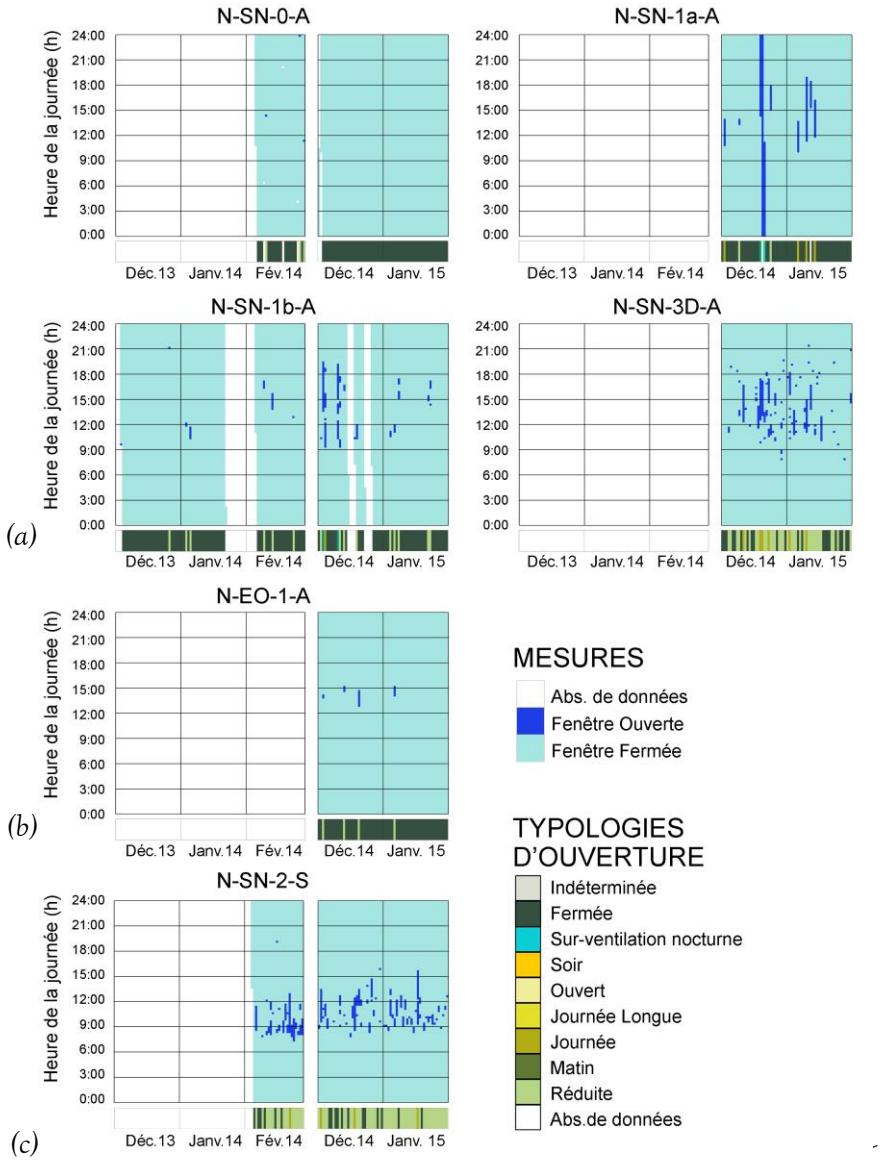


FIGURE 3.24 : *États « ouvert » et « fermé » de la **fenêtre** en fonction des jours en **hiver** associés aux typologies d'usages journaliers dans la **résidence non-isolée** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

L'analyse des typologies des usages journaliers de la fenêtre montre deux typologies dominantes caractéristiques des pratiques hivernales : fermer la fenêtre toute la journée ou l'ouvrir moins de 3 h/j. Seul l'appartement I-EO-2-A ne ferme jamais sa fenêtre toute la journée en hiver. Cependant, l'analyse des mesures peut laisser croire que la fenêtre est battante mais on imagine plutôt que le capteur avait un faux contact induisant un grand nombre d'ouvertures et de fermetures au cours de la journée. Comme nous l'avons fait pour l'été, nous pouvons distinguer, sur la *figure 3.25*, cinq catégories de locataires quant à l'utilisation de leur fenêtre en période hivernale :

- Les locataires qui ferment toute la journée plus de 80 % de la période hivernale (N-SN-0-A, N-SN-1a-A, N-SN-1b-A et N-EO-1-A)
- Les locataires qui ferment toute la journée plus de 60 % de la période hivernale (I-SN-1-A, I-SN-2-A, I-OE-2-A, I-SN-3D-S)
- Les locataires qui ouvrent en journée et le soir (I-SN-0-A)
- Les locataires qui peuvent ouvrir longtemps plus de 10 % de la période hivernale (I-SN-3-A et N-SN-3D-A)
- Les locataires qui aèrent leur appartement moins de 3 h/j plus de 60 % du temps (I-EO-2-A et N-SN-2-S)

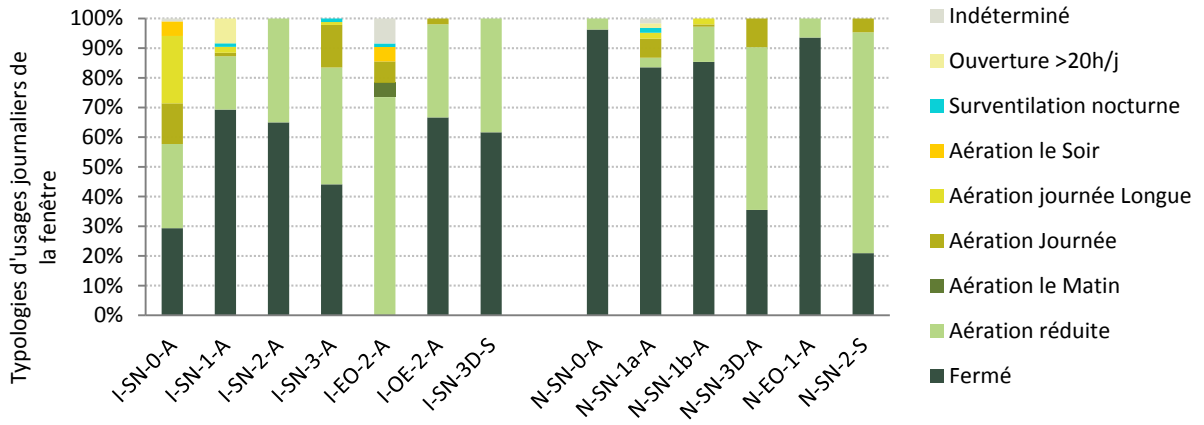


FIGURE 3.25 : *Pourcentage de typologies d'usages journaliers sur la* ***période hivernale*** *en fonction des appartements*
de l'auteur

En hiver, la durée d'ouverture moyenne (différence entre l'heure de fermeture et l'heure d'ouverture) est très faible. On observe donc que les fréquences maximales des heures d'ouverture sont très proches de celles correspondant à la fermeture (*Figure 3.26*). Comme en été, si pour certains l'ouverture et la fermeture de la fenêtre peuvent avoir lieu à n'importe quel moment de la journée, on identifie des appartements dont les fréquences d'ouverture ou de fermeture sont concentrées autour d'une plage horaire précise. Ainsi, comme en été, ce sont les personnes âgées qui ont des pratiques relevant de l'habitude quotidienne. Le locataire de l'appartement I-SN-3D-S ouvre entre 10 h et 10 h 30 et ferme entre 10 h 30 et 11 h. Le locataire de l'appartement N-SN-2-S ouvre légèrement plus tôt : entre 8 h et 9 h et ferme vers 10 h 30. Cependant, trois autres appartements ont des pratiques qui semblent similaires de jour en jour. Le locataire de l'appartement I-SN-1-A semble avoir deux périodes d'ouverture et de fermeture de la fenêtre : une le matin entre 10 h et 10 h 30 et une en début d'après-midi entre 13 h 30 et 14 h. Les deux autres appartements (I-SN-3-A et N-SN-1b-A) ouvrent en moyenne vers 10 h 30 alors que la fermeture semble plus aléatoire.

En hiver, la réglementation thermique prévoit que la fenêtre reste fermée toute la journée. Or l'analyse précédente montre que, même si c'est la pratique majoritaire, elle peut rester ouverte une partie de la journée ce qui peut engendrer une dégradation des consommations énergétiques. Cette pratique peut expliquer les écarts observés entre les prévisions et les mesures *in situ*.

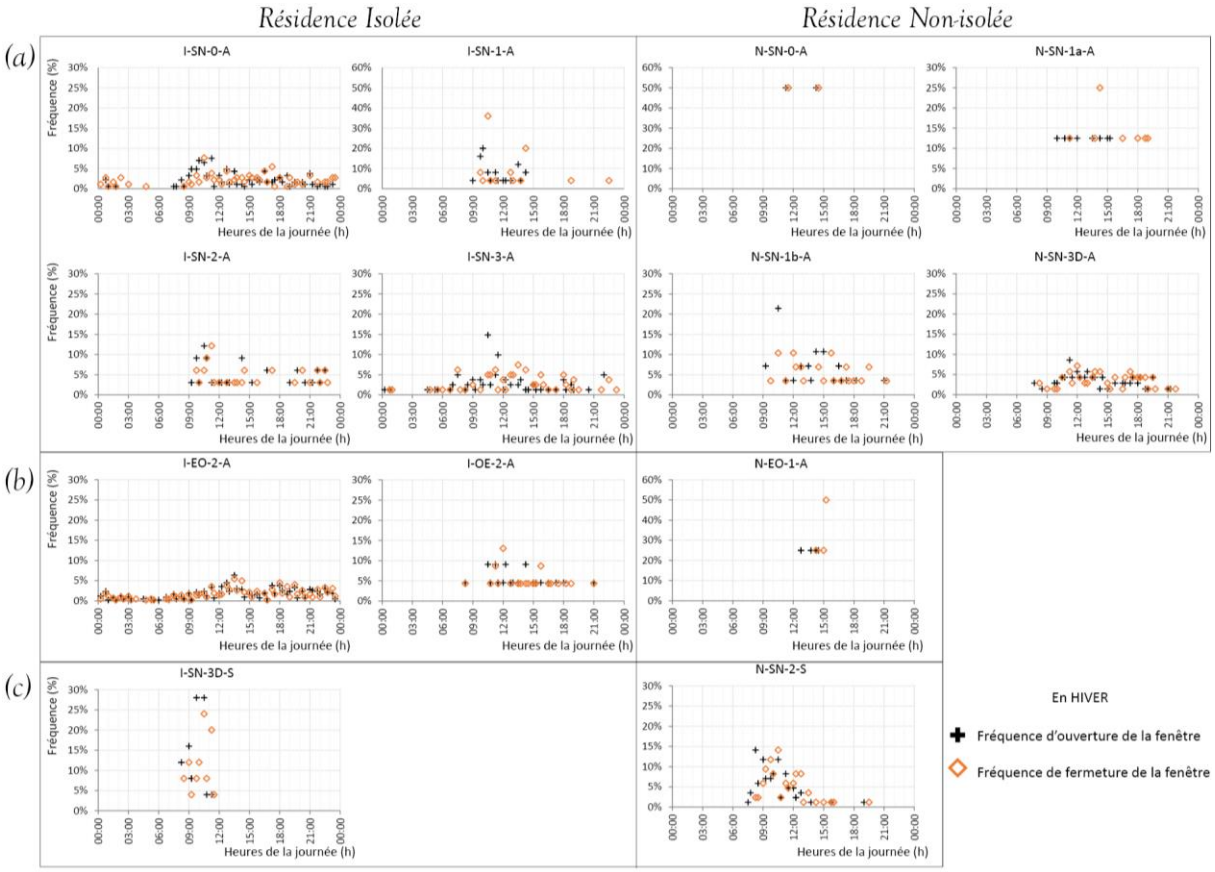


FIGURE 3.26 : *Fréquences d'heure d'ouverture et d'heure de fermeture en **hiver** pour les deux résidences et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

II.1.3.3. Analyse des usages en demi-saison

Dans cette analyse les trois périodes de demi-saison (froide, chaude et normale) ont été regroupées (*Figure 3.27* et *Figure 3.28*). De mars et mai, pour chaque appartement, les pratiques sont semblables alors que de septembre à novembre, on observe une évolution. En effet en septembre, dans plusieurs appartements (I-SN-0-A, I-SN-1-A, I-OE-2-A, N-SN-3D-A et N-EO-1-A) la fenêtre est laissée ouverte en continu alors que les mois suivant la durée d'ouverture diminue jusqu'à atteindre la durée hivernale dès le début du mois de novembre. On peut supposer que c'est la baisse des températures extérieures couplées avec le déclenchement du système de chauffage qui conduit les occupants à modifier leurs pratiques. L'analyse des typologies, comme faite précédemment pour les périodes estivales et hivernales, montre en conséquence une répartition plutôt homogène des usages (*Figure 3.29*).

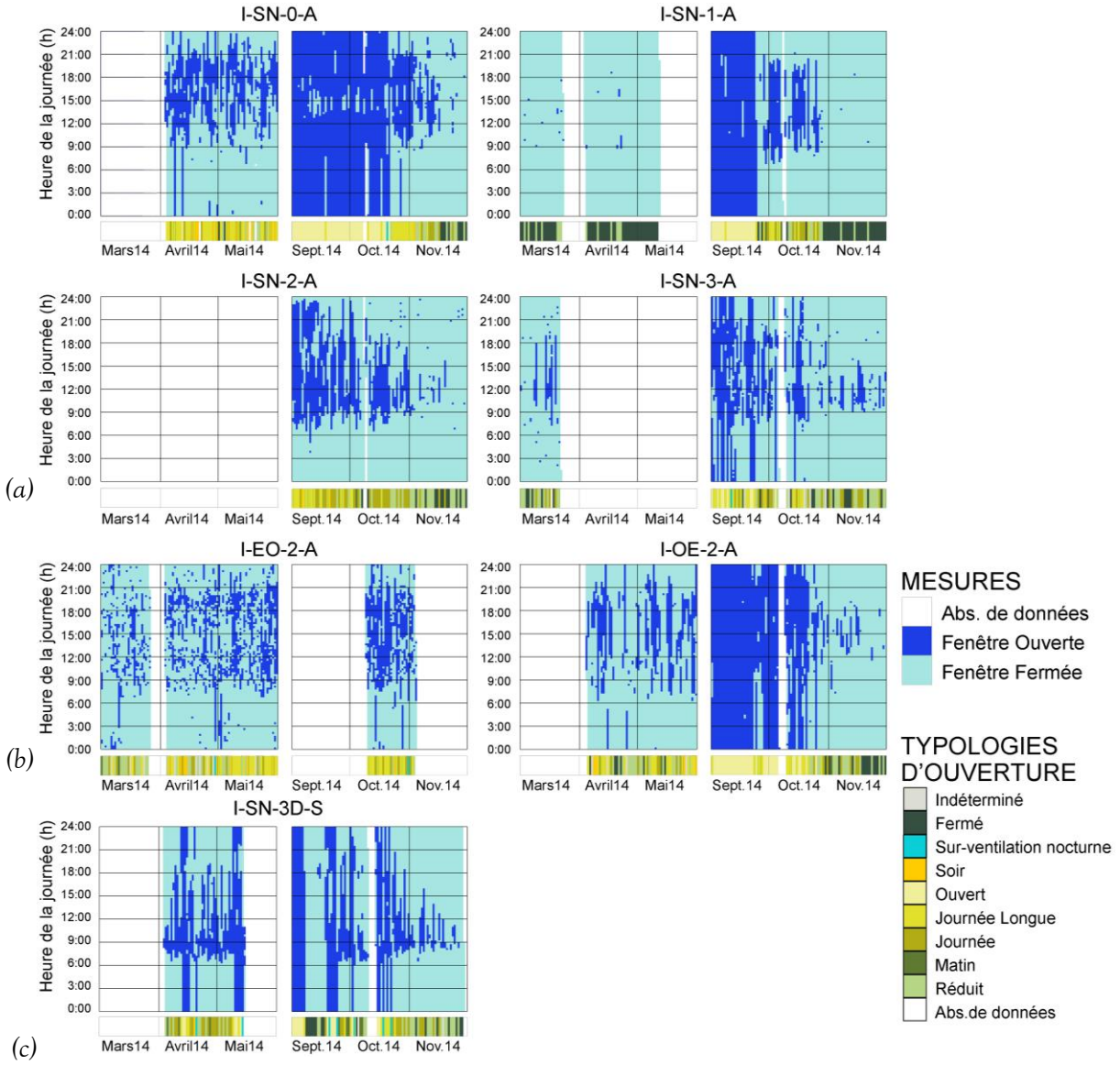


FIGURE 3.27 : *États « ouvert » et « fermé » de la **fenêtre** en fonction des jours en **demi-saison** associés aux typologies des usages journaliers dans la **résidence isolée** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées de l'auteur*

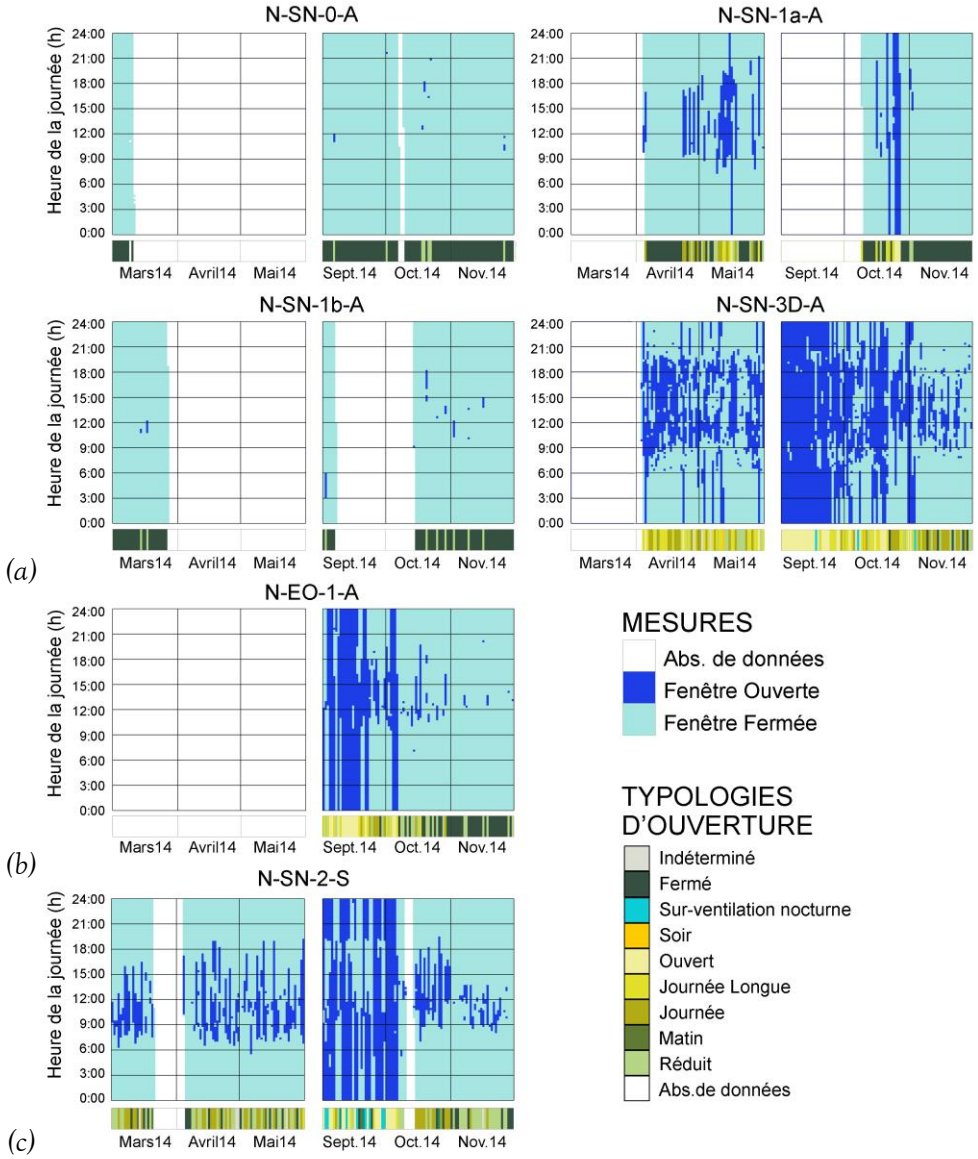


FIGURE 3.28 : *États « ouvert » et « fermé » de la **fenêtre** en fonction des jours en **demi-saison** associés aux typologies des usages journaliers dans la **résidence non-isolée** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

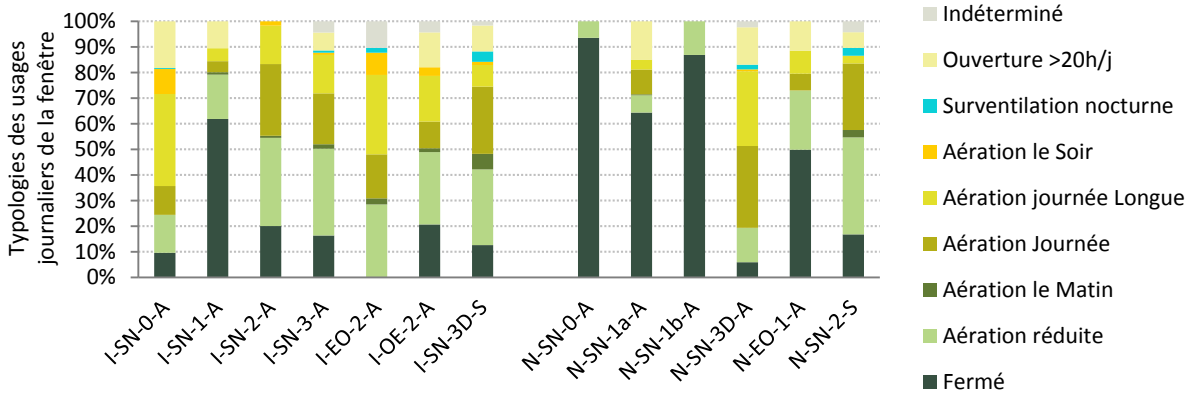


FIGURE 3.29 : *Pourcentage de typologies des usages journaliers sur la période de **demi-saison** en fonction des appartements*
de l'auteur

II.2. Étude de l'ouverture et de la fermeture du volet

La position du volet est identifiée par l'intermédiaire de seuils de luminosité. Son analyse, permet d'identifier si les locataires utilisent des protections solaires notamment en été.

II.2.1. Traduction des données

Nous n'avons pas de mesure directe de la position du volet au cours de la journée car cela demandait une instrumentation plus complexe. Afin de l'estimer, nous nous sommes basés sur les valeurs de luminosité au sein de l'appartement.

Plusieurs hypothèses ont été posées afin de déterminer quatre positions du volet : fermé, à demi-fermé, ouvert et indéterminé pour la nuit. En effet, la nuit, nous détectons uniquement les périodes où l'éclairage artificiel est enclenché. Si le volet est ouvert ou fermé, nous obtenons la même luminosité. Nous ne pouvons donc pas déterminer sa position. En conséquence à partir du coucher du soleil et jusqu'à son lever, nous avons choisi une position indéterminée. La journée, par contre, nous posons l'hypothèse que la lumière n'est pas allumée. Nous aurions peut-être pu faire la distinction entre lumière du jour et lumière artificielle grâce à l'utilisation d'un deuxième capteur de luminosité dont la sensibilité était différente mais un budget supplémentaire aurait été nécessaire. Par conséquent, si nous détectons un changement de luminosité, c'est le volet qui est actionné et non l'éclairage artificiel. Pour chaque appartement, nous avons déterminé les seuils permettant de définir les différentes positions suivant plusieurs paramètres en relation avec l'état de l'art exposé au *premier chapitre*. Tout d'abord, la luminosité intérieure est dépendante de la couverture nuageuse : avec un ciel nuageux même si le volet est ouvert, la luminosité intérieure peut être faible. Météo-France fourni pour chaque heure une durée d'insolation allant de 0 min à 60 min. Nous avons donc défini que nous avons une luminosité importante lorsque la durée d'insolation horaire dépasse 30 min/h. Ensuite, les seuils de luminosité varient d'un appartement à l'autre en fonction de l'orientation mais aussi de la présence ou non de rideaux ainsi que de leurs tissus. Enfin la dernière hypothèse repose sur le fait que le volet est faiblement actionné au cours d'une journée. Pour limiter l'effet des changements intempestifs de luminosité, le changement de position du volet est activé si sa durée est supérieure à une heure.

La *figure 3.30* illustre la démarche permettant d'obtenir les positions du volet pour chaque quart d'heure pour l'appartement I-SN-3D-S. Les seuils de luminosité, déterminés par des mesures *in situ* puis déduits des données mesurées, sont indiqués dans le *tableau 3.3*. On observe que sans traitement, les variations du volet sont très importantes. Le lissage sur une heure correspond davantage un usage normal d'un volet par un individu.

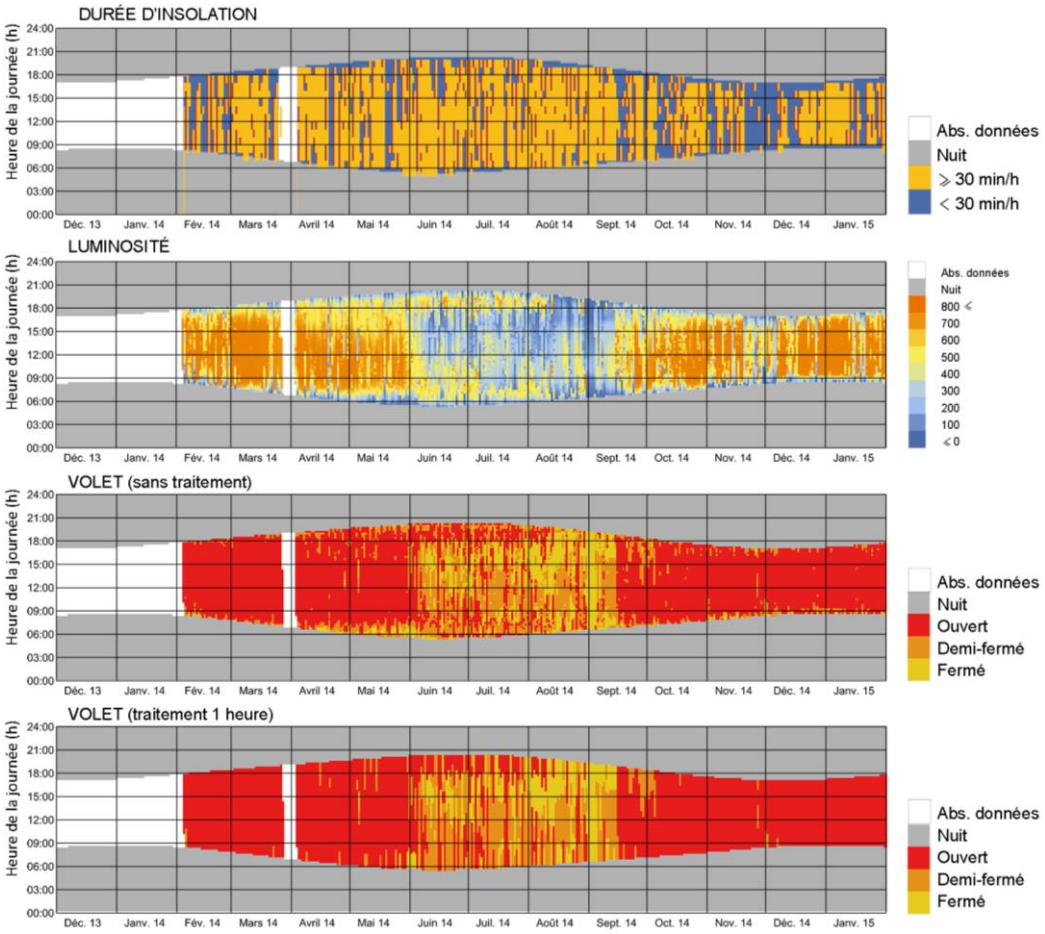


FIGURE 3.30 : *Étapes de définition de l'état du volet pour l'appartement I-SN-3D-S*
de l'auteur

Luminosité	Durée d'insolation ≥30min/h		Durée d'insolation <30min/h	
Seuils	Fermé / Demi-fermé	Demi-fermé / Ouvert	Fermé / Demi-fermé	Demi-fermé / Ouvert
I-SN-1-A	300	550	50	150
I-EO-2a-A	250	400	30	150
I-SN-3D-S	250	500	30	150
I-SN-3-A	250	500	30	150
I-SN-2-A	200	450	30	150
I-OE-2-A	250	500	50	200
I-SN-0-A	200	350	30	100
N-EO-1-A	200	450	50	300
N-SN-3D-A	250	620	30	200
N-SN-1a-A	200	550	50	150
N-SN-2-S	200	670	50	250
N-SN-0-A	200	500	30	100
N-SN-1b-A	150	550	30	100

TABLEAU 3.3 : *Seuils de luminosité permettant de définir la position du volet dans les 13 appartements*
de l'auteur

II.2.2. Typologies des usages du volet

Comme nous l'avons fait pour l'analyse de la fenêtre, nous cherchons également à simplifier la complexité des données journalières de l'utilisation du volet. La position du volet a une influence sur l'ambiance thermique interne lorsqu'il est maintenu dans un état donné suffisamment longtemps (durée cumulée supérieure à 2 h sur une plage horaire de 4 h). Pour cela, nous avons identifié quatre états (fermé, demi-fermé, ouvert et cumul des états fermé et demi-fermé) sur trois plages horaires (matin, après-midi, soir). Grâce à ces échantillons répertoriés dans le *tableau 3.4*, on identifie une combinaison de 26 possibilités que nous avons réduites à six typologies journalières (*Tableau 3.5*) correspondant à différentes possibilités de mise en place de protections solaires (absence, le matin, l'après-midi, toute la journée). Ces typologies sont ainsi analysées en fonction des saisons pour identifier le type de pratique des occupants.

Code	Définition	Durée
O	Ouvert	> 2 h
F	Fermé	> 2 h
M	Demi-fermé	> 2 h
S	Somme Fermé et Demi-fermé	> 2 h
D	Absence de donnée	
I	Indéterminé	

Code	Plage horaire	
m	08 :00	11 :45
a	12 :00	15 :45
s	16 :00	19 :45

TABLEAU 3.4 : *Échantillons pour le volet*
de l'auteur

Code	Combinaisons	Définition	Couleur
D	*D*	Absence de donnée	
O	*O, Oa, OmOa, Om*	Ouverture toute la journée	
M	*Mm, FmOa, Fm, SmOa*	Protection le matin	
A	*OmMa, Ma, OmFa, OmSa, Fa*	Protection l'après-midi	
P	*MmMa, MmFa, FmMa, MmSa, F, FmFa, SmFa, FmSa, SmMa, SmSa, M*	Protection en journée	
I	*I*	Indéterminé	

TABLEAU 3.5 : *Typologies journalières pour le volet*
de l'auteur

II.2.3. Des stratégies saisonnières

Nous avons constaté précédemment que l'ouverture et la fermeture de la fenêtre était fortement reliée aux variations climatiques saisonnières. En ce qui concerne l'ouverture/fermeture du volet, nous observons des pratiques distinctes entre les locataires des différents appartements (*Figure 3.31* et *Figure 3.32*). Ainsi, sept locataires ont des pratiques saisonnières différenciées (I-SN-1-A, I-OE-2-A, N-SN-1b-A, N-SN-2-S, et plus particulièrement I-SN-2-A, I-SN-3D-S, N-SN-1a-A). Au contraire chez d'autres locataires les pratiques sont identiques tout au long de l'année. Ils peuvent maintenir fermé leur volet (I-SN-0-A, N-SN-0-A, N-EO-1-A) ou le laisser à

demi-fermé (N-SN-3D-A) pendant toute l'année étudiée. Enfin deux locataires semblent avoir des pratiques plutôt aléatoires (I-SN-3-A et I-EO-2-A). Le nombre d'appartements dont les pratiques semblent saisonnières étant élevé, nous continuons l'étude saison par saison.

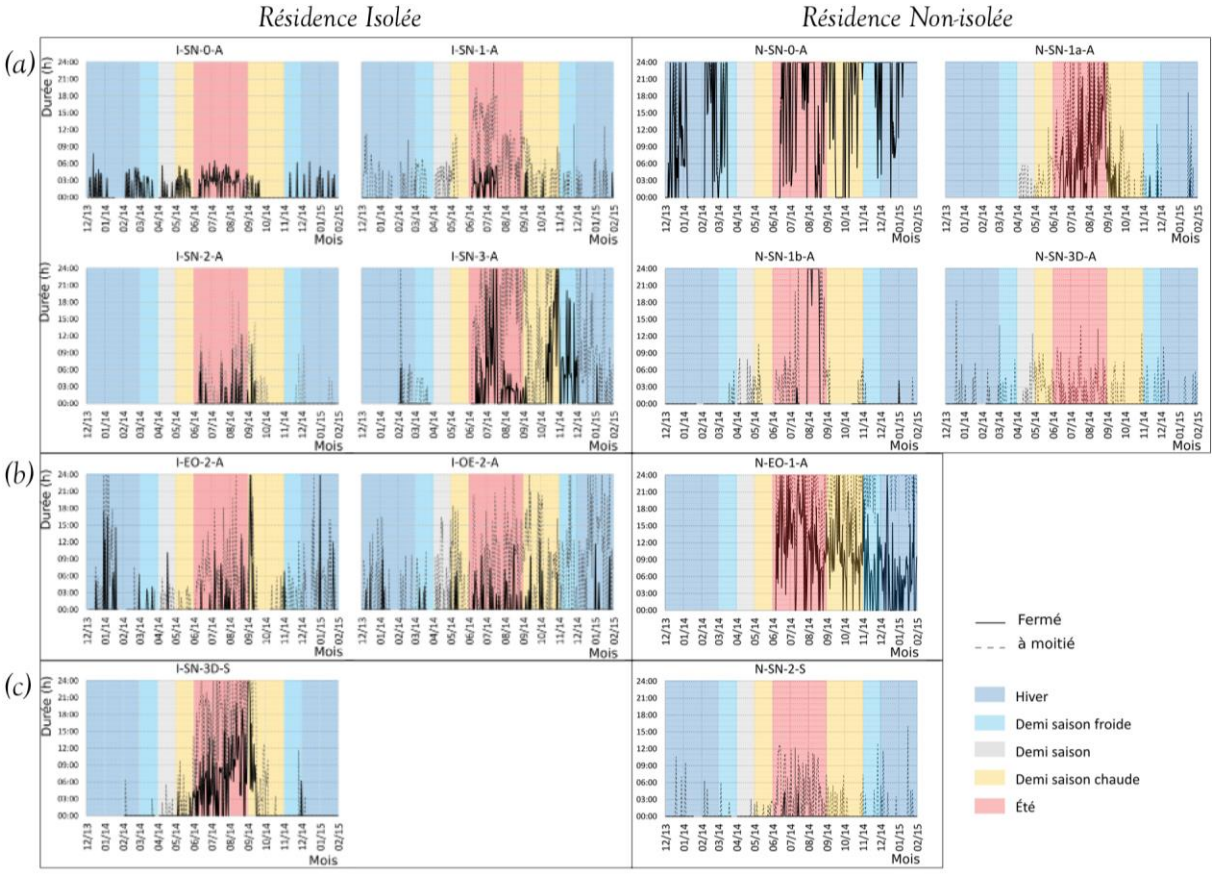


FIGURE 3.31 : *Durées journalière (en période diurne) de fermeture et demi-fermeture du volet dans les deux résidences en fonction des appartements dont le séjour est orienté (a) Sud, (b) Est ou Ouest et (c) Sud avec une personne âgée*
de l'auteur

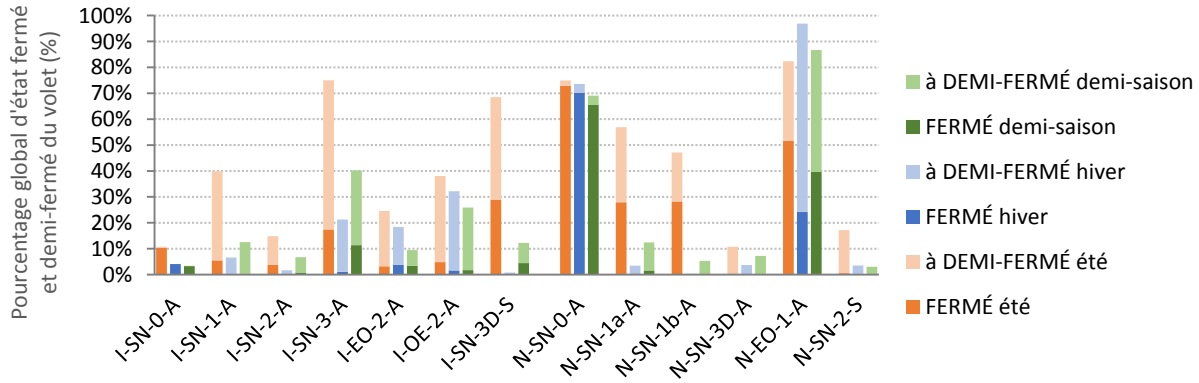


FIGURE 3.32 : *Pourcentage de fermeture et demi-fermeture du volet en fonction des saisons et des appartements*
de l'auteur

II.2.3.1. Analyse des usages en été

Sur la *figure 3.33*, sont représentées en rouge les périodes où le volet est ouvert, en orange celles où il est à demi-fermé et en jaune celles où il est fermé. L'étude des états de la fenêtre de chaque appartement nous a permis d'identifier deux appartements (N-SN-0-A et N-SN-1b-A) dont les locataires étaient fortement absents lors de cette période. C'est un élément que l'on retrouve avec l'étude du volet puisque ces appartements ont une faible fréquence de modification de la position du volet. De plus, on observe que plusieurs appartements (I-SN-2-A, I-EO-2-A, N-SN-3D-A et N-SN-2-S) ferment leur volet au cours de la journée, alors que d'autres le positionnent le matin pour ne le modifier que le soir (I-SN-3D-S). Les appartements orientés à l'Est ou à l'Ouest, semblent avoir, au moins pour deux d'entre eux, des locataires aux pratiques différenciées de ceux orientés Sud. Ainsi, les locataires de l'appartement I-OE-2-A, orienté Ouest, ouvre son volet le matin et le ferme vers 13 h. Au contraire, ceux de l'appartement N-EO-1-A, orienté Est, le ferme en début de journée, et semble l'ouvrir en partie dans l'après-midi.

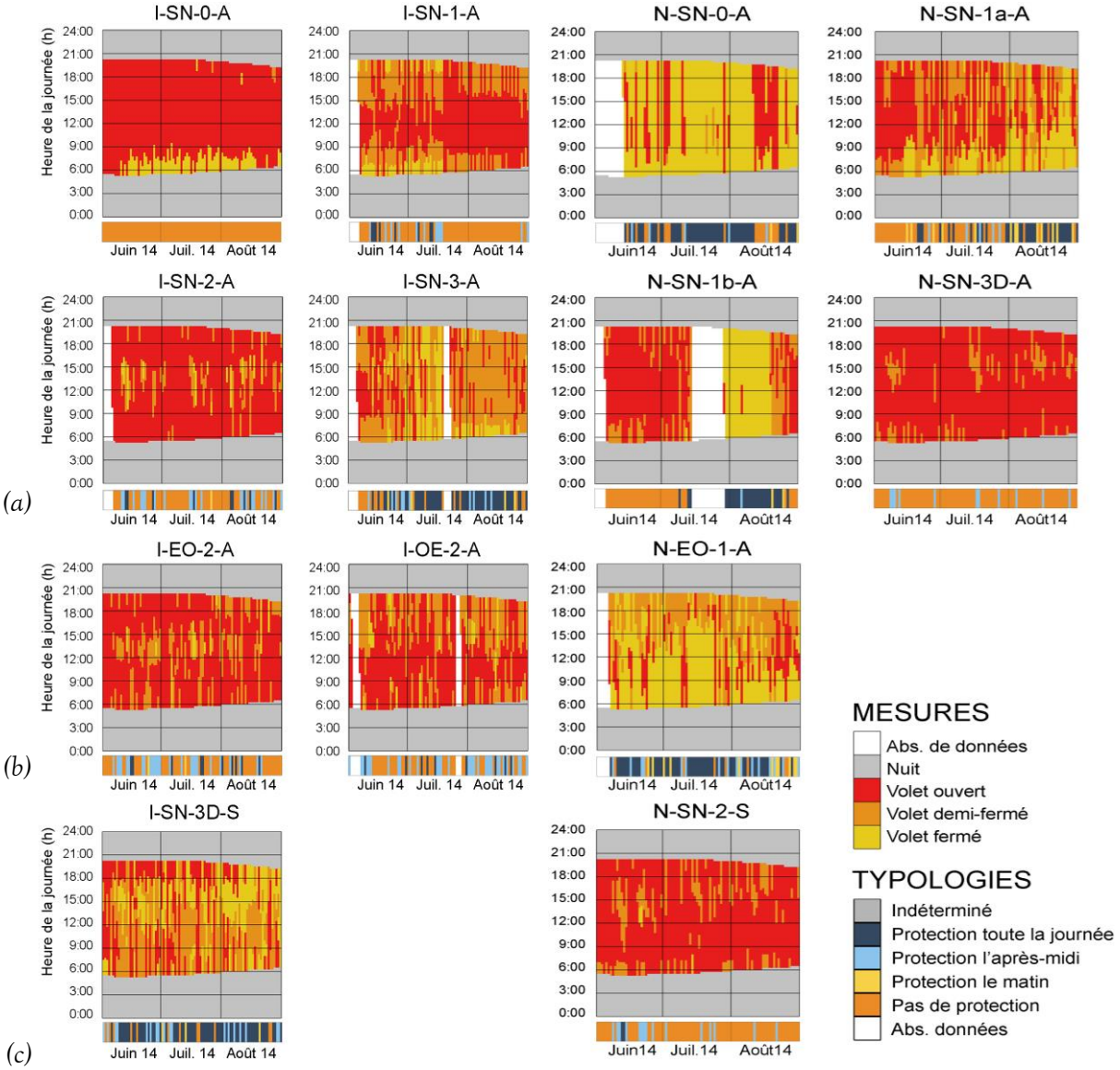


FIGURE 3.33 : *États « ouvert », « demi-fermé » et « fermé » du* ***volet*** *en fonction des jours en* ***été*** *associés aux typologies des usages journaliers dans les* ***deux résidences*** *et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées de l'auteur*

Comme pour l'analyse de la gestion des fenêtres, les pratiques peuvent être regroupées en cinq typologies d'usages du volet par les locataires (*Figure 3.34*):

- Les locataires qui ne mettent pas en place de stratégies de protection solaire (I-SN-0-A)
- Les locataires qui se protègent en fermant complètement le volet (N-SN-0-A, N-SN-1b-A, I-SN-3-A, N-EO-1-A et I-SN-3D-S)
- Les locataires qui se protègent l'après-midi entre 12 h et 15 h (I-SN-2-A, I-EO-2-A, N-SN-3D-A et N-SN-2-S)
- Les locataires qui ferment mais avant 9 h ou après 16 h (I-SN-1-A, N-SN-1a-A et N-SN-1b-A)
- Les locataires qui ferment l'après-midi à cause de l'orientation de leur séjour (I-OE-2-A)

La réglementation thermique prévoit en été une protection solaire totale (cf. *Chapitre 4-II.2.1.4*). Or la *figure 3.34*, montre qu'aucun locataire ferme ses volets tout l'été et certains, au contraire, ne se protègent jamais ce qui conduit à une augmentation des apports solaires. Comme nous avons vu pour l'ouverture de la fenêtre, ce comportement peut conduire à une augmentation des températures intérieures. On constate donc, comme pour la gestion des volets, que la réglementation réduit les comportements à une seule pratique limitant les apports solaires, or dans la réalité ils sont beaucoup plus aléatoires.

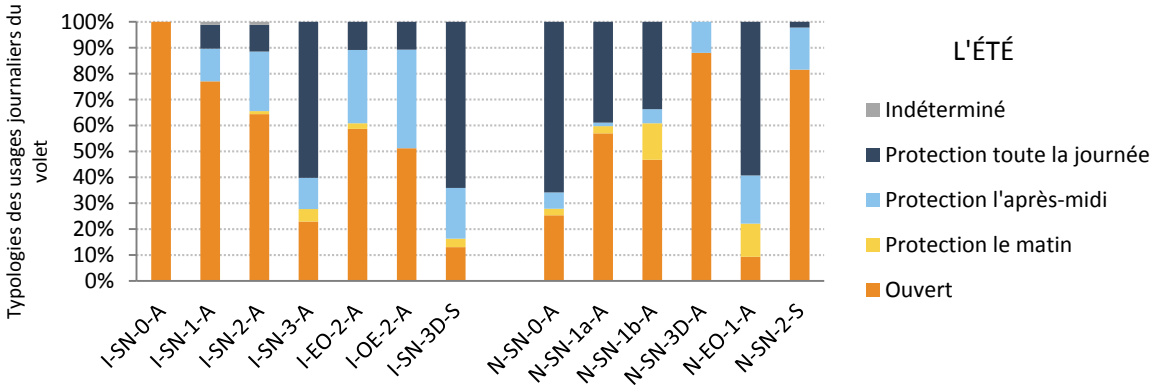


FIGURE 3.34 : *Pourcentage de typologies des usages journaliers du volet sur la **période estivale** en fonction des appartements*
de l'auteur

II.2.3.2. Analyse des usages en hiver

En hiver, l'analyse des usages journaliers d'ouverture et de fermeture du volet ne montre pas une grande diversité comme nous avons pu le constater pour la période estivale (*Figure 3.35* et *Figure 3.36*). Neuf locataires laissent leur volet complètement ouvert toute la journée afin de profiter des apports solaires. Seuls quatre ont des pratiques différentes. Deux d'entre eux (I-SN-3-A et I-OE-2-A) laissent leur volet ouvert la majorité du temps mais le ferment à moitié de temps en temps. Le locataire de l'appartement N-SN-0-A, souvent absent, le laisse fermé. Celui de l'appartement N-EO-1-A, le laisse à demi-fermé tout le temps. Nous obtenons quatre typologies d'usages sur la période hivernale.

La *figure 3.37* montre que la majorité des locataires ouvrent leur volet toute la journée en hiver ce qui est en accord avec les scénarios prévus par la réglementation thermique (cf. *Chapitre 4-II.2.1.4*). Cependant, certains se protègent, les apports solaires sont alors limités.

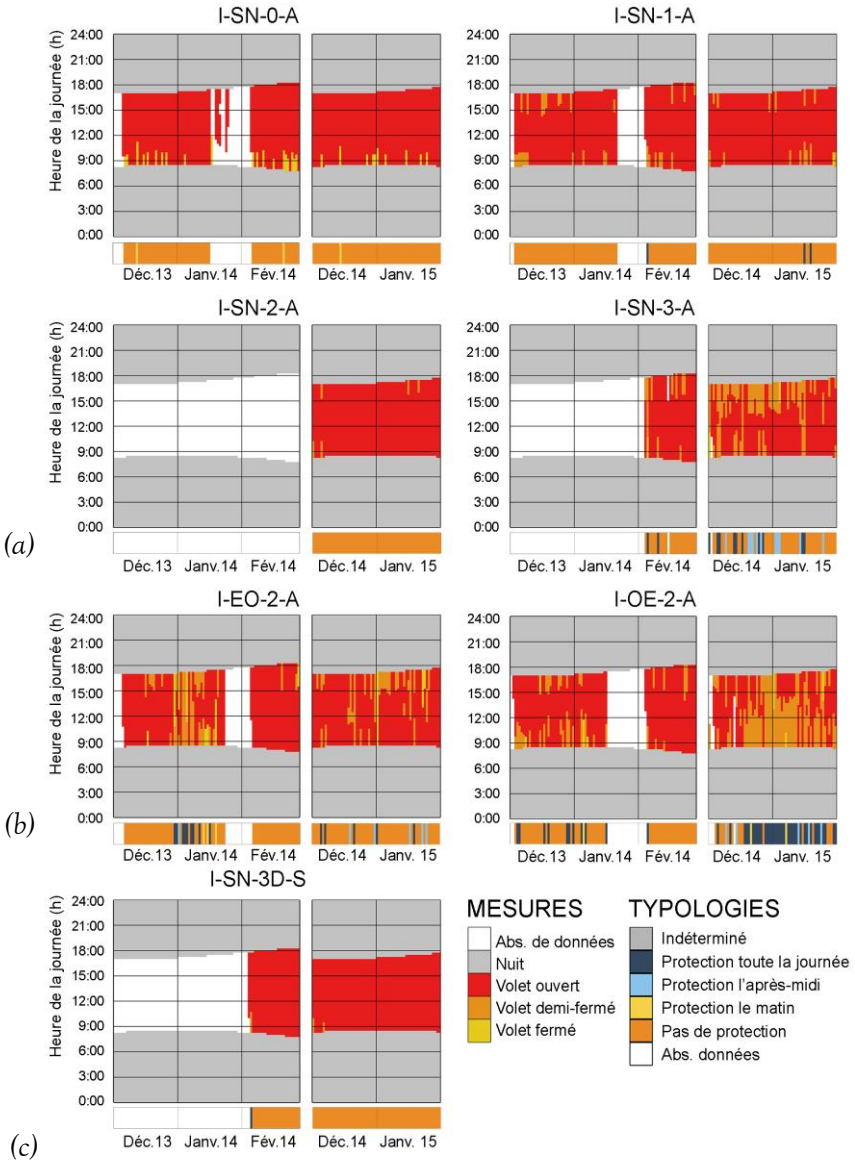


FIGURE 3.35 : *États « ouvert », « demi-fermé» et « fermé » du **volet** en fonction des jours en **hiver** associés aux typologies des usages journaliers dans la **résidence isolée** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées de l'auteur*

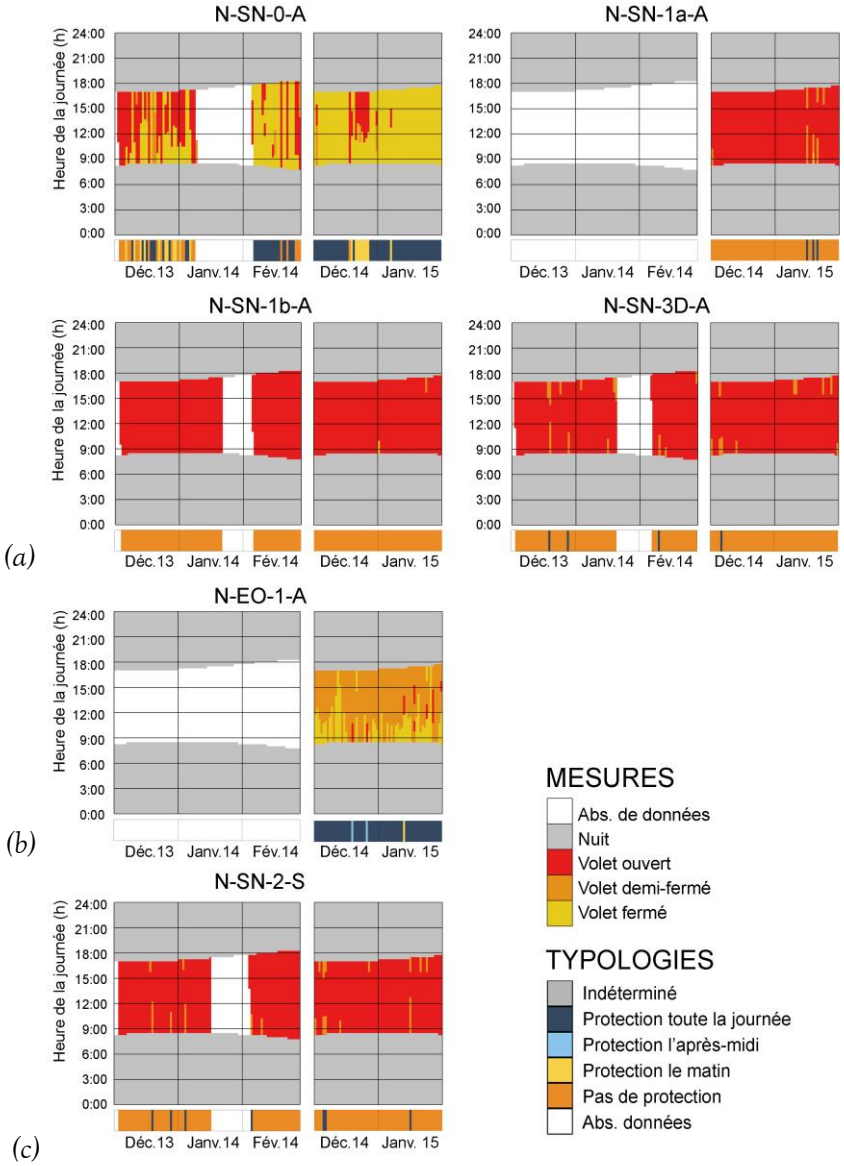


FIGURE 3.36 : *États « ouvert », « demi-fermé » et « fermé » du **volet** en fonction des jours en **hiver** associés aux typologies des usages journaliers dans la **résidence non-isolée** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

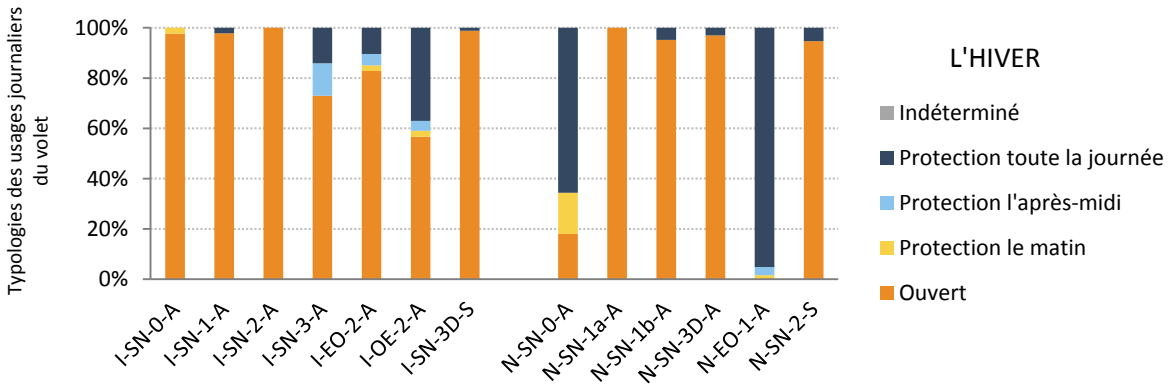


FIGURE 3.37 : *Pourcentage de typologies de pratiques journalières du volet sur la **période hivernale** en fonction des appartements*
de l'auteur

II.2.3.3. Analyse des usages en demi-saison

En demi-saison, l'analyse de la *figure 3.38* et de la *figure 3.39* permet de retrouver les pratiques identifiées pendant la période hivernale. Neuf locataires laissent leur volet ouvert la journée en demi-saison. Quatre locataires ont des pratiques différentes (*Figure 3.40*). Celui de l'appartement N-SN-0-A ne l'ouvre que très peu, surement à cause de son absence et du fait qu'il est au rez-de-chaussée. Le locataire de l'appartement I-OE-2-A semble ouvrir son volet plutôt après 12 h. Enfin, celui de l'appartement N-EO-1-A le ferme à moitié qu'après 12 h. Le locataire de l'appartement I-SN-3-A a deux pratiques distinctes. Il laisse majoritairement ouvert en mars et septembre. Par contre en octobre et novembre, le volet est à demi-fermé ou fermé. On constate que le changement correspond à la période où nous avons fait une visite dans l'appartement pour récupérer les données. Il se peut que le capteur n'était pas positionné de la même manière ce qui peut engendrer cette différence significative de pratique.

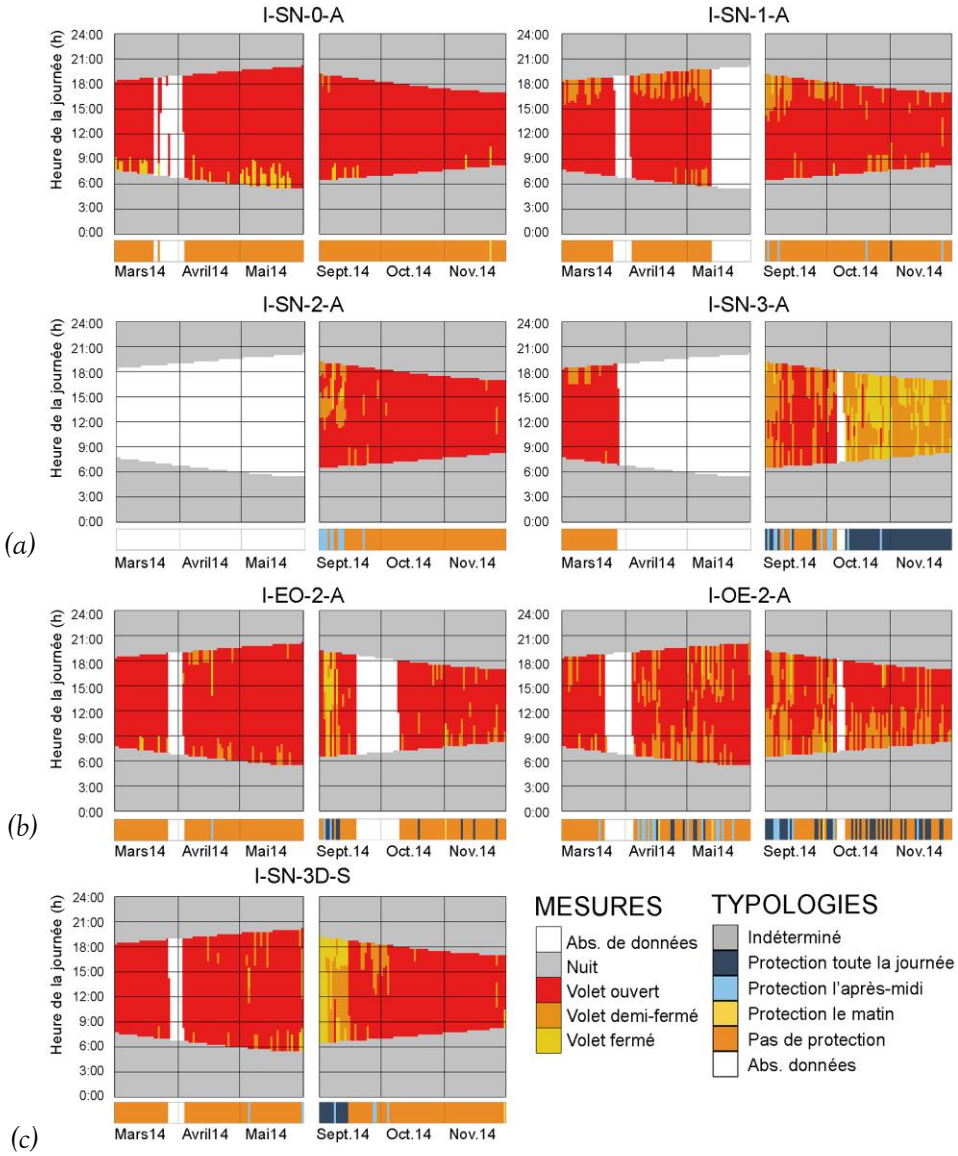


FIGURE 3.38 : *États « ouvert », « demi-fermé » et « fermé » du* ***volet*** *en fonction des jours en* ***demi-saison*** *associés aux typologies des usages journaliers dans la* ***résidence isolée*** *dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest et (c) avec des personnes âgées de l'auteur*

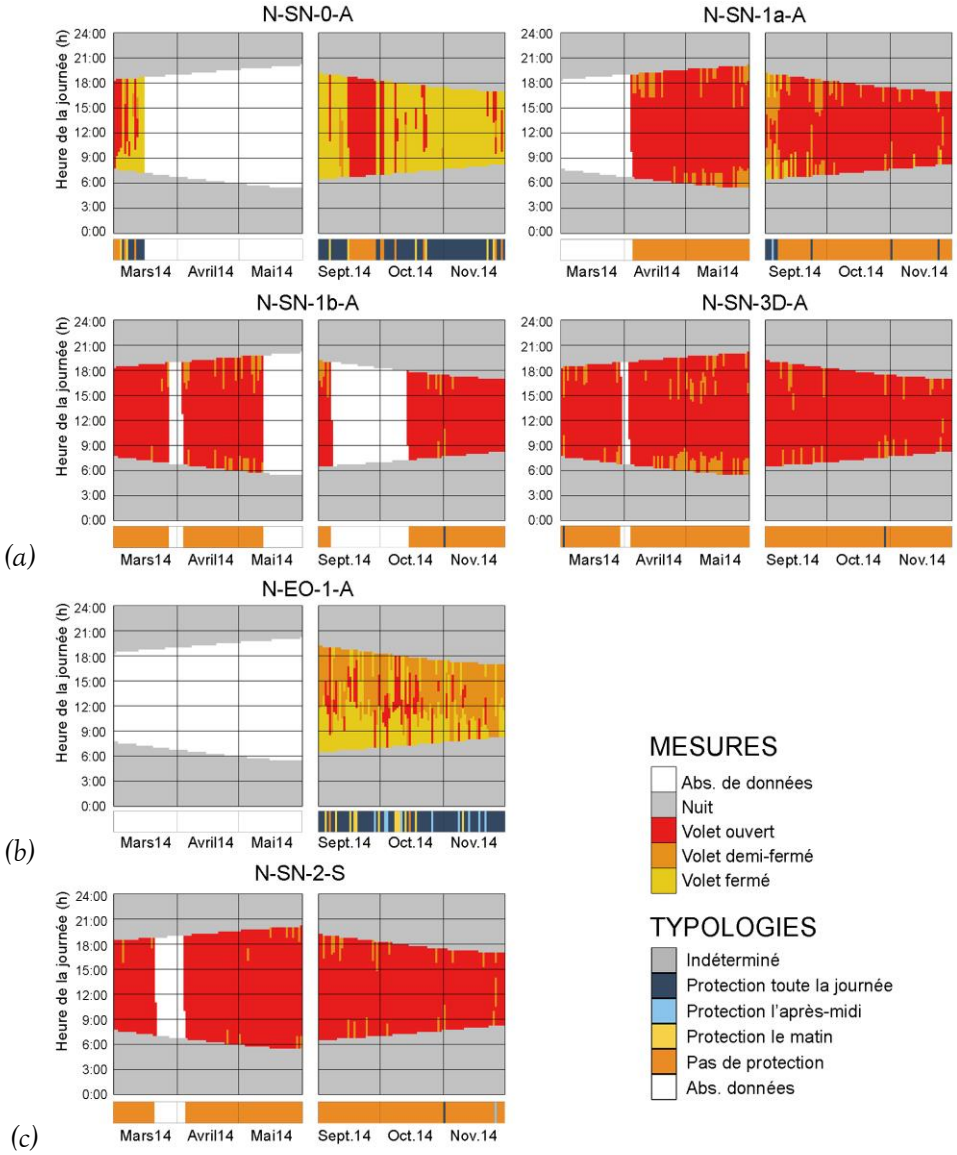


FIGURE 3.39 : *États « ouvert », « demi-fermé » et « fermé » du **volet** en fonction des jours en **demi-saison** associés aux typologies des usages journaliers dans la **résidence non-isolée** et dans les appartements (a) orientés Sud, (b) orientés Est ou Ouest, (c) avec des personnes âgées*
de l'auteur

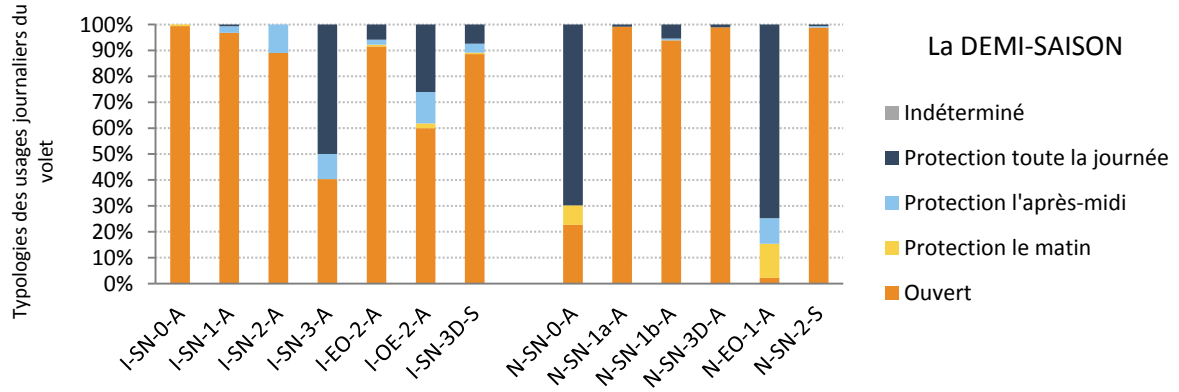


FIGURE 3.40 : *Pourcentage de typologies des usages journaliers du volet sur la période de **demi-saison** en fonction des appartements*
de l'auteur

III. Identification des profils d'occupant

L'analyse des usages de la fenêtre et du volet par les occupants montre une évolution des pratiques en fonction des saisons. Cependant, la création de profils d'occupant permet d'identifier des combinaisons d'actions ayant un impact sur le confort. Ces combinaisons sont ensuite à implémenter dans les logiciels de thermique dynamique.

III.1. Évolution de l'inconfort : le degré d'inconfort

Selon le confort adaptatif, l'équation *[Éq. 1.17]* nous permet de tracer, sur la *figure 3.41.a*, la température opérative de confort en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière (T_{RM7}) pour deux jours consécutifs. Sur cette représentation, il est difficile d'identifier l'évolution du confort/inconfort au cours de la journée. Nous mesurons alors l'écart de température opérative intérieure à la température de confort optimale que nous appelons degré d'inconfort. Sur la *figure 3.41.b*, nous pouvons ainsi étudier les variations journalières du confort (optimal autour de 0 °C et critique au-delà de +3 °C et en deçà de -3 °C). Cette représentation permet d'étudier les relations entre l'évolution de l'inconfort et les actions mesurées.

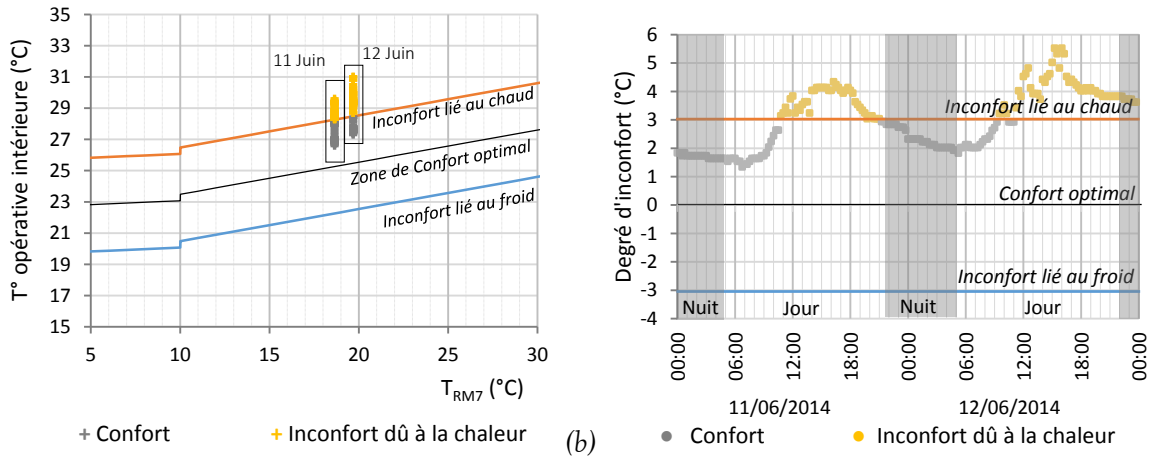


FIGURE 3.41 : *Calcul du confort/inconfort pour un appartement les 11 et 12 juin 2014 : (a) Température opérative intérieure en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière, (b) Écart de température opérative à la courbe de confort en fonction du temps*
de l'auteur

III.2. Analyse des actions et du confort en été

En été, l'occupant a un rôle majeur dans le maintien de son confort (ou dans sa dégradation). La suite de l'étude du confort et des usages de la fenêtre et du volet par les locataires se concentre sur les trois jours consécutifs les plus chauds de l'année 2014, à savoir du 10 au 12 juin. Sur cette période, deux appartements (I-SN-1-A et N-SN-0-A) ne sont pas étudiés car les données sont manquantes ou partielles. Dans le paragraphe précédent, nous avons déterminé huit typologies d'usage de la fenêtre (cf. *Tableau 3.2*) et quatre concernant le volet (cf. *Tableau 3.5*). Chaque

locataire peut ensuite combiner ces pratiques suivant les jours et les saisons. Concernant les trois jours étudiés, nous constatons dans le *tableau 3.6*, que les typologies peuvent être réduites au nombre de quatre pour la fenêtre (Ouverte toute la journée (O), Ouverte le matin, le jour et le soir (L), Sur-ventilation nocturne (N), Fermée tout le temps (F)) et quatre pour le volet (Ouvert toute la journée (O), Protection l'après-midi (A), Protection toute la journée (P), Protection le matin (M)).

Typologies des pratiques	Fenêtre			Volet		
Jours	10/06	11/06	12/06	10/06	11/06	12/06
I-SN-0-A	O	L	O	O	O	O
I-SN-2-A	L	L	L	A	A	P
I-SN-3-A	L	O	L	O	A	O
I-SN-3D-S	N	N	N	P	P	P
N-SN-1a-A	F	L	L	O	O	O
N-SN-1b-A	O	N	F	O	O	O
N-SN-3D-A	O	L	O	A	O	A
N-SN-2-S	L	O	O	A	A	M
I-OE-2-A	O	O	O	A	A	A
I-EO-2-A	L	L	O	A	O	O
N-EO-1-A	L	O	O	P	P	P

TABLEAU 3.6 : ***Typologies des usages de la fenêtre et du volet en fonction des appartements pendant les trois jours les plus chauds (10 au 12 juin 2014)***
de l'auteur

Dans les appartements orientés au Sud, la première chose que les analyses de la *figure 3.44* et de la *figure 3.45* mettent en évidence est un niveau de confort différencié. Si certains locataires sont dans l'inconfort dès le premier jour étudié (I-SN-0-A et I-SN-3-A), d'autres, au contraire, n'y sont jamais (I-SN-3D-S). Les appartements ayant les mêmes propriétés (orientation, typologie, matériaux de construction), on en déduit que ce sont les pratiques des occupants qui engendrent ces différences. L'analyse de la *figure 3.46* montre que les deux appartements dont les séjours sont orientés à l'Est ne présentent pas de période importante d'inconfort et celui exposé à l'Ouest a un confort dégradé seulement le troisième jour. Dans l'ensemble des appartements, on remarque une évolution journalière de l'inconfort. C'est la nuit ou au petit matin que l'inconfort est minimal et entre 12 h et 18 h qu'il est maximal. L'inconfort évolue ainsi avec les conditions climatiques extérieures. Nous observons également chez certains locataires des variations ponctuelles franches. L'analyse des moyennes du degré d'inconfort diurne et nocturne dans la résidence isolée (*Figure 3.42*), montre une différence d'un demi-degré entre les données diurnes et nocturnes. Dans la résidence non-isolée, il est d'environ 0,7 °C. Il apparaît ainsi que, si en journée, les moyennes du degré d'inconfort sont identiques quelle que soit la résidence, la nuit, au contraire, c'est dans la résidence non-isolée qu'elles diminuent le plus. Pour ces trois journées, l'inconfort est donc plus prononcé dans la résidence isolée que dans la résidence non-isolée notamment la nuit.

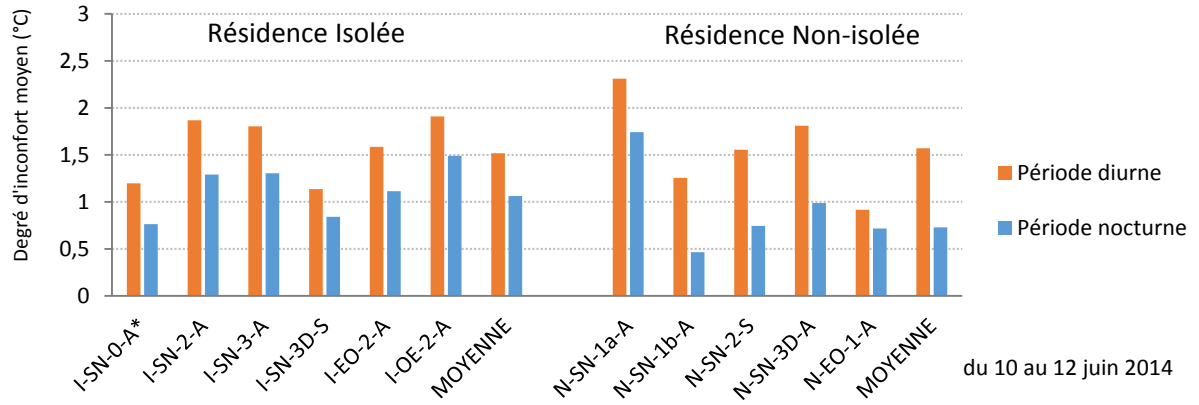


FIGURE 3.42 : *Moyennes du degré d'inconfort diurne et la nocturne sur la période du 10 au 12 juin 2014, en fonction des appartements (*données filtrées pour enlever les périodes d'inconfort liées à une source de chaleur)*
de l'auteur

Sur la *figure 3.44* l'appartement I-SN-0-A se distingue des autres car le confort semble fortement dégradé à partir de 20 h pour retrouver son niveau antérieur dans la soirée. L'enquête *in situ* a permis d'identifier une source de chaleur (en l'occurrence un lampadaire halogène, déplacé au cours de l'instrumentation) situé en-dessous du « capteur séjour » qui a conduit à une forte augmentation de la température ambiante mesurée. Dès l'arrêt du luminaire, nous observons que l'inconfort diminue fortement. En dehors de ces périodes ponctuelles d'inconfort, il semble que le locataire de cet appartement, situé en rez-de-chaussée n'entre pas dans la zone d'inconfort maximal.

L'analyse de l'ensemble des graphiques de la *figure 3.44*, de la *figure 3.45* et de la *figure 3.46* met en évidence une absence de relation entre un inconfort et une action. En effet, on observe que la présence d'un inconfort maximal n'entraine pas de réaction comportementale directe auprès de la fenêtre ou du volet. Cependant, d'autres actions comme la mise en place d'un ventilateur, le changement de vêtements, la réduction de son activité physique ou la consommation d'une boisson fraîche ne sont pas considérées ici mais peuvent également faire partie des actions réalisables par les occupants pour améliorer leur confort thermique. Cela peut expliquer le manque de relation entre l'inconfort et les actions étudiées. Toutefois, les pratiques des occupants semblent avoir un impact sur l'ambiance thermique. En effet, on observe que la mise en place des protections solaires l'après-midi, alors que la fenêtre est laissée ouverte, engendre une stagnation voire une diminution de l'inconfort au sein des appartements (repérée en vert sur les graphiques où la typologie de pratique du volet est déterminée A ou M et que la fenêtre est ouverte). On peut supposer que cette action engendre une diminution de la ventilation et réduit donc les échanges entre l'intérieur et l'extérieur. En journée, la température intérieure étant généralement plus faible que la température extérieure, il est alors important de réduire les échanges.

Pour obtenir un habitat confortable en été sans utiliser la climatisation, *(OLIVA et COURGEY, 2006)* définissent la stratégie de rafraîchissement suivante : se protéger des apports solaires directs, minimiser les apports internes et sur-ventiler la nuit afin de dissiper les calories accumulées au cours de la journée (*Figure 3.43*). Sur la base des actions et de leurs implications sur le confort, on peut déterminer trois profils d'occupant : l'occupant « contre-productif », l'occupant « actif » et l'occupant « expert » *(BATIER, 2015)*. Nous attribuons, dans la suite de l'étude des trois jours les plus chauds, les différents profils à des appartements. Cependant, ces profils valables pour les trois jours étudiés ne sont pas toujours représentatifs de toute la période estivale comme nous le verrons par la suite.

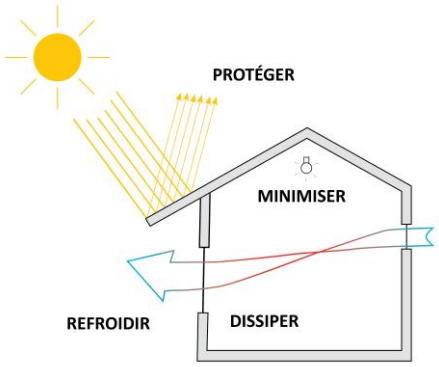


FIGURE 3.43 : *Stratégie de rafraîchissement*
de l'auteur

De manière à maintenir un confort optimal au sein des appartements, les pratiques des locataires doivent être différentes en fonction des orientations des appartements. Ainsi, pour un appartement dont le séjour est exposé au Sud, il est important de mettre en place des protections solaires toute la journée. Au contraire pour des appartements dont les séjours sont exposés à l'Est la protection solaire est nécessaire plutôt le matin et pour ceux exposés à l'Ouest, le soir. Ce changement de pratique induit des couples fenêtre-volet différents lors de la définition des profils d'occupant.

– L'occupant « **contre-productif** »

L'occupant « contre-productif » actionne sa fenêtre et son volet mais ses actions conduisent à un inconfort important notamment pendant les périodes les plus chaudes. En été, la stratégie de rafraîchissement n'est donc pas mise en place. Les couples des typologies des usages de la fenêtre et du volet correspondants à ce profil d'occupant en fonction des orientations des appartements sont répertoriées dans le *tableau 3.7*. On observe ainsi plusieurs occupants dont le profil est défini comme « contre-productif » sur les trois jours étudiés. Il s'agit des locataires des appartements I-SN-0-A et I-SN-3-A (*Figure 3.44*) et N-SN-1a-A et N-SN-1b-A (*Figure 3.45*), orientés Sud, et I-EO-2-A (*Figure 3.46*) orienté Est.

Dans les appartements orientés Sud, seul le locataire de l'appartement I-SN-0-A n'a pas de période importante d'inconfort en dehors des périodes où le luminaire est actif. L'étude des caractéristiques de l'appartement montre que c'est un appartement en rez-de-chaussée. Malgré un comportement de l'occupant qualifié de « contre-productif », l'inconfort reste réduit. On peut supposer que la présence de caves en sous-sol joue le rôle de plancher rafraîchissant permettant ainsi de diminuer la température ambiante de l'appartement.

Dans les trois autres appartements, l'inconfort est maximal dès le premier jour dans la résidence isolée et dès le deuxième dans la résidence non-isolée. Les occupants ouvrent leur fenêtre en dehors des plages horaires « optimales » du point de vue thermique (22 - 6 h, plage horaire où la température extérieure est inférieure à la température intérieure), laissant entrer la chaleur à l'intérieur de l'appartement. De plus, ils ne se protègent pas des apports solaires. La température intérieure du logement augmente. La nuit, la fenêtre étant fermée, la chaleur stockée au cours de la journée n'est pas évacuée. Les jours suivants, l'inconfort devient alors de plus en plus important.

Dans l'appartement orienté Est (I-EO-2-A), l'occupant utilise très peu son volet et ouvre sa fenêtre en continu. Malgré un comportement que l'on pourrait qualifier de « contre-productif », on n'identifie aucune période d'inconfort important. L'absence d'apports solaires directs dans l'après-midi grâce à l'orientation permet de limiter les montées en température de l'appartement même si aucune protection solaire n'est mise en place. Pendant la période étudiée, nous n'identifions pas de comportement « contre-productif » dans l'appartement orienté Ouest.

– L'occupant « **actif** »

L'occupant « actif » met en place une stratégie de rafraîchissement de manière partielle. Il agit au quotidien sur le volet et la fenêtre pour maintenir un confort admissible au sein de son logement. L'inconfort apparaît le deuxième ou le troisième jour. Les typologies d'usage de la fenêtre et du volet correspondant à ce profil d'occupant sont répertoriées dans le *tableau 3.7*. Dans les appartements orientés Sud (*Figure 3.44* et *Figure 3.45*), nous identifions trois locataires ayant ce profil (I-SN-2-A, N-SN-3D-A et N-SN-2-S). Nous constatons également que les locataires des appartements orientés Est (N-EO-1-A) et Ouest (I-OE-2-A) ont également ce profil (*Figure 3.46*).

Dans les appartements orientés Sud, les locataires qui ont une démarche « active » sont ceux dont la fermeture du volet dans l'après-midi (avec la fenêtre ouverte) réduit de façon quasi-immédiate l'inconfort (zones en vert sur les graphiques). En général, le volet est laissé ouvert jusqu'à 13 h. Ensuite, au moment où les apports solaires sont les plus importants, il est maintenu à demi-fermé (jusqu'à 16 h) puis laissé grand ouvert en fin de journée et surement une partie de la nuit. Dès que le volet est ré-ouvert, l'inconfort augmente de façon significative. Pour un confort optimal, il eût fallu le maintenir fermé plus longtemps.

– L'occupant « **expert** »

L'occupant « expert » met en place une stratégie de rafraîchissement de son appartement. Il a acquis une connaissance des actions bénéfiques pour son confort. Il anticipe les actions à mener en se protégeant en journée des apports solaires et en ouvrant le volet et la fenêtre le soir et la nuit pour évacuer la chaleur accumulée tout au long de la journée au moment où les écarts de température intérieure/extérieure s'inversent. Les typologies d'usages du volet et de la fenêtre en fonction des orientations sont répertoriées dans le *tableau 3.7*.

Dans les appartements orientés Sud, nous identifions, sur les trois jours les plus chauds, un seul locataire ayant ce type de pratique. Il s'agit du locataire n'ayant pas d'inconfort maximal, celui de l'appartement I-SN-3D-S (*Figure 3.44*). La fenêtre est ouverte la nuit (de 17 h à 7 h 30), moment de la journée où la température extérieure est plus faible que la température intérieure. Le volet à demi-fermé ou fermé, assurent une protection solaire complète en journée. Dans l'après-midi (15 h-18 h), il est généralement complètement fermé, et grand ouvert le soir (après 18 h).

Dans l'appartement orienté Est (N-EO-1-A), on observe aucune période d'inconfort importante. L'occupant utilise ses protections solaires pour se protéger du soleil le matin (et même l'après-midi) malgré une fenêtre ouverte en continu.

Dans l'appartement orienté Ouest (I-OE-2-A), l'occupant ferme son volet l'après-midi malgré une fenêtre ouverte 24 h/ 24. On observe que la mise en place de protections solaires l'après-midi et en soirée permet de réduire l'inconfort les deux premiers jours. Par contre, le troisième jour, le volet est ré-ouvert vers 16 h 30 et l'inconfort croît de façon significative. Ce jour-là, par contre, l'occupant peut être qualifié d'« actif » dans la mesure où il a utilisé des protections solaires mais pas suffisamment longtemps pour pouvoir se protéger du rayonnement solaire du soir.

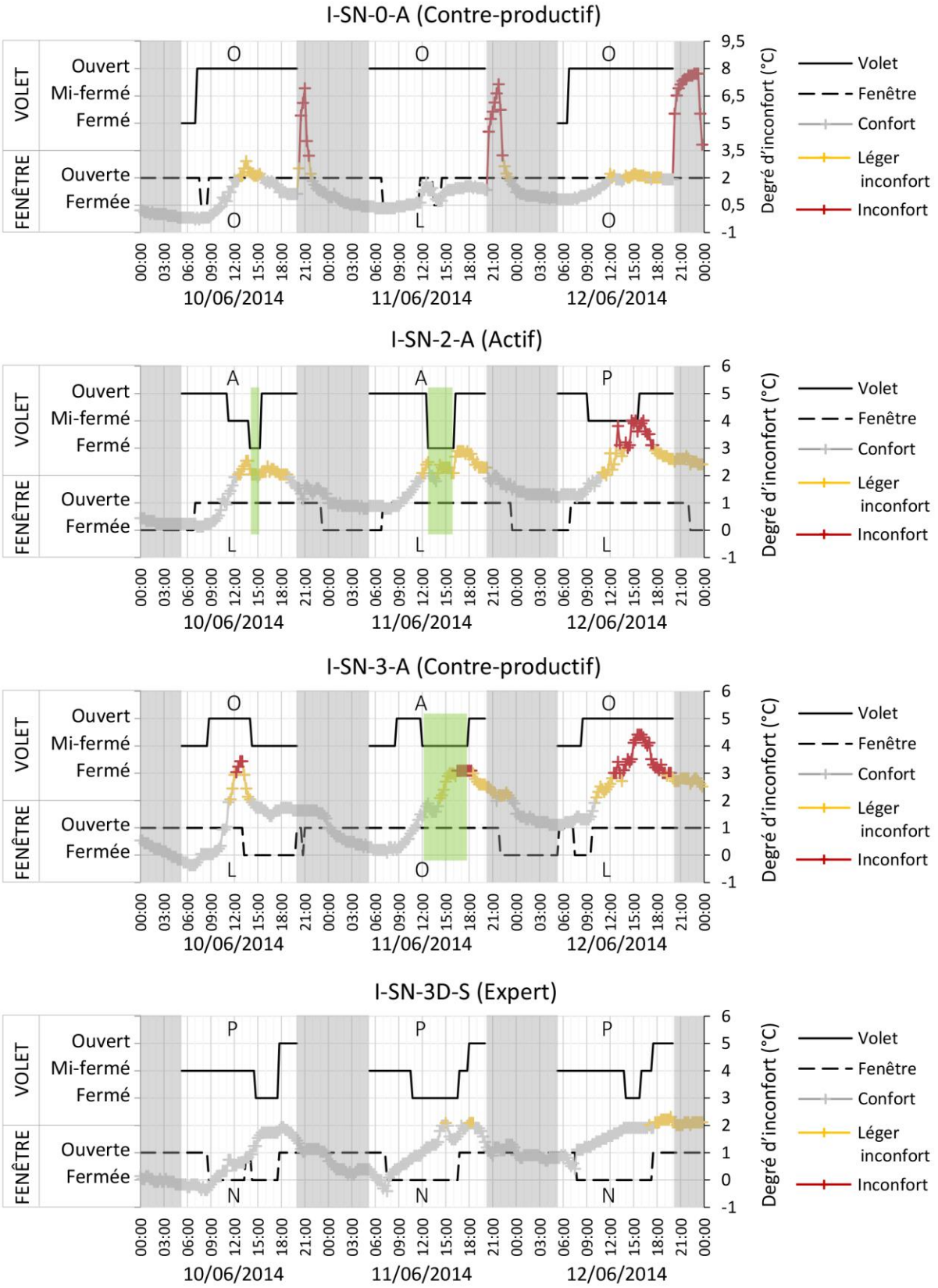


FIGURE 3.44 : *Position du volet et de la fenêtre pour les appartements dont les séjours sont orientés au **Sud** dans la **résidence isolée** en fonction des heures des **trois jours les plus chauds** de 2014 (du 10 au 12 juin)*
de l'auteur

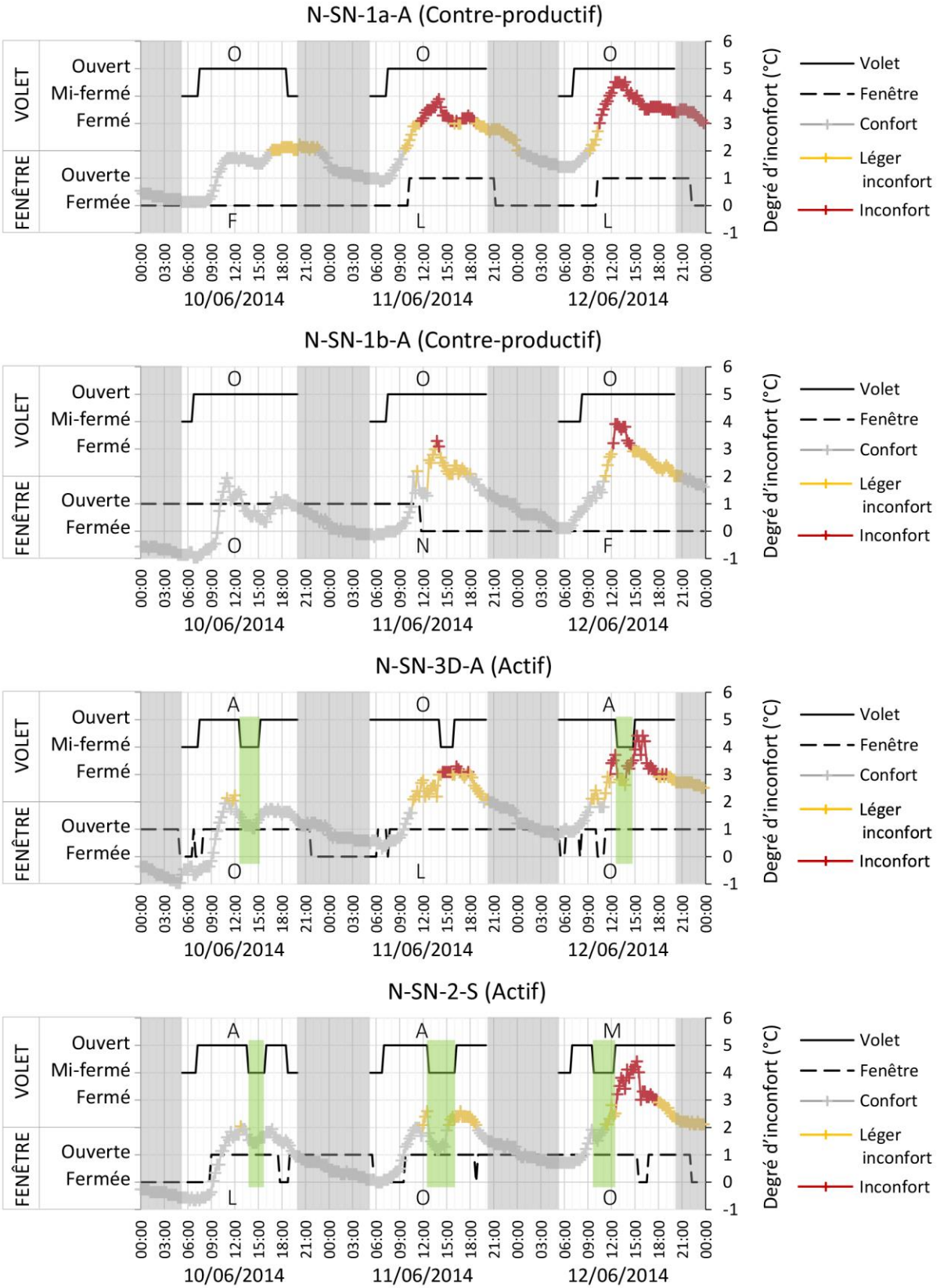


FIGURE 3.45 : *Position du volet et de la fenêtre pour les appartements dont les séjours sont orientés au **Sud** dans la **résidence non-isolée** en fonction des heures des **trois jours les plus chauds** de 2014 (du 10 au 12 juin)*
de l'auteur

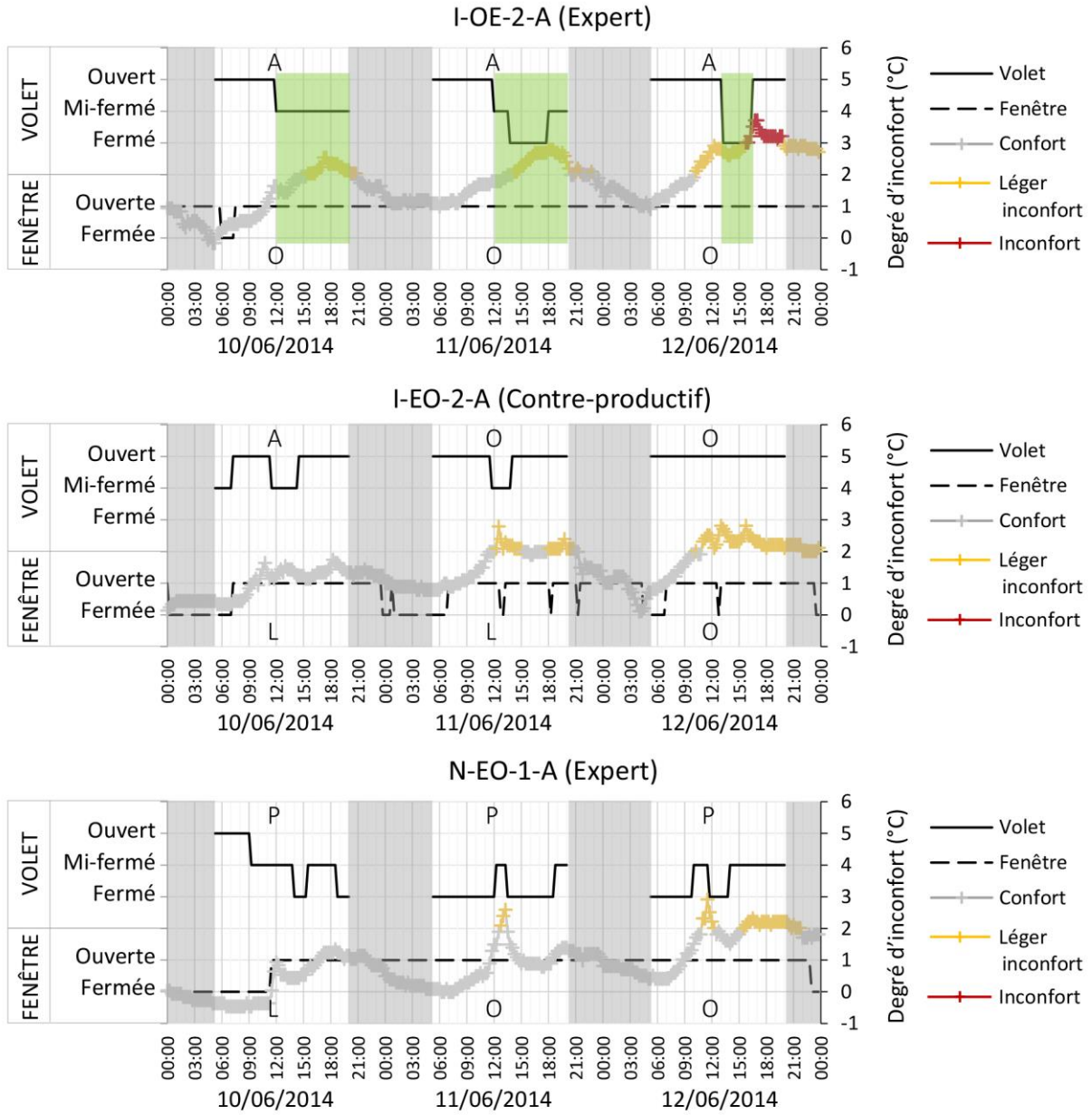


FIGURE 3.46 : *Position du volet et de la fenêtre pour les appartements dont les séjours sont orientés à l'**Ouest** puis à l'**Est** dans la **résidence isolée** puis dans la **résidence non-isolée** en fonction des heures des **trois jours les plus chauds** de 2014 (du 10 au 12 juin)*
de l'auteur

L'analyse des graphiques précédents permet d'identifier des stratégies comportementales induisant plus ou moins d'inconfort. Elles peuvent être regroupées en profils d'occupant en fonction des orientations. Le *tableau 3.7* identifie les couples fenêtre-volet pour chaque profil d'occupant en se basant sur les concepts de la stratégie de rafraîchissement, sur l'analyse précédente et sur les résultats des simulations de thermique dynamique que nous faisons au chapitre suivant (cf. *Chapitre 4-III.1.1.1*).

TYPOLOGIES DES USAGES				COUPLE	ORIENTATION		
FENÊTRE		VOLET			SUD	EST	OUEST
R	Aération réduite	O	Ouvert toute la journée	R-O	CP	CP	CP
		M	Protection le matin	R-M	A	A	CP
		A	Protection l'après-midi	R-A	CP	CP	CP
		P	Protection toute la journée	R-P	E	A	A
M	Aération le matin	O	Ouvert toute la journée	M-O	CP	A	CP
		M	Protection le matin	M-M	A	A	CP
		A	Protection l'après-midi	M-A	A	A	A
		P	Protection toute la journée	M-P	E	A	E
J	Aération en journée	O	Ouvert toute la journée	J-O	CP	CP	CP
		M	Protection le matin	J-M	CP	A	CP
		A	Protection l'après-midi	J-A	CP	CP	CP
		P	Protection toute la journée	J-P	A	A	A
L	Aération journée longue	O	Ouvert toute la journée	L-O	CP	CP	A
		M	Protection le matin	L-M	CP	A	A
		A	Protection l'après-midi	L-A	CP	CP	A
		P	Protection toute la journée	L-P	A	A	E
O	Ouverture > 20h/j	O	Ouvert toute la journée	O-O	CP	CP	E
		M	Protection le matin	O-M	A	A	E
		A	Protection l'après-midi	O-A	A	A	E
		P	Protection toute la journée	O-P	E	E	E
S	Aération le soir	O	Ouvert toute la journée	S-O	A	CP	A
		M	Protection le matin	S-M	A	E	A
		A	Protection l'après-midi	S-A	A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	S-P	E	A	E
N	Sur-ventilation matin-soir-nuit	O	Ouvert toute la journée	N-O	E	A	E
		M	Protection le matin	N-M	E	E	E
		A	Protection l'après-midi	N-A	E	E	E
		P	Protection toute la journée	N-P	E	E	E
F	Fermé toute la journée	O	Ouvert toute la journée	F-O	CP	CP	CP
		M	Protection le matin	F-M	A	A	CP
		A	Protection l'après-midi	F-A	CP	CP	CP
		P	Protection toute la journée	F-P	E	A	A

TABLEAU 3.7 : *Définition des couples de typologies des usages de la fenêtre et du volet pour un occupant « contre-productif » (CP), un occupant « actif » (A) et un occupant « expert » (E) en **été** suivant les orientations des appartements*
de l'auteur

La définition de ces profils d'occupant nous permet de classifier les journées suivants le couple fenêtre-volet en regroupant les actions ayant un impact similaire sur l'ambiance thermique. Nous pouvons ainsi mettre en relation les pratiques des occupants et leur confort. Sur la *figure 3.17*, nous observons trois périodes où les températures extérieures sont plus faibles à savoir du 14 juin au 17 juin du 7 juillet au 13 juillet et du 12 août au 24 août. Nous retrouvons, (*Figure 3.47*), chez tous les locataires, des périodes plus ou moins étendues autour de ces dates où l'inconfort semble se déplacer vers le froid. Sur la *figure 3.47*, dans la résidence isolée (graphiques de gauche), l'occupant « expert » (I-SN-3D-S) a un inconfort dû au chaud réduit alors que l'occupant « contre-productif » (I-SN-2-A) a un inconfort plus important notamment entre la mi-juillet et la mi-août. L'occupant de l'appartement I-SN-3-A a un profil d'occupant qui oscille entre « contre-productif » au mois de juin (avec un inconfort important) et « expert » en juillet-août avec quelques journées où il est « actif ». On remarque alors que son inconfort est modéré par rapport à l'appartement I-SN-2-A. Dans la résidence non-isolée (graphiques de droite sur la *figure 3.47*), on observe que l'occupant défini comme « expert » (N-SN-0-A) a un inconfort dû au chaud très faible. Cela est d'autant plus marqué que l'occupant étant absent une grande partie de l'été, les apports internes sont alors réduits ce qui limite les montées en température de l'appartement. Les appartements N-SN-3D-A et N-SN-2-S ont sur toute la période estivale un profil de « contre-productif ». On observe cependant, que le premier semble légèrement plus frais que le second ce qui peut être expliqué par l'impact légèrement différencié des différents couples de pratiques identifiés. L'appartement N-SN-1b-A a sur la période juin – début juillet le même profil que les appartements précédents. Cependant en août on observe une réduction de l'inconfort corrélée avec la présence d'un profil d'occupant « expert ». Enfin l'appartement N-SN-1a-A est celui qui a un inconfort dû au chaud le plus dégradé. Son profil d'occupant oscille entre « contre-productif » et « expert ». On note, sur la période de chaleur de juin que c'est également dans cet appartement que l'inconfort est maximal. On peut supposer que ce sont les apports internes qui sont plus importants dans cet appartement. En conséquence même si le profil d'occupant est défini comme « expert », l'inconfort reste important.

Sur la *figure 3.48*, les deux figures du haut permettent de comparer le confort et les actions dans une résidence isolée et une non-isolée en fonction du profil d'occupant pour une orientation Est. On constate que l'occupant de l'appartement N-EO-1-A, plus « expert » que celui de l'appartement I-EO-2-A, a un inconfort réduit. Enfin, l'occupant de l'appartement I-OE-2-A a un comportement qui semble déterminé comme « expert ». Cependant on observe que son confort est très dégradé. N'ayant pas d'autres appartements pour comparer les niveaux de confort, on peut supposer que cela est dû à l'orientation Ouest qui est très défavorable pour le confort d'été.

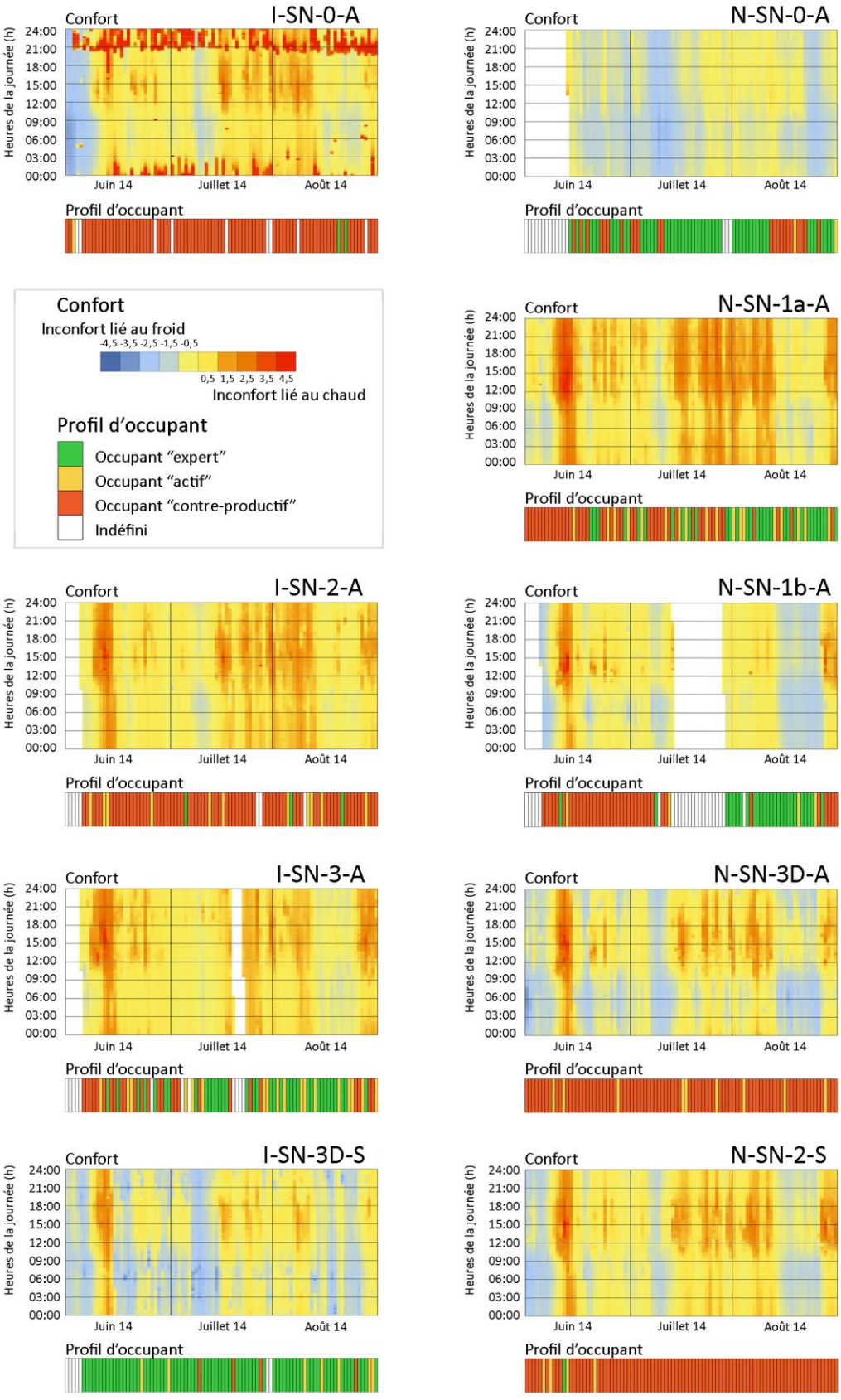


FIGURE 3.47 : *Confort et profil journaliers en fonction des appartements dont les séjours sont orientés au **Sud***
de l'auteur

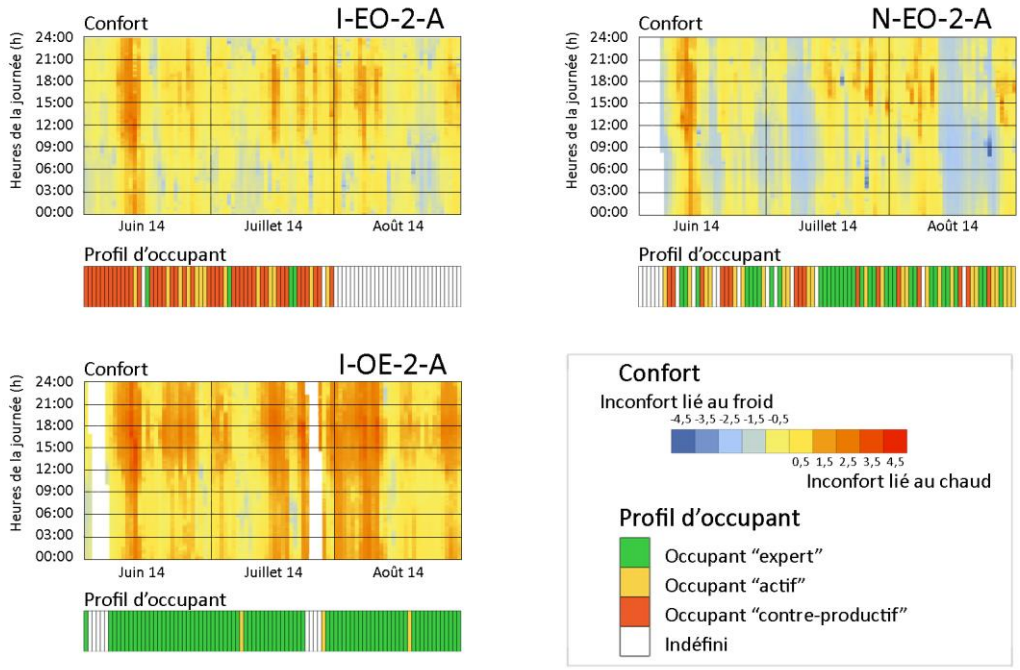


FIGURE 3.48 : *Confort et profil journaliers en fonction des appartements dont les séjours sont orientés à l'**Est** et à l'**Ouest***
de l'auteur

La *figure 3.49* montre le pourcentage de profils d'occupant en fonction des appartements. On constate que les profils évoluent au cours de la période étudiée. Le rassemblement des typologies en trois profils d'occupant ayant un impact différencié sur le confort met en évidence que les pratiques ne sont pas optimales sur tout l'été. Ainsi onze occupants ont une démarche « contre-productive » une partie de l'été ce qui peut conduire à de l'inconfort. Pour le limiter, une sensibilisation des locataires aux actions optimales est nécessaire. On peut également envisager de mettre en place des solutions architecturales permettant de pallier ces comportements « contre-productifs » comme nous le développons au *chapitre 4*.

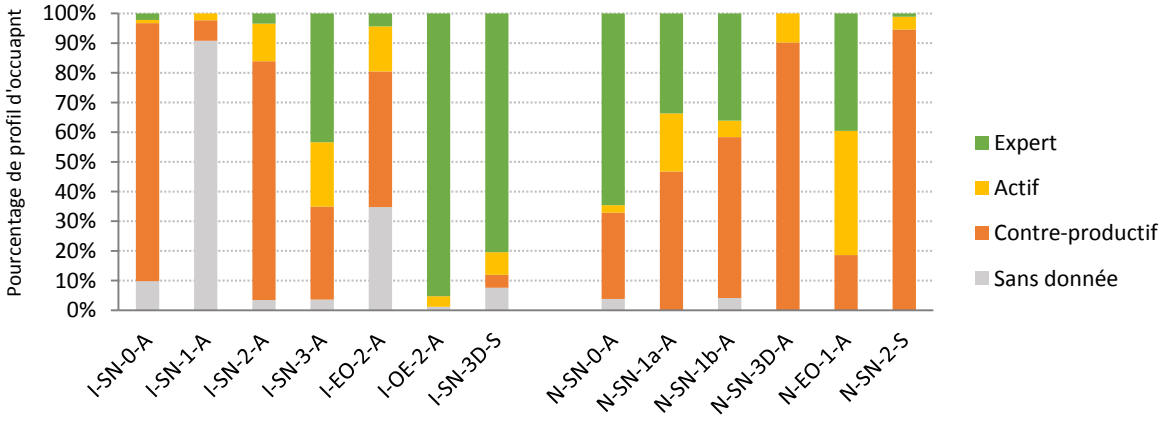


FIGURE 3.49 : *Pourcentage de profil d'occupant sur la période estivale*
de l'auteur

III.3. Analyse des actions et du confort en hiver

Par opposition à l'été et à la stratégie de refroidissement, la stratégie du chaud, développée par *(OLIVA et COURGEY, 2006)*, cherche à conserver les calories à l'intérieur du logement. Pour cela, il est important de capter les apports solaires gratuits, de les stocker pour les diffuser quand la température extérieure est faible et les distribuer dans tout le logement (*Figure 3.50*). Les ambiances thermiques des logements étudiés sont régulées par des thermostats d'ambiance. Nous avons vu une grande différence en termes de confort entre les deux résidences lors du *chapitre 3-I.2*. Dans la suite de l'analyse du confort en hiver nous nous intéressons aux trois jours successifs où la température extérieure est descendue en dessous de 5 °C (du 10 au 12 décembre 2014). C'est la nuit et au petit matin que l'on observe les températures les plus basses. En journée le maximum était de 13 °C.

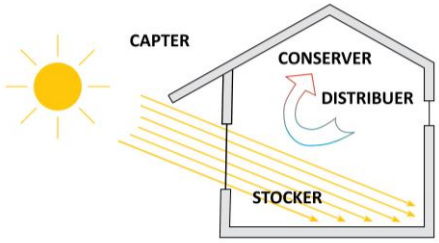


FIGURE 3.50 *: Stratégie du chaud*
de l'auteur

En hiver, nous constatons qu'au sein d'un même appartement, le confort peut fortement varier d'une journée à l'autre en fonction des heures de déclenchement du système de chauffage. Ainsi sur la *figure 3.52*, sur la *figure 3.53* et sur la *figure 3.54* on observe plusieurs points :

- Dans la résidence isolée :
  - On observe de fortes montées en température des appartements la nuit ce qui laisse supposer le déclenchement des chauffages (repéré en orange sur les graphiques).
  - Les locataires qui sont dans l'inconfort (I-SN-3-A et I-SN-3D-S) sont ceux dont le système de chauffage a le moins fonctionné.
- Dans la résidence non-isolée :
  - Deux locataires (N-SN-0-A et N-EO-1-A) n'ont semble-t-il pas déclenché leur chauffage sur la période étudiée.
  - Les locataires qui ont mis en route leur chauffage n'atteignent pas la zone de confort et restent dans la zone « inconfort léger ».

Comme nous l'avons précisé plus tôt, les locataires actionnent peu leur fenêtre et leur volet en hiver. On observe de plus sur les graphiques de la *figure 3.52*, de la *figure 3.53* et de la *figure 3.54* que les actions entreprises n'ont pas d'impact direct sur le confort.

- Le volet :
    - Chez la majorité des locataires il est laissé ouvert en journée afin de profiter des apports solaires.
    - Seul le locataire de l'appartement N-SN-0-A le laisse fermé. Suite à ce constat et au non déclenchement des radiateurs, on peut supposer que ce locataire était absent sur cette période.
    - Le locataire de l'appartement I-EO-2-A a son volet fermé le matin ce qui laisse supposer qu'il l'est toute la nuit.
    - Le locataire de l'appartement N-EO-1-A se protège à tous les moments de la journée. L'enquête *in situ* bimensuelle a révélé un sentiment d'être observé ce qui le conduit à fermer son volet en toute saison.

- La fenêtre :
    - Pour la majorité des locataires, elle est laissée fermée toute la journée
    - Dans la résidence isolée, les ouvertures ont lieux principalement le matin et sont inférieures à une heure. (I-SN-2-A, I-SN-3-A et I-SN-3D-S)
    - Le locataire de l'appartement I-EO-2-A l'ouvre de manière discontinue mais tout au long de la journée.
    - Dans la résidence non-isolée, les ouvertures sont plus longues et réparties dans la journée (N-SN-1b-A, N-SN-3D-A et N-SN-2-S).

On observe donc une variété des comportements. La *figure 3.51* montre les températures intérieures moyennes pendant les trois jours les plus froids en fonction des appartements ainsi que la zone de confort. Nous constatons que l'inconfort apparaît pour une température intérieure inférieure à 20 °C. Tous les appartements de la résidence non-isolée et trois dans celle qui est isolée n'atteignent pas cette température minimale pour assurer le confort.

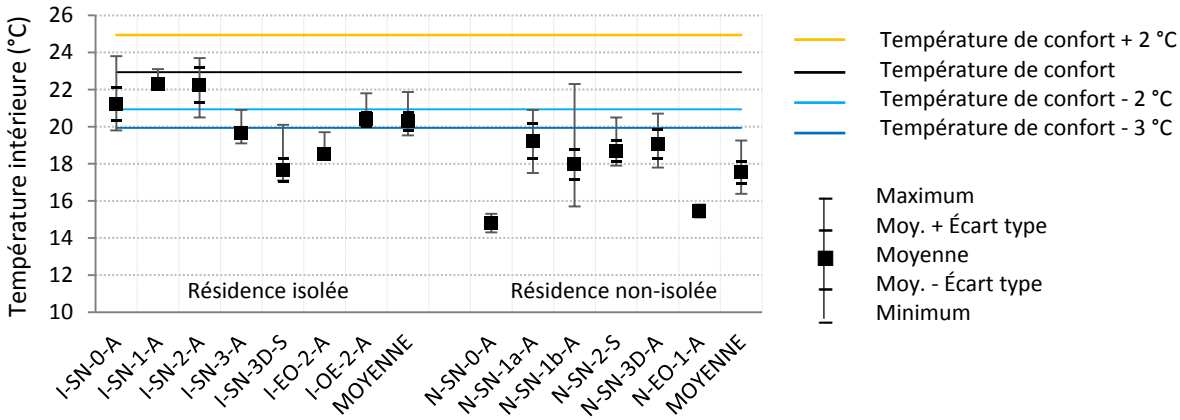


FIGURE 3.51 : *Température intérieure moyenne, maximale, minimale et écart-type en fonction des appartements*
de l'auteur

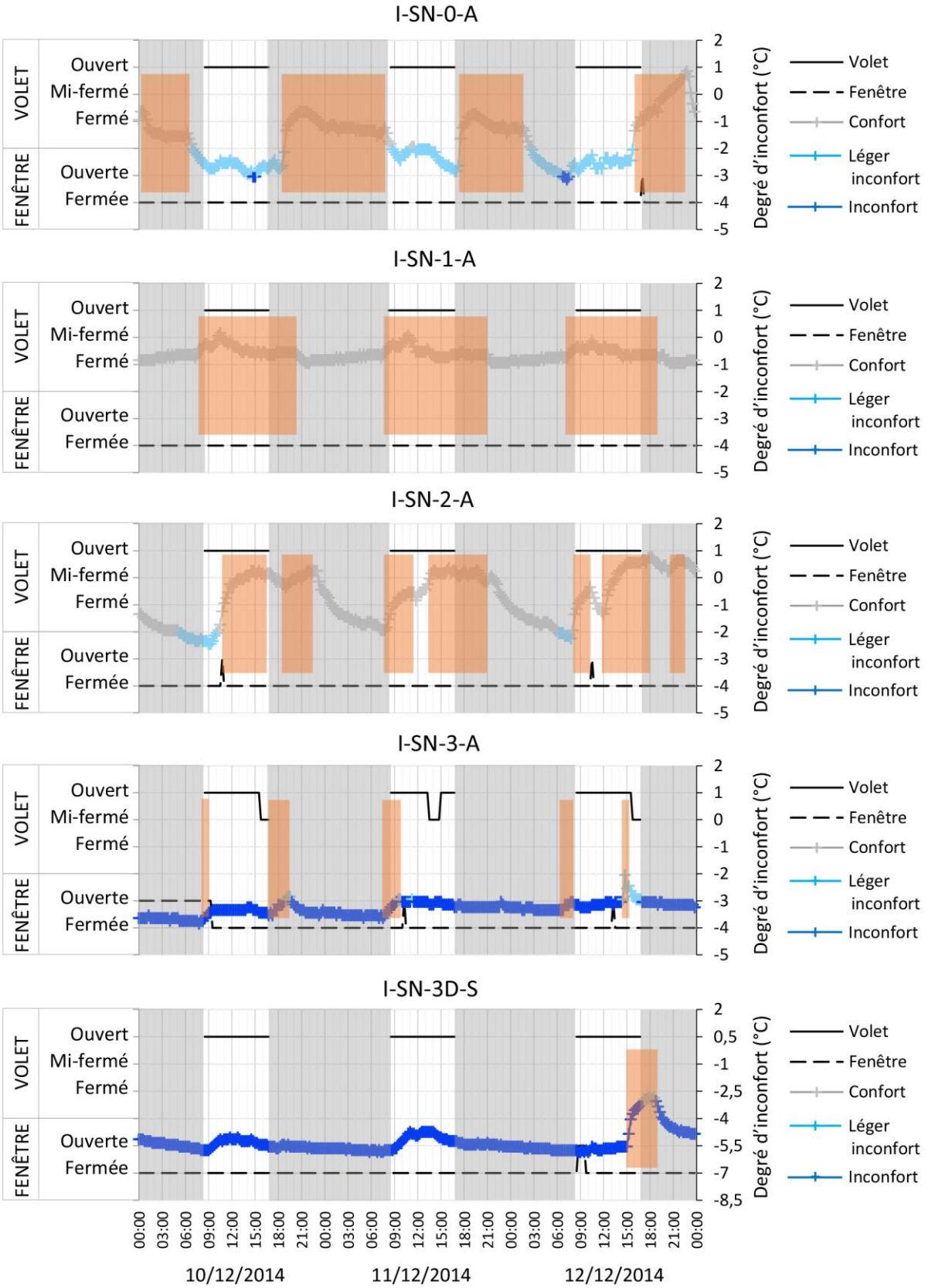


FIGURE 3.52 : *Position du volet et de la fenêtre pour les appartements dont les séjours sont orientés au **Sud** dans la **résidence isolée** en fonction des heures des **trois jours froids** de 2014 (du 10 au 12 décembre)*
de l'auteur

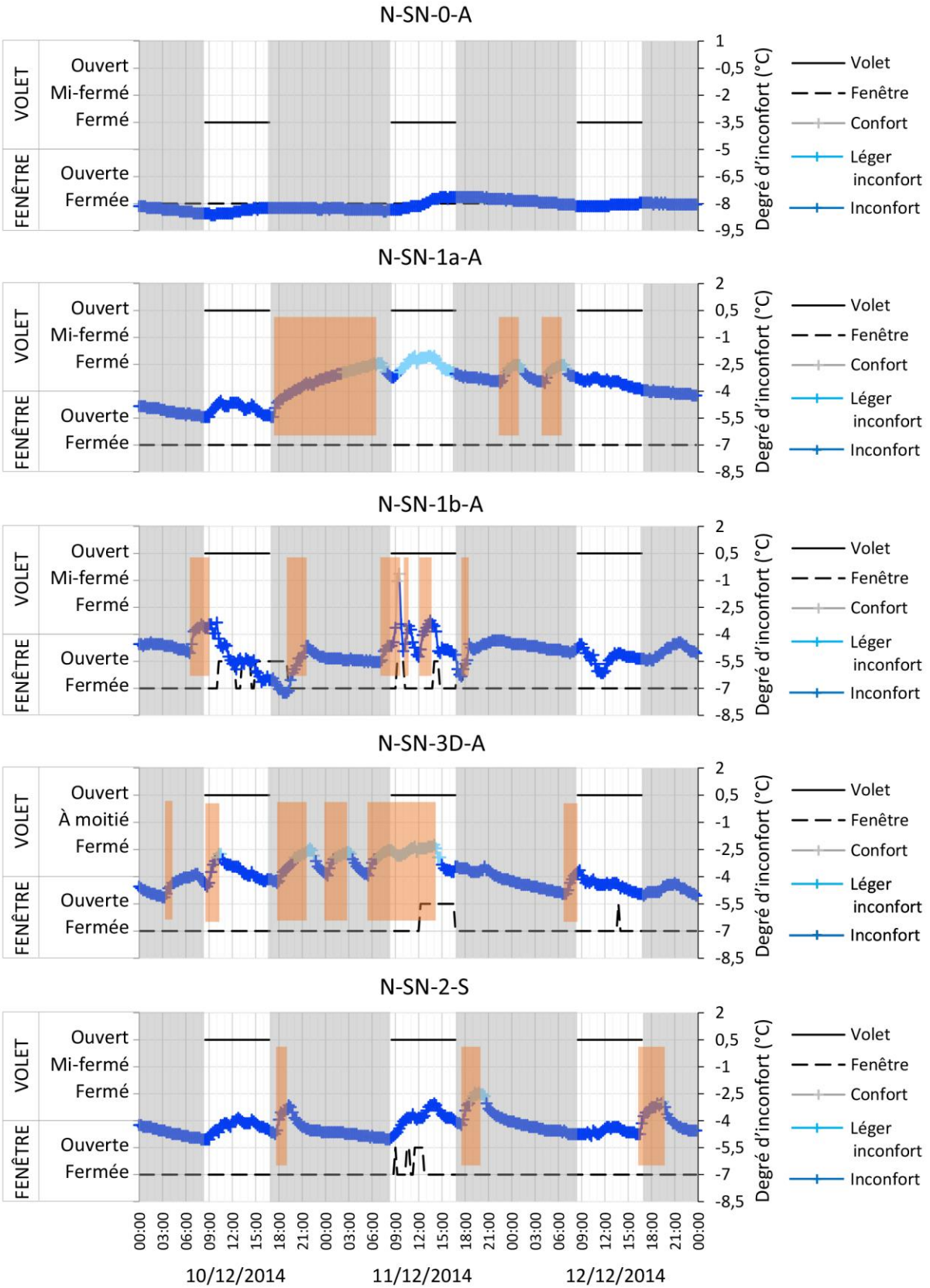


FIGURE 3.53 : *Position du volet et de la fenêtre pour les appartements dont les séjours sont orientés au **Sud** dans la **résidence non-isolée** en fonction des heures des **trois jours froids** de 2014 (du 10 au 12 décembre)*
de l'auteur

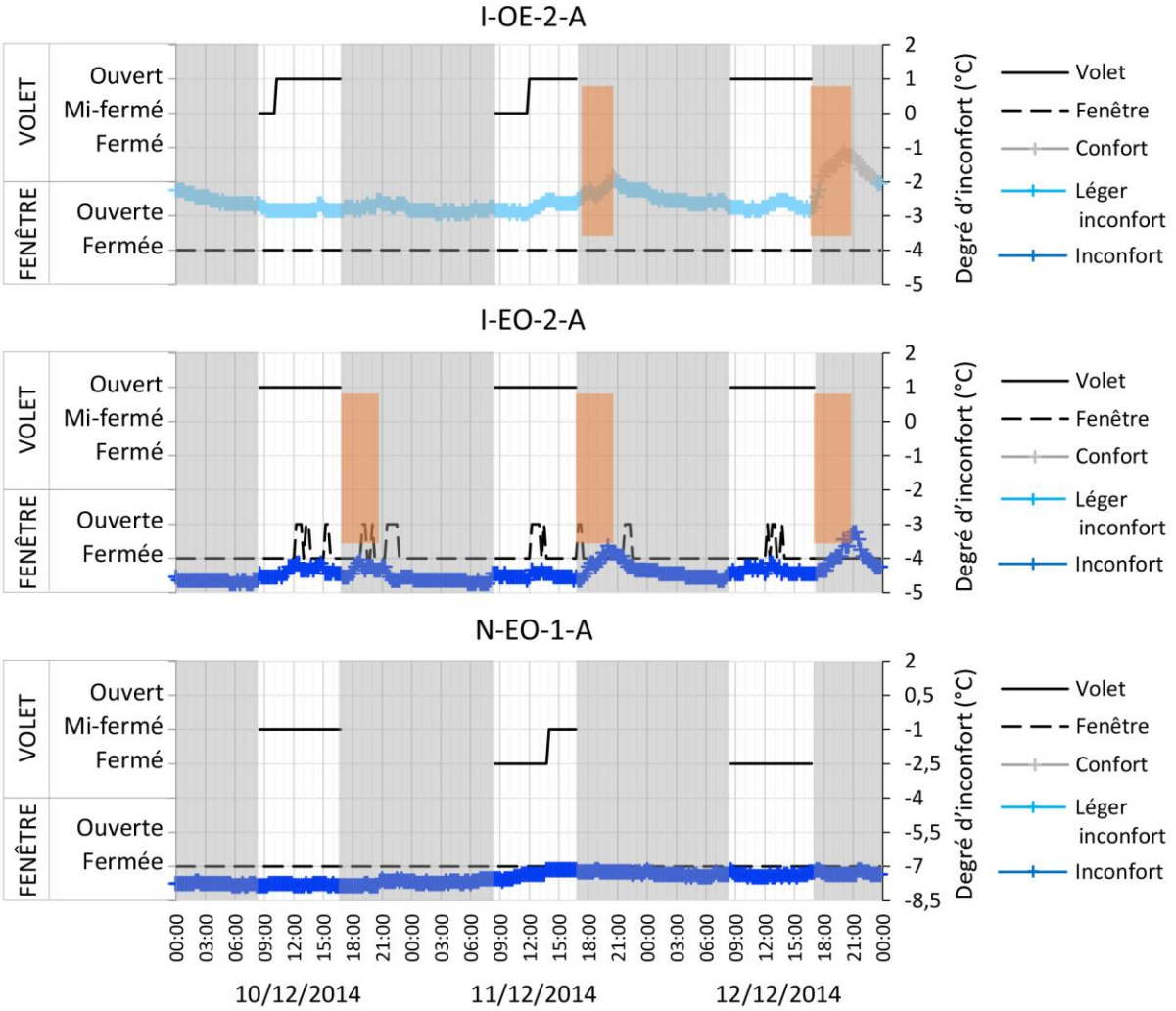


FIGURE 3.54 : *Position du volet et de la fenêtre pour les appartements dont les séjours sont orientés à l'**Ouest** puis à l'**Est** dans la **résidence isolée** puis dans la **résidence non-isolée** en fonction des heures des **trois jours froids** de 2014 (du 10 au 12 décembre)*
de l'auteur

Conclusion

L'instrumentation *in situ* que nous avons mise en place permet, d'une part, de comparer le confort et les consommations énergétiques et, d'autre part, d'étudier le comportement des occupants des logements.

L'analyse du confort et des consommations énergétiques montre que dans la résidence non-isolée, le confort d'hiver est très dégradé malgré une estimation des consommations de chauffage similaire à celle de la résidence isolée. Cependant, en été, nous n'observons pas de différence majeure entre les deux résidences contrairement à ce qui avait été déclaré lors du sondage. L'été 2014 a été particulièrement frais ce qui peut expliquer ces similitudes.

L'étude des usages de la fenêtre et du volet montre que leurs durées d'ouverture varient en fonction des saisons. Nous n'observons pas de relation directe entre un inconfort et une action. Dans l'habitat, une action peut avoir plusieurs origines : l'arrivée/le départ de l'occupant, une nuisance sonore extérieure, une nuisance olfactive intérieure, une habitude quotidienne ancrée dans une routine journalière, etc. ce qui complexifie l'analyse des comportements réels. Cependant, l'analyse des mesures a permis d'identifier huit typologies d'usage de la fenêtre et quatre pour le volet. Leur combinaison permet d'identifier trois profils d'occupant qui correspondent à des pratiques induisant plus ou moins d'inconfort. L'objectif n'est pas de juger les comportements mais d'identifier l'impact des actions face à certaines situations de confort/inconfort ou météorologiques. En effet, la réglementation thermique prévoit un unique usage de la fenêtre et du volet. Or cette analyse montre que ces comportements sont beaucoup plus aléatoires et peuvent conduire à de l'inconfort. Pour y remédier, une sensibilisation des locataires est nécessaire mais des solutions architecturales peuvent aider à pallier ces comportements.

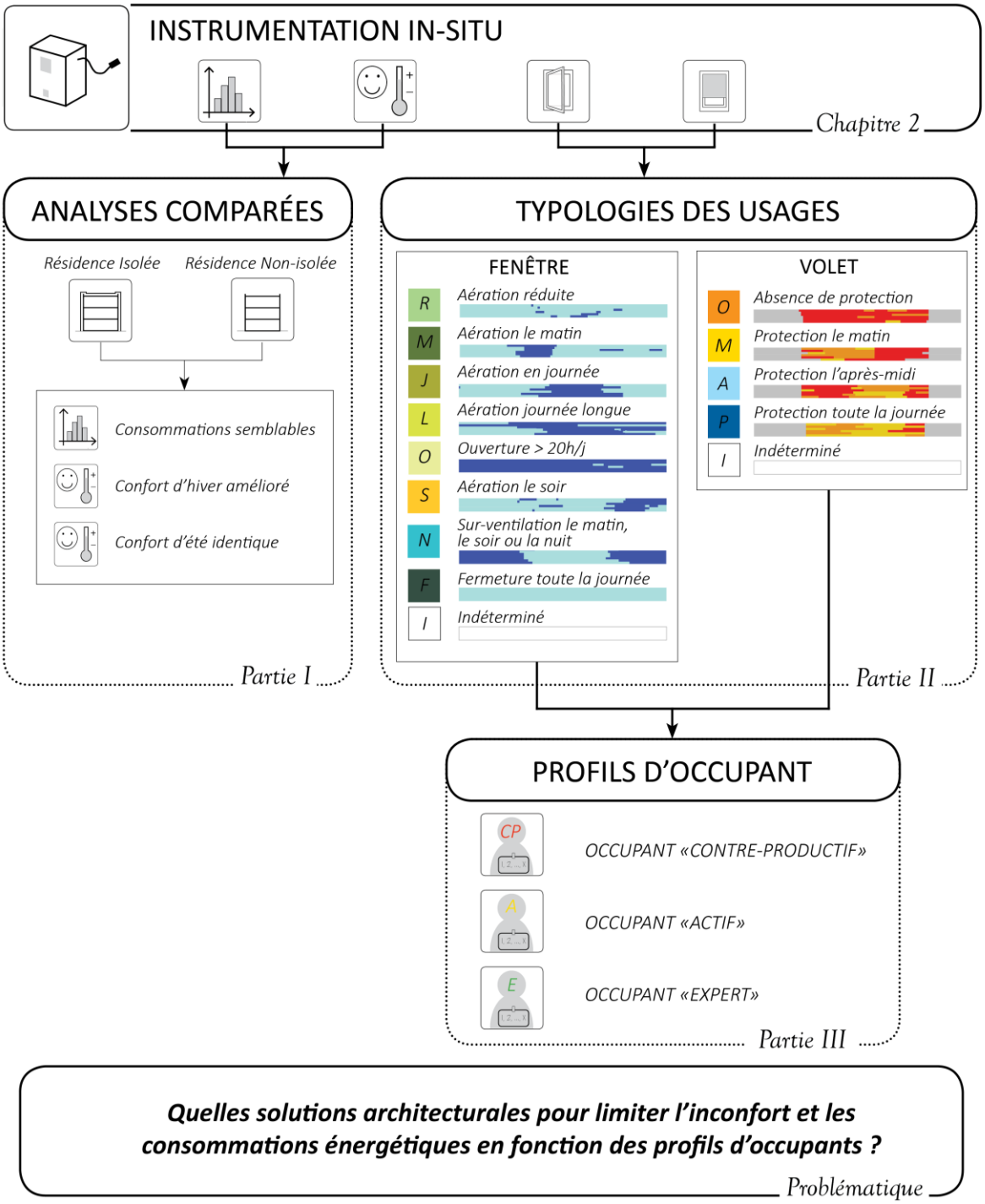


FIGURE 3.55 : *Schéma conclusion du chapitre 3*
de l'auteur

Chapitre 4 : SOLUTIONS ARCHITECTURALES D'AMÉLIORATION DU CONFORT AVEC DIMINUTION DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES

« L'architecture est une merveilleuse expression du processus de découverte.
C'est comme un scientifique qui ne connaît pas la réponse,
mais qui sait le chemin qui y mène.
C'est cela qui me fait agir : la joie du chemin, la découverte. »

Glenn Murcutt, Architecte, (1936-)
Exposition 'Architecture For Place' – Glenn Murcutt, Bruxelles, 2013

Introduction

La réglementation thermique se base sur un ensemble d'hypothèses communes permettant d'estimer le comportement thermique des bâtiments et de comparer leurs performances énergétiques. Pour cela, elle prévoit la modélisation des caractéristiques techniques des bâtiments, la définition de données météorologiques moyennes et des scénarios conventionnels de comportements se basant notamment sur un usage idéal de la fenêtre et du volet par les occupants. La difficulté de nombreux thermiciens est de pouvoir modéliser ces trois paramètres afin de réaliser des simulations de thermique dynamique donnant des résultats proches de la réalité et prenant en compte les usages conventionnels. L'objectif est donc de mettre en place un modèle comportemental reflétant la variabilité des comportements des individus en modifiant les hypothèses conventionnelles de la réglementation thermique pour obtenir des résultats plus représentatifs d'une réalité comportementale.

Au *chapitre 1* nous avons vu que le principal élément conduisant à un écart de consommation énergétique et de température au sein des logements était l'occupant. L'expérimentation menée au *chapitre 2* et son analyse au *chapitre 3* nous ont permis de mettre en évidence une forte variabilité des comportements des occupants. Nous avons ainsi décrit les différentes pratiques des locataires et identifié des profils d'occupant réels en fonction des saisons et des orientations des appartements. Ces définitions nous ont amené à concevoir un modèle comportemental pour la simulation de thermique dynamique. Prenant en compte les données d'un environnement réel (mesuré) il permet de proposer des solutions architecturales en vue d'améliorer et de quantifier le confort au sein des logements.

I. Création d'un modèle numérique

Par l'intermédiaire des outils de thermique dynamique, nous développons un modèle numérique basé sur les caractéristiques des appartements étudiés : le module-appartement. Il sert de base pour la prise en compte des comportements des locataires et la proposition de solutions architecturales de réduction de l'inconfort d'été palliant les comportements « contre-productifs » des occupants.

I.1. Outils de Simulation Thermique Dynamique (S.T.D.)

Dans le bâtiment, les logiciels de S.T.D. permettent d'estimer les consommations d'énergie et le confort des occupants en testant des ensembles de solutions architecturales et/ou technologiques suivant divers paramètres d'entrée. Avec la mise en place des nouvelles réglementations thermiques, ces logiciels deviennent de véritables outils d'aide à la décision indispensables pour les thermiciens et les concepteurs. Il existe une multitude de logiciels de thermique, adaptés au bâtiment, basés sur des modèles statiques ou dynamiques. Certains comme TRNSYS permettent l'ajout de modules complémentaires comme l'outil AdOCC (Adaptation de l'Occupant – Confort – Comportement) de *(MOUJALLED, 2007)*, qui propose une modélisation

dynamique du confort thermique ou OASys (Occupant Action System) réalisé par (BONTE, 2014) qui modélise le comportement des individus en fonction de leur sensation thermique (cf. Chapitre 1-III.2.1). D'autres logiciels sont eux basés sur une approche déterministe avec une définition préalable des scénarios d'usages comme : Pléiades+COMFIE, Clima-Win, Archiwizard, DesignBuilder, etc. Ils sont par ailleurs souvent utilisés par les professionnels du bâtiment.

Contrairement à (MOUJALLED, 2007) et (BONTE, 2014) qui proposent des modèles de comportement de l'individu testés pour des bâtiments de bureaux, nos mesures *in situ* ont été réalisées dans les séjours d'appartements réels et occupés. Nos mesures ne permettent pas de mettre en évidence une relation entre inconfort thermique et réaction comportementale (cf. Chapitre 3). Cependant, nous avons clairement identifié un ensemble de typologies d'usage de la fenêtre et du volet ayant des impacts différenciés sur le confort thermique des occupants. Ces typologies se matérialisent sous la forme de plusieurs scénarios déterministes. Leur répartition statistique en fonction des profils d'occupant permet de générer des scénarios représentatifs d'occupants réels. Dans ce but, nous avons choisi d'utiliser des logiciels avec une approche déterministe à savoir : Pléiades+COMFIE.

I.2. Une S.T.D, trois éléments à modéliser

Pléiades+COMFIE, distribué par Izuba énergies, est composé d'une interface utilisateur Pléiades et d'un moteur de calcul COMFIE. Ce dernier a été développé par le centre énergétique de l'école des Mines de Paris depuis les années 1990. L'ensemble permet de réaliser différentes analyses suivant les modules installés : concevoir des bâtiments bioclimatiques (module S.T.D.), vérifier les exigences réglementaires (module RT) ou dimensionner les systèmes de chauffage et de refroidissement (module dimensionnement). Le logiciel contient également un module aéraulique qui permet le calcul des débits d'air entre les pièces et l'extérieur grâce à la connaissance des caractéristiques du vent, de la perméabilité à l'air de l'enveloppe, de l'ouverture des menuiseries et de la définition des débits aux bouches d'entrée et d'extraction d'air (IZUBA ÉNERGIE, 2015).

Pour réaliser une S.T.D., Pléiades+COMFIE a besoin de trois catégories d'entrées principales : les caractéristiques architecturales et techniques du bâtiment, les données météorologiques annuelles au pas de temps horaire et les scénarios horaires d'usage (consignes de température, protections solaires, ouverture des fenêtres, puissance dissipée par les équipements, etc.) (Figure 4.1). Ces données permettent d'évaluer les consommations énergétiques du bâtiment ainsi que l'évolution des températures au pas de temps horaire sur l'année complète.

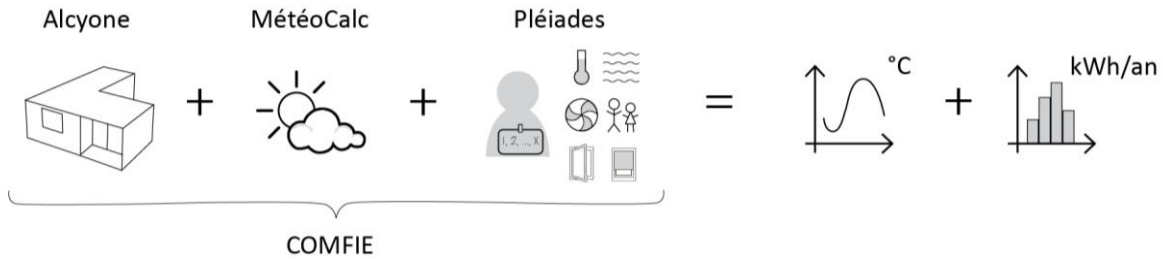


FIGURE 4.1 : *Schéma du fonctionnement de Pléiades+COMFIE*
de l'auteur

I.2.1. Le modèle constructif : le « module-appartement »

Les deux résidences étant à l'origine identiques (cf. *Chapitre 2-I.2*) mais ayant subi des rénovations différentes, deux modules-appartements aux plans identiques (afin d'être représentatifs des deux résidences) sont créés avec l'outil Alcyone. Cet outil permet la saisie graphique et l'affichage 3D des logements modélisés. Les mesures que nous avons réalisées concernent uniquement le séjour, par conséquent, nous ne connaissons pas les pratiques des occupants dans le reste de l'appartement. Le modèle est donc simplifié à une seule zone thermique composée de trois pièces repérées sur la *figure 4.2* : le séjour, l'entrée et la cuisine. En effet, lors de la visite bimensuelle des appartements, nous avons constaté que les portes séparant ces pièces avaient été soit enlevées, soit étaient constamment ouvertes alors que la porte donnant sur la partie nuit était le plus souvent fermée. Sur cette figure, sont également représentées, grâce à un jeu de couleurs, les parois ayant les mêmes compositions constructives. L'étude des archives de la construction des résidences ainsi que la consultation des bailleurs sociaux nous ont permis d'identifier les rénovations entreprises depuis la construction et de connaître les caractéristiques constructives des deux résidences (cf. *Chapitre 2-I.2* et *tableau 4.1* pour la définition des résistances thermiques attribuées à chaque paroi du modèle). Les parois en contact avec d'autres appartements ou avec le reste de l'appartement (murs, planchers, plafonds) sont considérées comme adiabatiques. Le Ubât de la résidence isolée (calculé à partir des hypothèses constructives) est de 1,5 W/(m².K) et de 2,7 W/(m².K) pour la résidence non-isolée (cf. *[Éq. 1.1]* pour le détail du calcul du Ubât). Pour les appartements en rez-de-chaussée, le plancher (à la différence d'un étage courant) est considéré comme en contact avec un vide sanitaire. Quant aux logements situés au dernier étage, leurs plafonds isolés sont définis comme en contact avec l'extérieur. Dans le module représentatif de la résidence non-isolée, les ponts thermiques sont choisis dans la bibliothèque Th U-ex et dans la bibliothèque Th-Bât de la RT 2012 pour la résidence isolée. Dans les deux cas 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 la moyenne annuelle des mesures réalisées *in situ* (cf. *Chapitre 3-I.3.1*).

Ce modèle constructif comporte plusieurs limites. En effet, 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 nous sommes donc basés sur des hypothèses prenant en compte les valeurs conventionnelles. Pour finir, nous n'avons modélisé qu'une seule zone thermique, or, dans un même appartement, les échanges avec les pièces de nuit (dont les scénarios d'usages diffèrent de ceux des pièces de jour) peuvent être importants. Nos données ne nous permettant pas d'obtenir un modèle complet prenant en compte les apports (ou les déperditions) des pièces voisines, la simplification à une seule zone thermique nous a alors paru nécessaire. Ces limites ne remettent cependant pas (ou peu) en cause les résultats obtenus dans la mesure où nos différents modèles (météorologiques ou comportementaux) sont comparés entre eux.

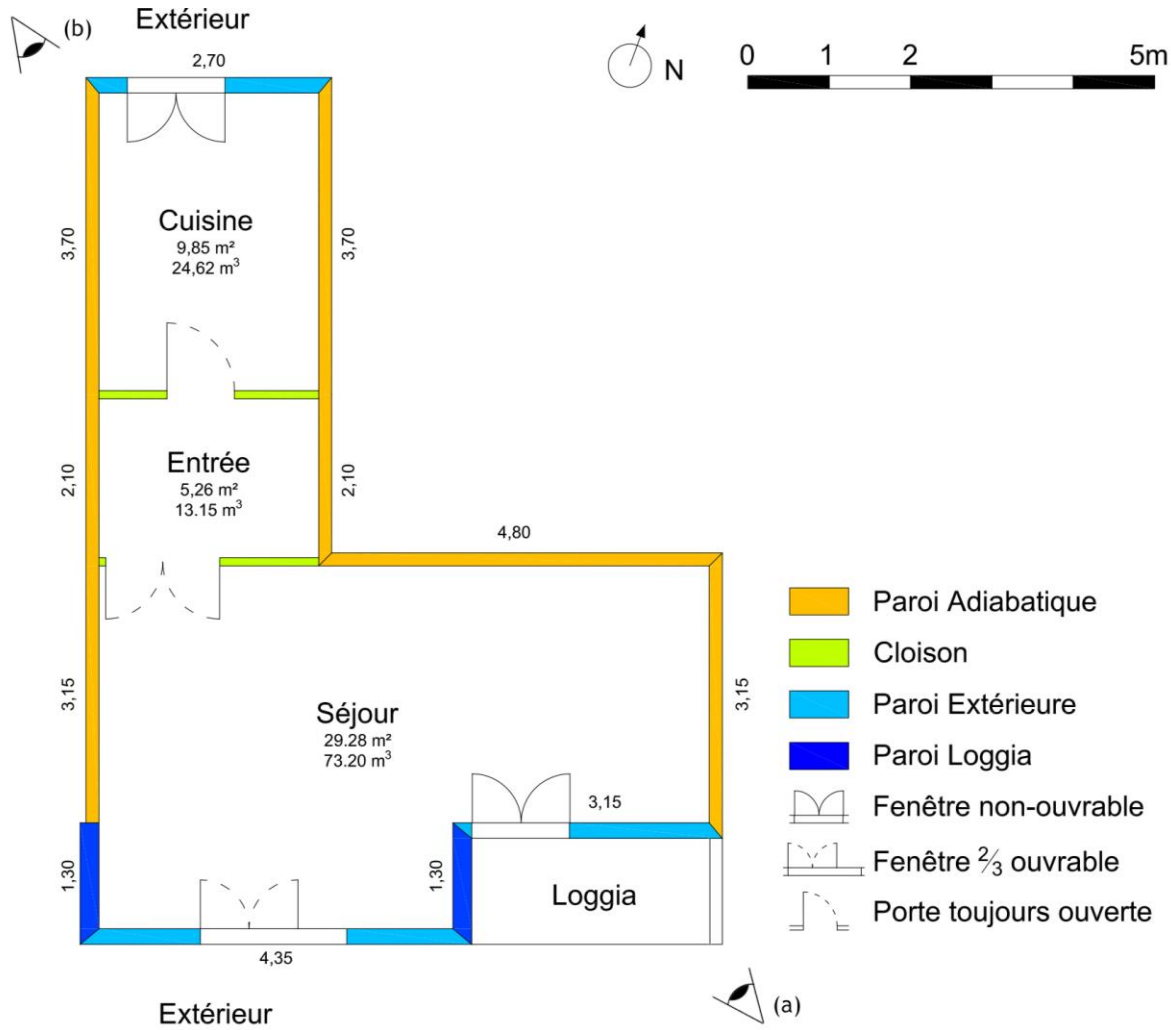
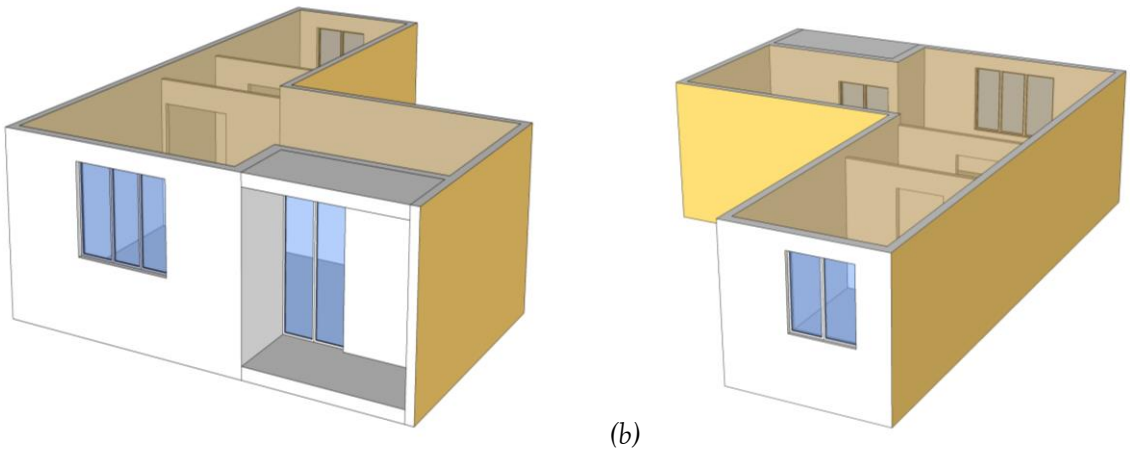


FIGURE 4.2 : *Identification des typologies des parois et des ouvertures sur le plan du « module-appartement » utilisé pour les simulations et repérage des vues 3D de la* figure 4.3 *de l'auteur*



(a) *(b)*

FIGURE 4.3 : *Modélisation 3D du module-appartement (a) façade exposée du séjour (Sud, Est ou Ouest) et (b) façade opposée correspondant à la cuisine (en jaune, parois considérées comme adiabatiques)*
de l'auteur

	Composition	Matériau	Épaisseur (cm)	Résistance thermique ($m^2.K.W^{-1}$)	
Résidence Isolée	Paroi extérieure	Béton armé	8,0	0,05	2,92
		Polystyrène expansé	3,0	0,77	
		Béton armé	8,0	0,05	
		Polystyrène expansé	8,0	2,05	
		Enduit	0,5	0,00	
	Toiture terrasse	Sable et gravier	4,0	0,02	3,58
		Polystyrène extrudé	10,0	3,45	
		Béton armé	20,0	0,11	
	Paroi loggia	Béton armé	16,0	0,09	2.96
		Polystyrène expansé	3,0	0,77	
		Béton armé	8,0	0,05	
		Polystyrène expansé	8,0	2,05	
		Enduit	0,5	0,00	
Résidence Non-isolée	Paroi extérieure	Béton armé	8,0	0,05	0,87 + pont thermique intégré (nervure du panneau sandwich)
		Polystyrène expansé	3,0	0,77	
		Béton armé	8,0	0,05	
	Toiture terrasse	Sable et gravier	4,0	0,02	1,85
		Polystyrène expansé	5,0	1,72	
		Béton armé	20,0	0,11	
	Paroi loggia	Béton armé	16,0	0,09	0,91
		Polystyrène expansé	3,0	0,77	
		Béton armé	8,0	0,05	
Commun aux deux résidences	Paroi adiabatique	Béton armé	16,0	0,09	0,09
	Cloison	Béton armé	5,0	0,03	0,03
	Plancher adiabatique	Béton armé	19,0	0,11	0,11
	Plancher RDC	Béton armé	19,0	0,11	1,39
		Polystyrène expansé	5,0	1,28	

TABLEAU 4.1 : *Compositions des différentes parois du modèle de l'auteur*

I.2.2. Le modèle météorologique

Au *chapitre 2-I.3*, nous avons identifié la station météorologique de Nîmes-Courbessac comme la plus représentative du site d'étude. Grâce à l'utilitaire MétéoCalc, nous implémentons les données de 2014 (année avec un été frais) et de 2015 (année avec un été chaud) dans Pléiades+COMFIE. Ces données météorologiques sont utilisées pour les différentes simulations.

Comme pour le modèle architectural, le modèle météorologique comporte également des limites. En effet, le site d'étude est situé au cœur d'un tissu urbain alors que les données météorologiques sont issues d'une station située à 22,8 km du site d'étude dans une zone de campagne. Nous ne prenons en compte ni les effets de site, ni l'ilot de chaleur urbain, ni la rugosité du paysage. Cependant, les mêmes données sont appliquées à chacune des simulations ce qui permet d'en confronter les résultats obtenus.

I.2.3. Les scénarios d'usages

Nous appelons scénarios d'usages l'ensemble des éléments qui permettent de définir la présence et les actions des occupants au sein d'un logement à savoir : l'occupation, la consigne de température, les apports internes et la gestion des volets et celle des fenêtres. Les scénarios d'usages sont définis au pas de temps horaire sur toute l'année et peuvent être importés dans la bibliothèque de Pléiades à partir d'un fichier texte. Nous définissons ainsi plusieurs types de scénarios dont les données et les hypothèses les accompagnant seront détaillées dans la partie suivante :

- Les **scénarios réels** : issus des pratiques réelles mesurées *in situ* avec l'utilisation des données météorologiques réelles de 2014,
- Les **scénarios RT** : issus de la réglementation mais avec l'utilisation des données météorologiques réelles de 2014,
- Les **scénarios conventionnels** : issus de la réglementation mais avec l'utilisation des données météorologiques réglementaires,
- Les **scénarios comportementaux** : définis grâce à notre modèle comportemental qui est développé dans la suite de l'étude (cf. *Chapitre 4-II.3*) avec l'utilisation des données météorologiques réelles de 2014.

II. Simulations et scénarios d'usages

Le paragraphe précédent permet de déterminer les modèles constructifs et météorologiques. Ces deux éléments étant fixés (malgré leurs limites respectives), nous pouvons simuler différents scénarios d'usages afin de comprendre les implications thermiques des actions des occupants. Au cours de cette partie, trois types de scénarios d'usages sont testés afin de comparer les résultats des simulations aux données de température et de consommations énergétiques mesurées *in situ*. Dans un premier temps, la réalisation des simulations avec les scénarios issus des comportements réels permet de valider le modèle constructif ainsi que les pourcentages d'ouverture/fermeture de la fenêtre et du volet. Dans un deuxième temps, les simulations avec les scénarios conventionnels permettent de mettre en évidence les écarts de température et de consommations énergétiques entre les résultats des simulations et la réalité. Pour finir un modèle comportemental est créé afin de proposer des scénarios plus réalistes à intégrer dans les simulations, voire dans les hypothèses d'une future réglementation thermique.

II.1. Scénarios issus des comportements réels

Les mesures réalisées *in situ* et les données recueillies lors des entretiens bimensuels permettent de définir des scénarios basés sur les comportements réels. La réalisation de simulations avec ces scénarios a pour objectif d'obtenir des résultats au plus proche d'une réalité mesurée afin de valider le modèle.

II.1.1. **Les scénarios réels**

Afin de valider la définition du module-appartement, nous avons pu, grâce à nos visites *in situ* et à nos mesures, déterminer des scénarios dont les données reflètent la réalité mesurée. Définis au pas de temps horaire pour chaque appartement, ils sont nommés « scénarios réels » au cours de l'étude.

II.1.1.1. L'occupation

Les appartements ont été choisis de manière à ce qu'ils soient occupés toute la journée par au moins une personne (femme/homme au foyer, retraité, sans-emploi, etc…). Nous considèrerons donc qu'il y a une personne entre 8 h et 22 h dans le séjour. Certains appartements dont le taux d'occupation global est plus élevé ont deux occupants (N-SN-1b-A, N-SN-3D-A et I-SN-3-A) voire trois (N-SN-1a-A et I-OE-2-A) sur la même plage horaire.

II.1.1.2. Consigne de température

Les radiateurs ne sont allumés que pendant la période hivernale soit du 1er novembre au 31 mars. Nous avons fixé la consigne de température égale à celle mesurée afin d'obtenir le besoin de chauffage. La puissance pour atteindre ces températures est considérée comme illimitée.

II.1.1.3. Apports internes dus aux équipements

Les apports internes dus aux équipements peuvent varier entre les appartements en fonction du niveau d'équipement des ménages et de l'utilisation qui en est faite. Ne disposant pas d'informations détaillées concernant chacun des appartements, nous définissons, par similitude aux scénarios conventionnels de la RT 2012, deux niveaux d'apports internes : 1,14 W/m² lorsque le module-appartement est inoccupé et 5,7 W/m² lorsqu'il est occupé.

II.1.1.4. Gestion des volets

Nous avons défini au cours du chapitre précédent, trois positions du volet : ouvert, demi-fermé et fermé. Ces données sont alors traduites en pourcentages d'occultation.

Position du volet	Pourcentage d'occultation
Ouvert	0 %
Demi-fermé	50 %
Fermé	100 %
Nuit	50 %

TABLEAU 4.2 : *Définition des pourcentages d'occultation en fonction de la position du volet de l'auteur*

II.1.1.5. Gestion des fenêtres

Ayant mesuré l'ouverture de la fenêtre principale du séjour, nous définissons les plages horaires d'ouverture et de fermeture de la fenêtre. Cependant, nous ne connaissons pas le

pourcentage réel d'ouverture de cette fenêtre. En effet entre une fenêtre ouverte en grand ou entrouverte, le taux de renouvellement d'air est différent. De même, la présence d'un volet peut également réduire les échanges entre l'intérieur et l'extérieur de manière significative. Les fenêtres étudiées sont composées de trois vantaux : deux avec une ouverture à la française et un fixe. Une ouverture « à la française » est caractérisée par un taux d'ouverture de 80 % selon les données de la RT 2012. Le *tableau 4.3* présente donc les pourcentages d'ouverture correspondant à la baie étudiée en fonction de la position du volet.

Fenêtre	Volet	Pourcentage d'ouverture
Ouverte	Ouvert	53 %
	Demi-fermé	25 %
	Fermé	10 %

TABLEAU 4.3 : *Définition des pourcentages d'ouverture de la fenêtre*
de l'auteur

II.1.2. Validation du modèle architectural

La simulation de thermique dynamique est réalisée avec le module-appartement précédemment défini, les données météorologiques de Nîmes-Courbessac de 2014 présentées au *chapitre 2-I.3* et les scénarios basés sur les comportements réels détaillés au *paragraphe I.2.2 de ce chapitre*.

II.1.2.1. En été

Les bâtiments étudiés ne sont pas climatisés, seules les températures intérieures peuvent donc être comparées. Pendant la période estivale (entre juin et août), les résultats de la simulation du module-appartement, avec les scénarios réels définis précédemment et la météo réelle de 2014 issue des données de Nîmes-Courbessac, montre une bonne corrélation avec les mesures *in situ*, réalisées dans les séjours des appartements. En effet, la *figure 4.4*, montre que la moyenne des écarts de température entre la simulation et les mesures est très proche de 0 °C (entre -0,4 °C et +0,4 °C dans la résidence isolée et -0,7 °C et +0,3 °C dans la résidence non isolée). Seul l'appartement I-SN-0-A a des écarts importants mais cela est dû à la présence du luminaire dont nous avons parlé précédemment. En ce qui concerne les autres appartements, l'écart-type très faible, compris entre 0,4 °C et 1 °C, valide la corrélation des données. Cependant, les écarts maximum et minimum oscillent entre 1,7 °C et 3,7 °C. Ce qui montre tout de même des écarts importants à certaines heures sur la période estivale qui peuvent être expliqués par la mise en place de nos scénarios. En effet, ils sont basés sur les comportements réels et sont définis sur un jeu d'hypothèses constantes qui peuvent, dans la réalité, être modulées (le nombre d'occupants ou le pourcentage d'ouverture/fermeture de la fenêtre ou du volet peuvent, par exemple, varier au cours d'une journée). Cependant, ces écarts faibles nous permettent de valider d'une part les caractéristiques architecturales et techniques du module-appartement et d'autre part les pourcentages d'ouverture/fermeture de la fenêtre et du volet pour la suite de l'étude.

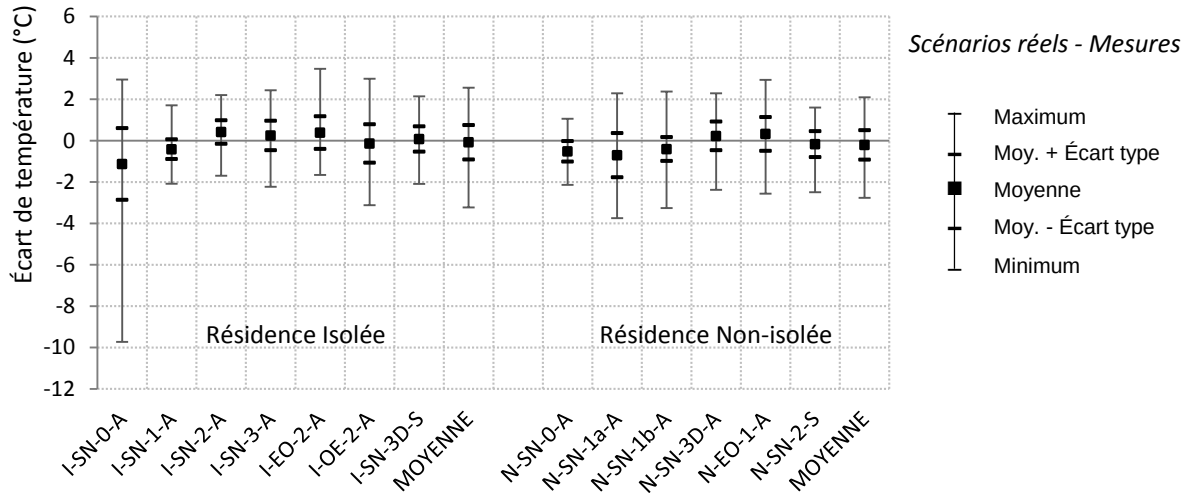


FIGURE 4.4 : *Maximum, moyenne, écart type et minimum des écarts de températures intérieures entre les simulations réalisées avec les* ***scénarios issus des comportements réels*** *et la* ***météo réelle*** *et les mesures* ***en été 2014*** *dans les deux résidences*
de l'auteur

II.1.2.2. En hiver

En hiver, nous pouvons comparer deux paramètres : les températures et les consommations de chauffage. D'après le *paragraphe II.1.1.2 de ce chapitre*, la consigne de température a été définie comme égale à celle que nous avons mesurée *in situ*. En conséquence, les écarts entre les températures issues de la simulation et celles mesurées *in situ* sont très faibles. On observe cependant, sur la *figure 4.5*, des écarts maximums importants. Les simulations semblent surestimer les températures (en moyenne +1 °C dans la résidence isolée et +0,7 °C dans la résidence non-isolée). L'analyse montre que l'inertie du bâtiment couplée avec les apports solaires fait augmenter la température intérieure du logement. Or lors de la simulation, les températures étant fixées, ces apports extérieurs induisent une augmentation momentanée des températures. La stabilisation pour retrouver les températures consignes se fait alors aux pas de temps suivants.

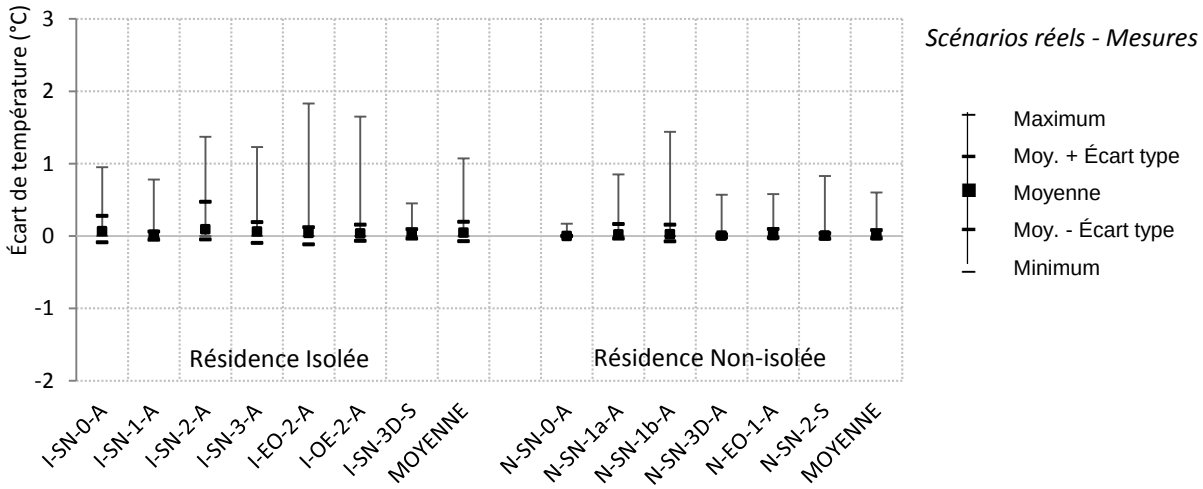


FIGURE 4.5 : *Maximum, moyenne, écart type et minimum des écarts de températures intérieures entre les simulations réalisées avec les* ***scénarios issus des comportements réels*** *et la* ***météo réelle*** *et les mesures* ***en hiver 2014*** *dans les deux résidences*
de l'auteur

Sur la *figure 4.6*, nous comparons les estimations des consommations de chauffage (issues de la mesure de la consommation de gaz) et les besoins de chauffage simulés entre les mois d'octobre et décembre 2014. Nous analysons uniquement cette période car en début d'année les mesures de température ont été partielles. Les simulations ne prennent pas en compte les systèmes car même si les chaudières ont été changées, les radiateurs sont d'origine. Il est alors difficile de déterminer avec assez de précision les caractéristiques des différents systèmes. L'analyse des consommations de chauffage, montre des écarts importants entre les mesures et les simulations. Cela peut être expliqué par les différentes limites du modèle constructif (cf. *Chapitre 4-I.2.1*) mais également par le fait que nous n'avons pas mesuré les températures dans les pièces de nuit, or les consommations de chauffage relevées intègrent le chauffage dans ces pièces. Dans les deux cas les consommations/besoins sont rapportés à la surface étudiée mais cela ne suffit pas à obtenir une bonne corrélation entre les résultats des simulations et les mesures.

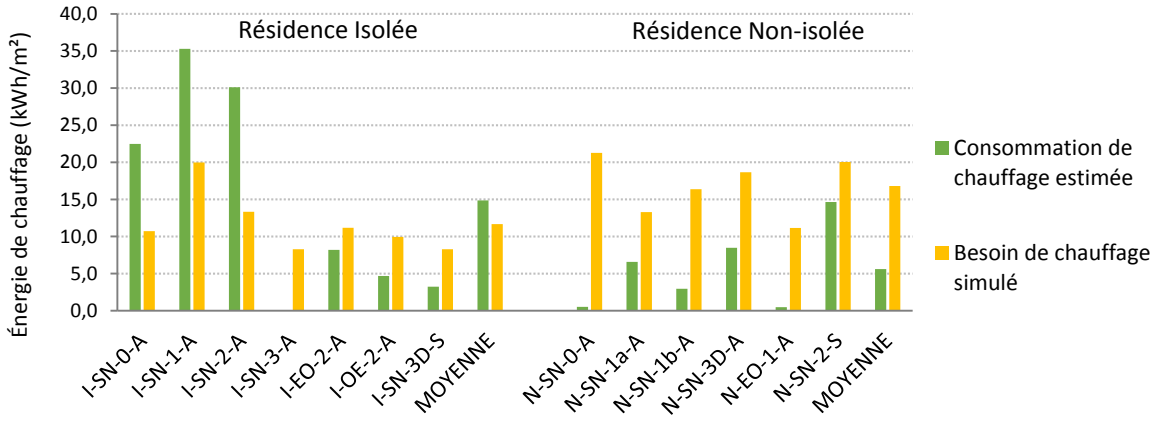


FIGURE 4.6 : *Consommation de chauffage estimée et besoin simulé avec les* ***scénarios issus des comportements réels*** *et la* ***météo réelle de 2014*** *dans les deux résidences* ***entre octobre et décembre***
de l'auteur

Au vu des hypothèses incertaines qui nous conduisent à ces écarts importants entre les mesures et les simulations de consommation de chauffage, nous définissons, pour la suite de l'étude, une consigne de température fixée à la limite basse de température de confort ($T_{C\text{-}3}$). L'objectif étant d'avoir une référence pour qu'on puisse estimer l'amélioration ou la dégradation du besoin de chauffage en fonction des solutions architecturales proposées. L'analyse de la *figure 4.7* montre que pour atteindre cette température de référence, les besoins annuels (en jaune) varient d'un appartement à l'autre en fonction de l'usage différencié de la fenêtre et du volet par chaque locataire. Cependant, contrairement à la moyenne des consommations de chauffage estimée qui est similaire dans les deux résidences (en vert sur le graphique et évoqué au *chapitre 3-I.1*), lors des simulations, les besoins de chauffage annuels sont plus importants dans la résidence non-isolée (52,2 kWh/(m².an) en moyenne) que dans la résidence isolée (30,9 kWh/(m².an) en moyenne) ce qui s'explique par les différences des caractéristiques thermiques définies pour les deux modules-appartements.

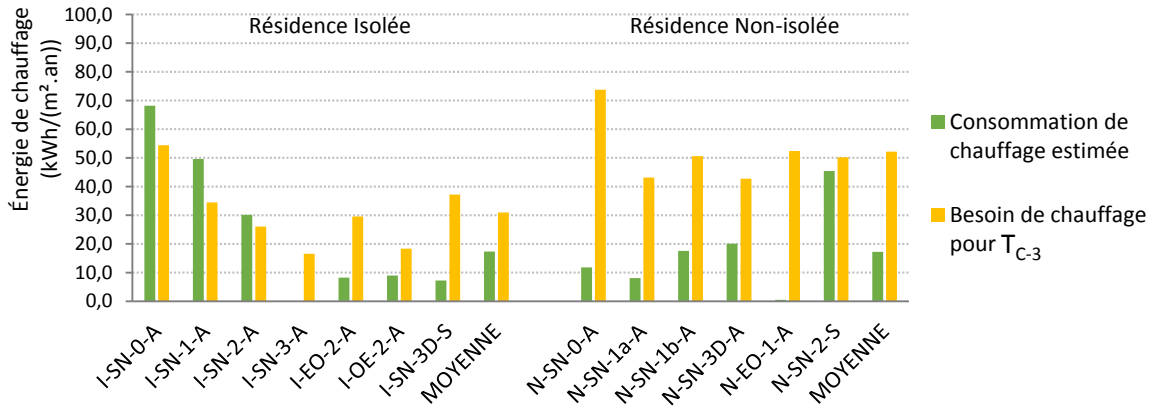


FIGURE 4.7 : *Consommation de chauffage estimée et besoin de chauffage simulé avec les* ***scénarios issus des comportements réels, une consigne de température à*** T_{C-3} *et la* ***météo réelle*** *dans les deux résidences* ***sur l'année 2014***
de l'auteur

II.2. Scénarios conventionnels de la RT 2012

La réglementation thermique 2012 se base sur un ensemble de scénarios prenant en compte un individu idéal. Or, nous avons vu, lors du chapitre précédent (cf. *Chapitre 3-II*), qu'il existe une variété de typologies d'usages de la fenêtre et du volet par les occupants et que ces comportements ne sont pas toujours idéaux. Si pour le volet nous avons pu réduire les typologies de comportement à quatre grands types, pour les fenêtres au contraire nous en obtenons huit. La combinaison de ces deux types de pratiques nous conduit à 32 typologies de comportement possibles. Or la réglementation thermique 2012 prévoit des scénarios réduits, détaillés dans le paragraphe suivant.

II.2.1. Les scénarios de la RT 2012

L'ensemble des scénarios réglementaires sont définis dans l'« *annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012* » *(C.S.T.B., 2011)* soit par l'intermédiaire de tableaux définissant au pas de temps horaire les caractéristiques du paramètre étudié ou par des algorithmes. Nous présentons ici les éléments correspondant à notre cas d'étude, à savoir le séjour d'un appartement d'une résidence de logements collectifs.

II.2.1.1. L'occupation

Pour définir l'occupation conventionnelle des locaux, les scénarios réglementaires se basent sur la définition d'un nombre d'adulte équivalent. Les apports de chaleur différenciés entre les adultes et les enfants ou un individu en activité ou au repos sont ainsi pris en compte. D'après les équations fournies par la méthode de calcul Th-BCE, il est fixé, ici, à 1,6 adulte équivalent (avec une production de 90 W/occupant). Dans le cadre des logements collectifs, un taux de présence hebdomadaire lui est appliqué (cf. *tableau 4.4*). La semaine type décrite ci-dessous est répétée toute l'année et deux périodes d'inoccupation sont prévues : quinze jours en août et sept fin décembre.

En semaine	
22 h à 6 h	70 %
6 h à 10 h 18 h à 22 h et 14 h à 22 le mercredi	100 %
Reste du temps	0 %

Le week-end	
22 h à 6 h	70 %
Reste du temps	100 %

TABLEAU 4.4 : *Pourcentage d'adulte équivalent en fonction des heures de la semaine de l'auteur*

II.2.1.2. Consigne de température

Les consignes de température sont liées aux scénarios de présence. En effet, si le logement est occupé, la consigne de température est fixée à 19 °C. S'il est inoccupé, elle est fixée à 16 °C et si l'inoccupation dépasse 48 h, elle est de 7 °C. L'arrêt des systèmes de chauffage est effectué lors du changement de saison défini par la méthode de calcul.

II.2.1.3. Apports internes dus aux équipements

Le taux d'équipement des ménages en termes d'électroménagers, de hifi, etc. mais surtout leur utilisation plus ou moins prolongée, a un impact sur les apports internes et en conséquence sur les besoins de chauffage ou de rafraîchissement. La réglementation thermique définit une puissance dissipée (due à la cuisson, l'audiovisuel, l'informatique, le lavage, le froid et les appareils ménagers) au pas de temps horaire. Elle fait ainsi la distinction entre les équipements dont le fonctionnement est permanent (réfrigérateur, mises en veille, etc.) et ceux qui ne sont utilisés que pendant les heures de présence. Ainsi lorsque l'appartement est occupé à 100 %, les apports internes sont estimés à 5,7 W/m² et 1,14 W/m² lorsque l'occupation est réduite ou nulle.

II.2.1.4. Gestion des protections solaires mobiles

La gestion des protections solaires mobiles est basée sur des hypothèses tenant en compte :

- de la saison (hiver, demi-saison, été)
- de l'heure de la journée (jour ou nuit)
- de l'occupation du local
- de la présence ou non d'une deuxième protection solaire
- du type de gestion (manuelle, automatique, motorisée, non-motorisée)
- de l'éclairement du local
- de la température opérative maximale du jour précédent

Dans les deux résidences étudiées, les volets sont à commande manuelle. Cependant dans la résidence isolée, ils sont motorisés alors que dans la non-isolée, ils sont non-motorisés. D'après la réglementation, d'une façon générale, à partir d'une valeur seuil, l'occultation est proportionnelle à l'éclairement reçu par la baie. N'ayant pas accès aux données d'éclairement et devant profiter des apports solaires en hiver et s'en protéger en été, nous considérons, pour le scénario d'occultation, les valeurs du *tableau 4.5*.

		Résidence isolée (motorisé)		Résidence non-isolée (non motorisé)	
		Jour	Nuit	Jour	Nuit
Occupé	Hiver Demi-saison	10 %	90 %	15 %	80 %
	Été	100 %	90 %	100 %	80 %
Non-occupé	Hiver Demi-saison	10 %	80 %	20 %	70 %
	Été	100 %	80 %	100 %	70 %

TABLEAU 4.5 : *Pourcentage d'occultation des baies selon les scénarios conventionnels de la RT 2012*
de l'auteur

II.2.1.5. Gestion des fenêtres

Dans le cadre de la RT 2012, les fenêtres sont définies comme fermées toute l'année. Cependant, si aucun système de refroidissement n'est prévu dans le bâtiment, les fenêtres peuvent être ouvertes uniquement dans le cas d'un rafraîchissement passif comme indiqué par (C.S.T.B., 2011) *« La sur-ventilation par ouverture des baies est une méthode de refroidissement passive, qui consiste à faire circuler de l'air frais en provenance de l'extérieur dans le groupe. Les débits d'air frais entrant sont directement liés au ratio d'ouverture des baies, qui est piloté selon un mode de gestion : soit automatique [...] – soit manuel [...].* ». Il est également précisé que : « *L'ouverture des baies est gérée indépendamment des protections mobiles* ». Or nous avons vu précédemment que la mise en place des protections solaires engendre des taux de ventilation différents en fonction du taux d'occultation de la baie.

La gestion de l'ouverture et de la fermeture des fenêtres dans le cadre d'un rafraîchissement passif ne peut se faire que suivant deux facteurs : un seuil de température extérieure à partir duquel un pourcentage d'ouverture est possible et une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. En mode manuel l'occupant agit sur ses menuiseries, et l'ouverture de la fenêtre n'est possible que si la pièce est occupée et il se peut, dans ce cas, que la température extérieure soit alors plus importante de quelques degrés par rapport à la température intérieure. Le logiciel Pléiades+COMFIE permet de définir l'ouverture des menuiseries suivant le mode « détaillé » qui prend alors en compte les exigences de la réglementation. Pour effectuer un rafraîchissement passif des appartements en été, les fenêtres doivent essentiellement être ouvertes pendant la nuit.

II.2.2. Comparaison avec les mesures

II.2.2.1. En été

La *figure 4.8* présente les écarts moyens de la température intérieure entre les résultats des simulations réalisées avec les scénarios RT et les mesures en été. On observe dans la majorité des appartements de la résidence isolée un écart moyen de -1,4 °C pendant la période estivale. Il est de -1 °C dans la résidence non-isolée. Les amplitudes, quant à elles, sont similaires à celles observées lors des simulations réalisées avec les scénarios issus des comportements réels. Les simulations RT sous-estiment donc la température au sein des logements et en conséquence l'inconfort. Seul l'appartement I-SN-3D-S présente des résultats similaires à ceux des simulations réalisées précédemment avec les scénarios réels. Or, nous avons vu que l'occupant de cet appartement avait un comportement qualifié d'« expert ». Il effectue une sur-ventilation nocturne comme c'est

recommandé dans les scénarios de la RT. Les différences observées entre les résultats de la simulation RT et les mesures *in situ* peuvent s'expliquer par la gestion optimale (pour atteindre le confort thermique) des protections solaires et de l'ouverture des fenêtres dans le cadre de la RT contrairement à la réalité où les actions sont beaucoup plus aléatoires.

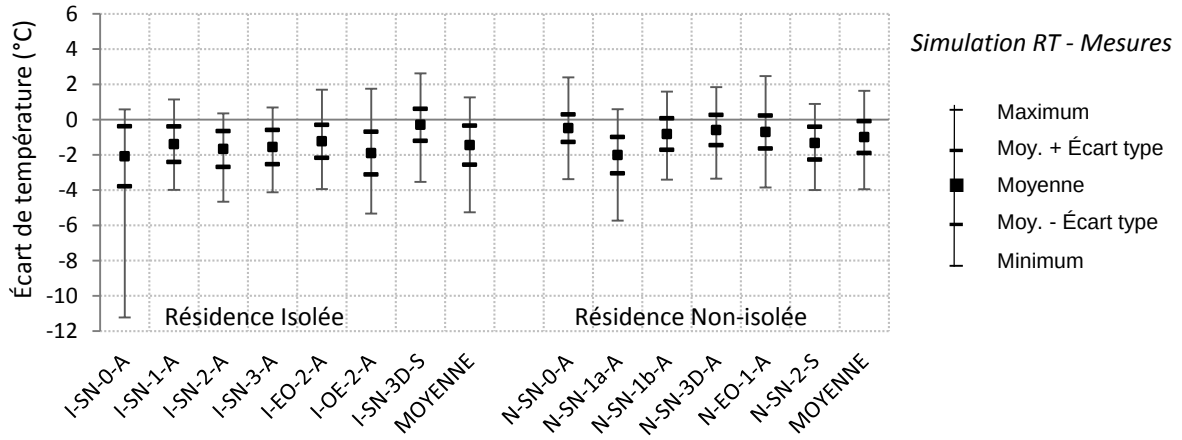


FIGURE 4.8 : *Maximum, moyenne, écart type et minimum des écarts de températures intérieures avec la* ***météo réelle*** *de l'été 2014 entre les simulations réalisées avec les* ***scénarios de la RT 2012*** *et les mesures dans les deux résidences*
de l'auteur

Jusqu'à présent, nous avons réalisé les simulations avec la météo de 2014 à Nîmes-Courbessac. Les simulations conventionnelles doivent être réalisées avec des données météorologiques réglementaires qui reconstituent une météo moyenne à partir de la compilation de plusieurs données météorologiques. Le site d'étude est soumis au climat méditerranéen correspondant à la zone climatique réglementaire H3. La *figure 4.9* présente la comparaison des températures intérieures entre les simulations conventionnelles (scénarios RT et météo RT) et les mesures *in situ*. La moyenne des écarts est similaire à celle obtenue avec les simulations réalisées avec les scénarios RT et la météo de 2014. Dans la résidence isolée, les écarts maximums sont de l'ordre de +2 °C et les minimums de l'ordre de -6,5 °C. Dans la résidence non-isolée ils sont de respectivement +3,9 °C et -7,5 °C. Ces écarts importants montrent que la réalisation de simulations conventionnelles (scénarios et météo RT) engendre une sous-estimation des températures intérieures. Cette sous-estimation conduit à une non-prise en compte de l'inconfort d'été qui peut engendrer de véritables surchauffes dans la réalité. De plus, comme nous l'avons souligné au *chapitre 2-I.3.2*, l'été 2014 a été particulièrement frais, on peut imaginer que pour un été caniculaire, les écarts et cette sous-estimation seraient plus importants. La réalisation de simulations à partir de la météo et des scénarios conventionnels pourrait conduire les concepteurs à négliger la mise en place de réelles solutions permettant de lutter contre l'inconfort d'été.

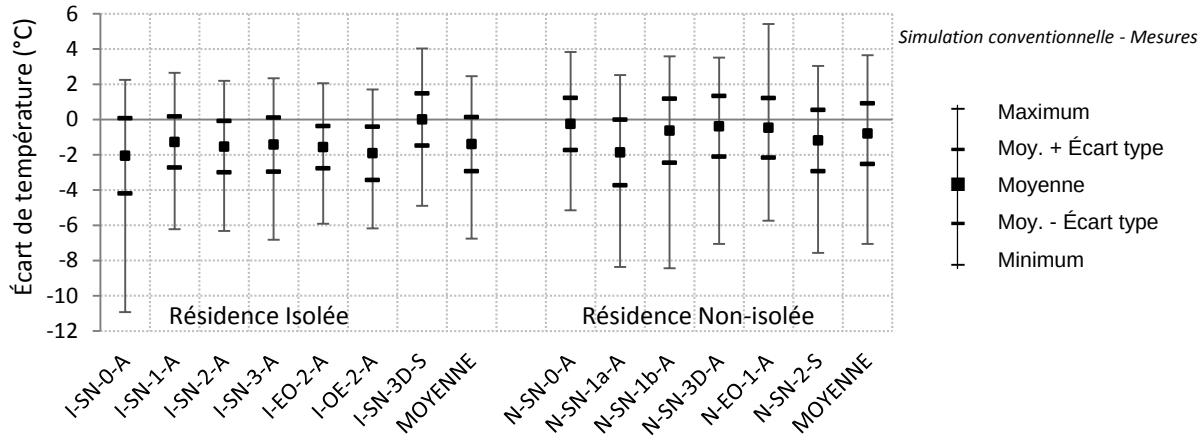


FIGURE 4.9 : *Maximum, moyenne, écart type et minimum des écarts de températures intérieures entre les simulations réalisées avec les* ***scénarios de la RT 2012*** *et la* ***météo RT 2012 (zone H3)*** *et les mesures* ***en été*** *dans les deux résidences*
de l'auteur

II.2.2.2. En hiver

En hiver, les températures intérieures sont directement reliées avec l'utilisation des systèmes de chauffage et la définition de la température de consigne par l'occupant. L'analyse des écarts de températures intérieures entre les simulations réalisées avec les scénarios RT (et la météo réelle de 2014) et les mesures *in situ* (*Figure 4.10*) montre des écarts importants qui traduisent la variabilité des comportements et des attentes des locataires en termes de température. Typiquement, dans le premier appartement (I-SN-0-A) un écart de -2 °C indique que la température moyenne mesurée dans l'appartement est supérieure de 2 °C à celle prévue par la réglementation (soit une moyenne à 21°C, cf. *Figure 3.51*). Dans la résidence isolée, il semble que les températures intérieures soient plus élevées que celles obtenues avec les simulations. Au contraire dans la résidence non-isolée la moyenne des écarts est proche de zéro. On retrouve ici la différence de température et donc de confort déjà identifié au *chapitre 3*.

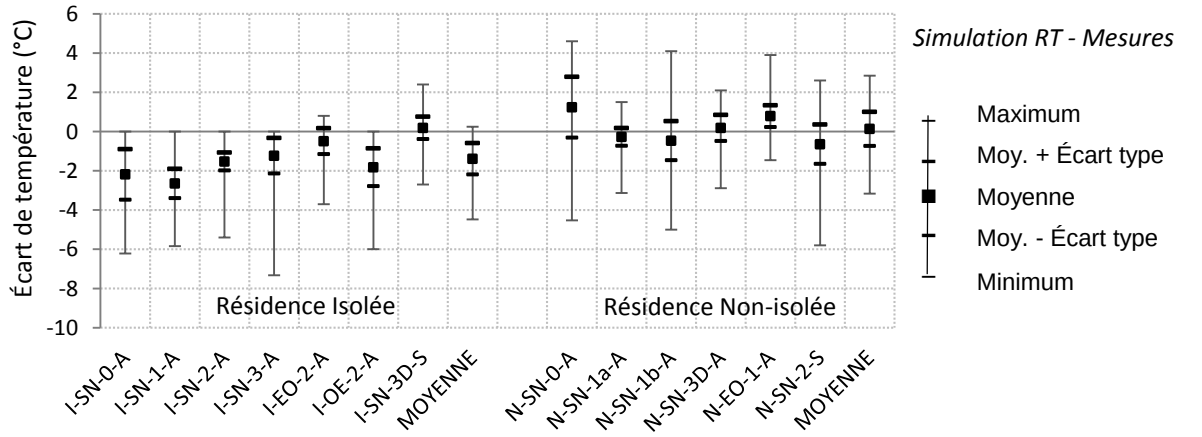


FIGURE 4.10 : *Maximum, moyenne, écart type et minimum des écarts de températures intérieures avec la* ***météo réelle*** *de l'****hiver*** *2014 entre les simulations réalisées avec les* ***scénarios de la RT 2012*** *et les mesures dans les deux résidences*
de l'auteur

Comme nous l'avons déjà remarqué lors des simulations avec les scénarios issus des comportements réels, les consommations de chauffage sont très variables d'un appartement à l'autre. Or, l'analyse de la *figure 4.11* montre que dans le cadre des simulations avec les scénarios RT les consommations de chauffage sont identiques dans les appartements ayant des caractéristiques similaires (appartements des étages intermédiaires par exemple). On note bien ici, que l'action de l'occupant est primordiale dans l'estimation des consommations d'énergie puisque dans la résidence isolée les estimations de consommation de chauffage varient de 0 kWh/(m².an) à 50 kWh/(m².an) et dans la résidence non-isolée elles varient de 8 kWh/(m².an) à 45 kWh/(m².an). Dans le cadre des simulations réalisées avec les scénarios RT, les besoins de chauffage sont constants (22 kWh/(m².an) dans la résidence isolée et 45 kWh/(m².an) dans la résidence non-isolée). Les simulations avec les scénarios conventionnels permettent ainsi de comparer les caractéristiques thermiques des appartements entre elles. On note par exemple que pour un même niveau de température, la consommation des ménages sera plus importante dans la résidence non-isolée que dans la résidence isolée. De même, pour chaque résidence, les appartements situés en rez-de-chaussée consomment davantage. Cependant, cette non-prise en compte du comportement réel de l'occupant peut dégrader les retours sur investissement prévus.

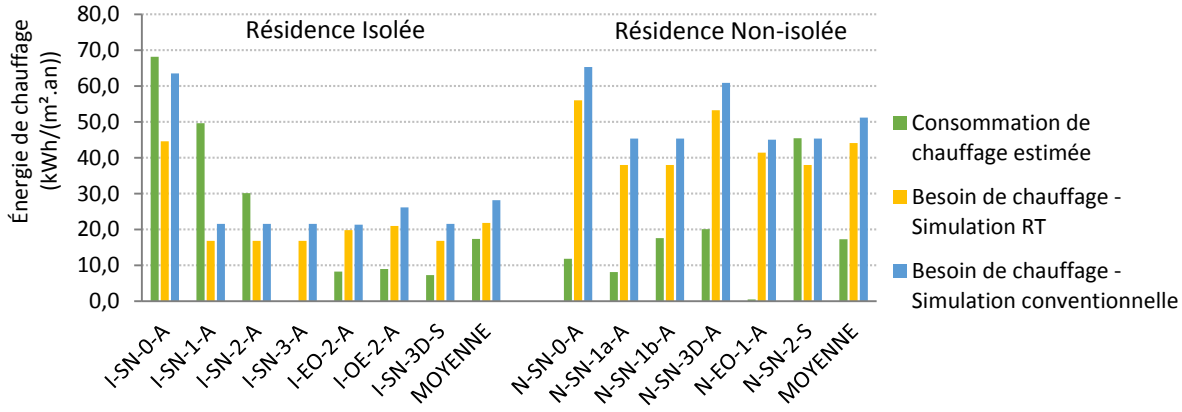


FIGURE 4.11 : *Consommation de chauffage* ***mesurées*** **in situ**, *avec les scénarios RT et la* ***météo réelle*** *(simulation RT) ou la* ***météo RT*** *(simulation conventionnelle) pour chaque appartement de l'auteur*

II.3. Modèle comportemental

Nous venons de voir que les scénarios RT sous-estiment les températures intérieures estivales des logements, notamment dans la résidence isolée ce qui peut conduire à de l'inconfort en situation réelle. Afin de proposer intuitivement des scénarios au plus proche de la réalité, nous définissons des scénarios comportementaux à partir des typologies d'usages issues des profils d'occupant.

II.3.1. Transposition des profils d'occupant en scénarios comportementaux

La comparaison entre les résultats des simulations avec les scénarios issus des comportements réels et les mesures *in situ* nous a permis de valider le mode de gestion des fenêtres et des volets. Les scénarios réels sont issus des mesures *in situ* analysées à postériori, cependant, il est impossible de prévoir ces scénarios pendant la phase de conception. Pour cela, nous avons

identifié des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet au *chapitre 3-II*. Les scénarios réels sont alors transposés en scénarios comportementaux en établissant la correspondance entre les pratiques réelles et les différentes typologies identifiées. Les simulations avec les scénarios réels nous ont permis de valider les pourcentages d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet (cf. *paragraphe II.1.2 de ce chapitre*). Ils sont donc réutilisés dans cette étude. Le *tableau 4.6*, synthétise les pourcentages d'occultation pour chaque typologie d'usage du volet au pas de temps horaire. Le *tableau 4.7*, quant à lui, reprend les pourcentages globaux d'ouverture de la fenêtre. Cependant, le couplage avec l'ouverture ou la fermeture du volet modifie considérablement les débits de ventilation comme nous avons vu précédemment. La définition du pourcentage final d'ouverture dépend donc des combinaisons d'ouverture de la fenêtre et d'occultation.

- Fenêtre ouverte (100%) Volet ouvert (0%) : 53 % d'ouverture
- Fenêtre ouverte (100 %) Volet à demi-fermé (50 %) : 25 % d'ouverture
- Fenêtre ouverte (100 %) Volet fermé (100 %) : 10 % d'ouverture
- Fenêtre fermée (0 %) Volet (0, 50 ou 100 %) : 0 % d'ouverture

Heure	0	…	5	6	…	11	12	13	…	21	22	23
O	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	50	50
M	50	50	50	100	100	100	100	0	0	0	50	50
A	50	50	50	0	0	0	100	100	100	100	50	50
P	50	50	50	100	100	100	100	100	100	100	50	50
O : Ouvert toute la journée							M : Protection le matin					
A : Protection l'après-midi							P : Protection toute la journée					

TABLEAU 4.6 : *Pourcentage d'**occultation** en fonction des typologies et des heures de la journée (100 % = volet fermé)*
de l'auteur

	0	…	6	7	8	9	10	11	12	…	15	16	17	18	19	20	21	22	23
R	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	0	0	0	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0
O	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	0	0
N	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100
F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R : Aération réduite							M : Aération le matin							J : Aération en journée					
L : Aération en journée longue							O : Ouvert toute la journée							S : Aération le soir					
N : Ventilation nocturne							F : Fermé toute la journée												

TABLEAU 4.7 : *Pourcentage d'**ouverture de la fenêtre** en fonction des typologies et des heures de la journée (100 % = fenêtre ouverte)*
de l'auteur

II.3.2. Validation du modèle comportemental

La simulation du comportement réel, avec la prise en compte des hypothèses précédentes, nous permet d'obtenir, dans les différents appartements (isolés et non-isolés), une bonne adéquation entre les mesures et les simulations faites avec notre modèle comportemental. La *figure 4.12* synthétise pour chaque appartement les écarts de température entre les simulations réalisées avec les scénarios issus des comportements réels, celles réalisées avec les scénarios comportementaux, celles réalisées avec les scénarios RT, celles réalisées avec les simulations conventionnelles et les mesures *in situ*. On observe que les simulations réalisées avec le modèle comportemental sont très similaires aux simulations réelles ce qui permet de valider les typologies comportementales pour la suite de l'étude.

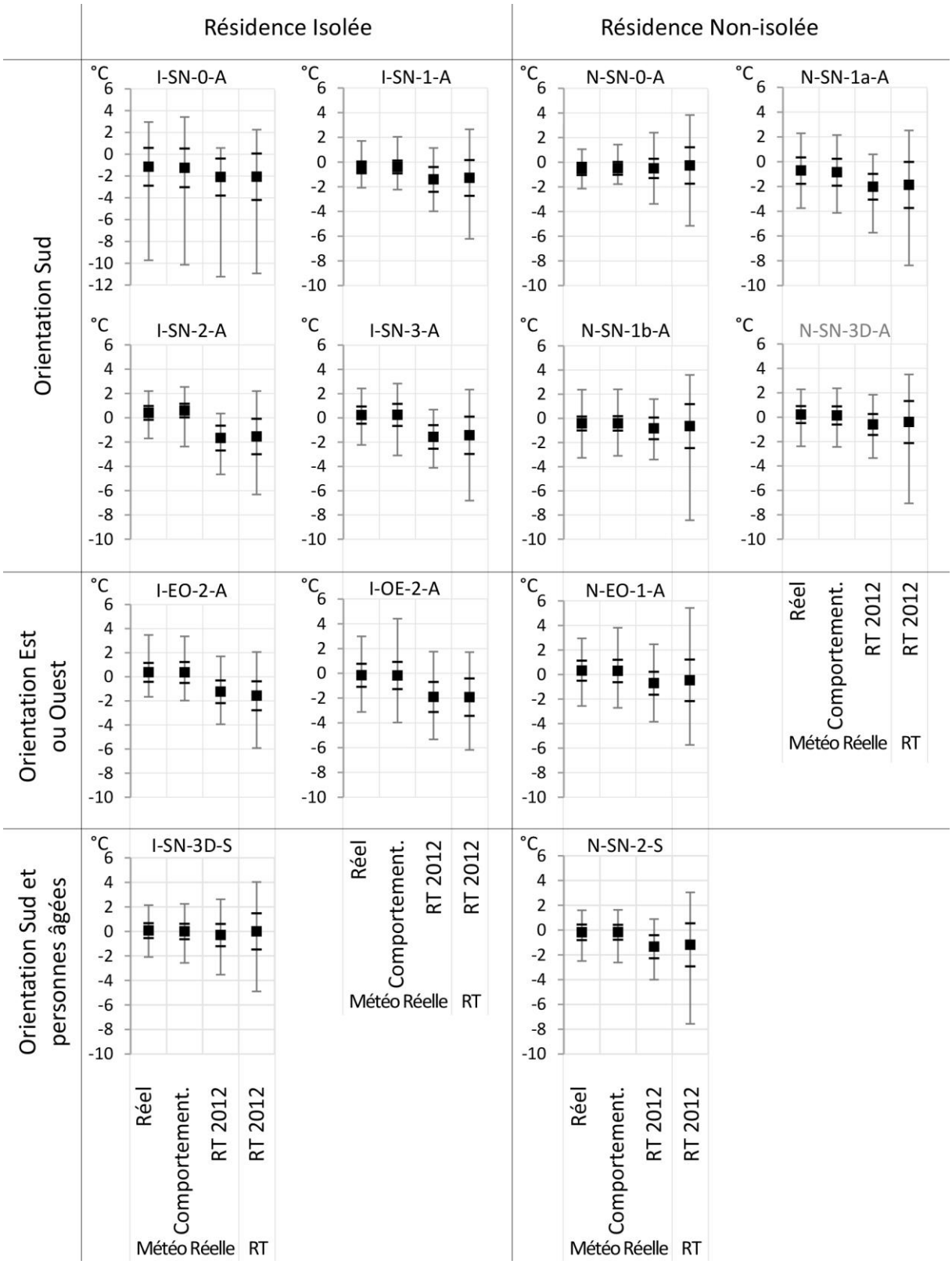


FIGURE 4.12 : *Comparaison pour chaque appartement des écarts de température intérieure entre les simulations réalisées avec les scénarios réels, le modèle comportemental ou ceux de la RT 2012 avec une météo réelle ou de la RT 2012 et les mesures* in situ *en été 2014*
de l'auteur

III. L'architecture, moteur de confort d'été

Au cours des paragraphes précédents, grâce à l'étude *in situ* des comportements, nous avons mis en place un modèle comportemental que nous avons validé avec les données recueillies. Nous avons également modélisé deux modules-appartements (l'un isolée et l'autre non-isolé) qui nous ont servi de base pour tester chacune des 32 typologies comportementales. Cette analyse nous permet de définir les stratégies à mettre en place afin de proposer des solutions architecturales permettant d'améliorer le confort d'été.

III.1. Modèle comportemental et réduction de l'inconfort

Nous avons identifié et validé 32 typologies définissant notre modèle comportemental lors du paragraphe précédent. Ces typologies ont des impacts différenciés sur le confort/inconfort. En été, nos mesures n'ont mis en évidence que de très faibles périodes d'inconfort lors de l'étude de l'année 2014 (trois jours en juin). La *figure 4.13* compare les données météorologiques de Nîmes-Courbessac en 2014 et en 2015. Nous avons déjà vu lors du *chapitre 2-I.3.2*, que l'année 2014 avait des moyennes mensuelles plus élevées en hiver et plus faibles en été que la moyenne des années précédentes. Lors de l'année 2015, par contre, les moyennes mensuelles sont plus faibles en hiver et plus élevées en été.

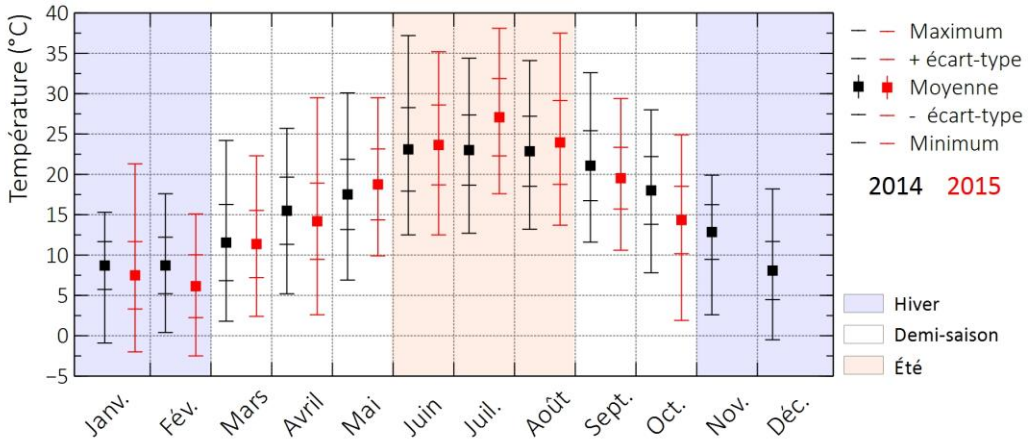


FIGURE *4.13* **:** ***Températures mensuelles en 2014 et 2015 à Nîmes-Courbessac***
de l'auteur d'après les données de Météo-France

Afin d'étudier l'impact des différentes typologies sur le confort en été ou sur les besoins de chauffage en hiver, nous implémentons, sur l'année complète, les typologies d'usage de la fenêtre et du volet, identifiées précédemment, dans le logiciel Pléiades+COMFIE. L'étude se fera donc sur les deux années 2014 et 2015 puisque les conditions météorologiques ont été très contrastées.

III.1.1. En été

III.1.1.1. Orientation Sud

La *figure 4.14* identifie le DHI_{+3} (défini au cours du *chapitre 3-I.2*), caractérisant l'inconfort, sur les trois jours les plus chauds de 2014 (du 10 au 12 juin, graphiques du haut) et de 2015 (du 19 au 21 juillet, graphiques du bas) pour les deux modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés Sud. On observe qu'en 2014, les moyennes du DHI_{+3} sur les trois jours étudiés sont similaires d'une résidence à l'autre (23 °C.h dans la résidence isolée et 25 °C.h dans la résidence non-isolée). Au contraire, en 2015, c'est dans la résidence isolée que l'inconfort est maximum (DHI_{+3} moyen de 229 °C.h contre 48 °C.h dans la résidence non-isolée). Lorsque les températures sont élevées, l'isolation par l'extérieur des résidences dégrade fortement le confort d'été. L'analyse des impacts des actions montre que d'une année sur l'autre, les mêmes actions n'ont pas les mêmes effets, ou du moins que les effets sont plus ou moins accentués. En effet, en 2014, nous identifions plusieurs actions permettant de minimiser l'inconfort dans les deux résidences (cf. *Liste 4.1*). Cependant en 2015, nous observons que cet ordre est modifié (cf. *Liste 4.2*). Dans les deux cas, c'est le manque de protection solaire qui engendre l'inconfort maximum. En 2014, le DHI_{+3} maximum (de 105,4 °C.h dans la résidence isolée et de 85,1 °C.h dans la résidence non-isolée) correspond à l'occupant qui ouvre sa fenêtre en journée. En 2015, par contre, le DHI_{+3} maximum est atteint avec trois pratiques : l'occupant qui ouvre sa fenêtre en journée, l'occupant qui ferme sa fenêtre toute la journée ou qui l'ouvre que de manière réduite (DHI_{+3} maximum moyen de 303,0 °C.h dans la résidence isolée et de 78,1 °C.h dans la résidence non-isolée).

LISTE 4.1 : *Actions minimisant l'inconfort en 2014 de la plus performante à la moins performante d'après l'analyse des graphiques du haut de la* figure 4.14 *:*

- La **ventilation nocturne** conduit à un inconfort minimum quelle que soit la position du volet. Dans la résidence non-isolée cependant, l'absence de protection solaire ou la protection dans l'après-midi semble produire un léger inconfort (DHI_{+3} de 3 °C.h) que l'on n'identifie pas dans la résidence isolée (DHI_{+3} nul). En effet, comme nous l'avons vu au *chapitre 3-II.1.3.1*, c'est la nuit que la température extérieure est inférieure à la température intérieure, il s'agit donc de la période optimale pour rafraîchir les appartements.
- Si la ventilation nocturne n'est pas mise en place, l'installation des **protections solaires toute la journée** permet également de minimiser l'inconfort de manière significative notamment dans la résidence isolée (DHI_{+3} de 1 °C.h en moyenne et 5 °C.h dans la résidence non-isolée).
- La mise en place des **protections solaires le matin** permet, dans le cas des ouvertures courtes (nommées « réduite », « le matin », « le soir », « fermée » sur les graphiques) de réduire l'inconfort (DHI_{+3} de 8 °C.h en moyenne dans la résidence isolée et 14 °C.h en moyenne dans la résidence non-isolée).
- La **ventilation en continu, le matin ou le soir** lorsque les protections solaires ne sont pas mises en place ou uniquement l'après-midi, permet également de réduire l'inconfort même si ce-dernier commence à être important (DHI_{+3} de 20 °C.h dans la résidence isolée en moyenne et 27 °C.h dans la résidence non-isolée).

LISTE 4.2 : *Actions minimisant l'inconfort en 2015 de la plus performante à la moins performante d'après l'analyse des graphiques du bas de la* figure 4.14 *:*

- La **ventilation nocturne,** comme en 2014 conduit à un inconfort minimum quelle que soit la position du volet (DHI_{+3} moyen de 76,7 °C.h dans la résidence isolée et de 14,0 °C.h dans la résidence non-isolée).
- L'**ouverture en continu** de la fenêtre, quelle que soit la position du volet, permet également d'obtenir un inconfort minimum (DHI_{+3} moyen de 109,6 °C.h dans la résidence isolée et de 19,2 °C.h dans la résidence non-isolée), même si la protection l'après-midi et toute la journée sont les combinaisons optimales pour limiter l'inconfort. En effet, même si au cours de la journée, la température intérieure peut augmenter de façon significative, la ventilation nocturne engendre une amélioration significative du confort. Cependant, lors d'une période de canicule (si la température extérieure ne diminuait pas la nuit) ce comportement conduirait à de l'inconfort.
- Si la ventilation nocturne ou en continu n'est pas effectuée, la mise en place des **protections solaires toute la journée** quel que soit l'usage de la fenêtre conduit à un inconfort modéré grâce à la réduction des apports externes (DHI_{+3} moyen de 186,1 °C.h dans la résidence isolée et de 37,5 °C.h dans la résidence non-isolée).
- L'**ouverture de la fenêtre toute la journée et une partie de la nuit** (jour long) permet également de limiter l'inconfort en favorisant la ventilation nocturne et l'évacuation des calories accumulées au cours de la journée (DHI_{+3} moyen de 244,6 °C.h dans la résidence isolée et de 52,3 °C.h dans la résidence non-isolée).

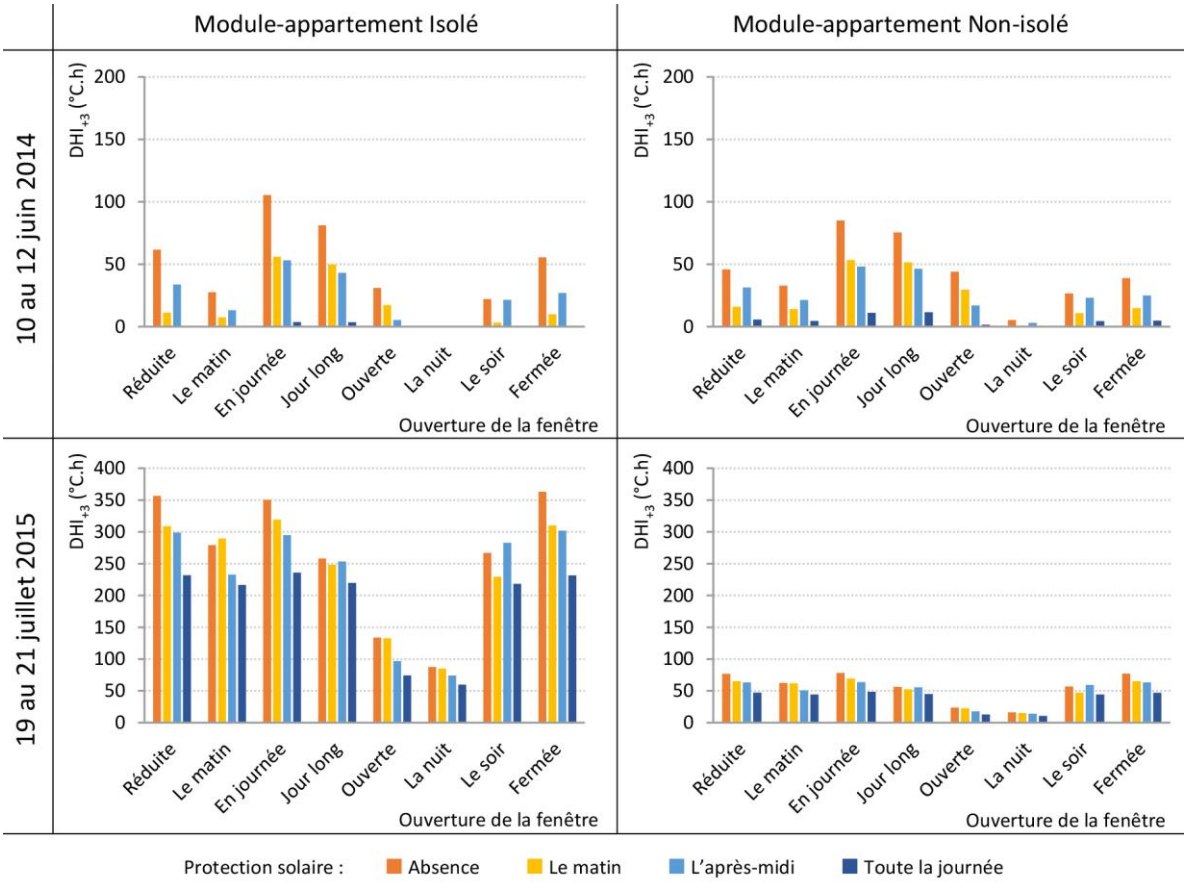


FIGURE 4.14 : *DHI_{+3} des modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés* ***Sud*** *en fonction des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet lors des trois jours les plus chauds de 2014 (du 10 au 12 juin) et de 2015 (du 19 au 21 juillet)*
de l'auteur

À partir de l'étude du DHI_{+3} des trois jours les plus chauds de l'année 2014 sur la *figure 4.14*, nous pouvons retrouver les profils d'occupant que nous avons précédemment définis (cf. *Chapitre 3-III.2*). Dans les deux résidences, les typologies ont les mêmes effets. Ils sont cependant atténués dans la résidence non-isolée. Nous étudions alors le DHI_{+3} de la résidence isolée afin de définir le profil des occupants, nous retrouvons les mêmes éléments dans la résidence non-isolée, seuls les seuils varient. Sont identifiés comme occupants « experts » ceux dont les pratiques permettent d'obtenir un DHI_{+3} nul. Sont qualifiés d'« actifs » ceux dont les pratiques permettent d'obtenir un DHI_{+3} inférieur à 20 °C.h. Enfin, ceux qui ne rentrent pas dans ces catégories sont définis comme « contre-productifs ». Nous retrouvons ainsi les éléments précédemment identifiés lors du *tableau 3.7* et repris dans le *tableau 4.8*.

En 2015, l'étude du DHI_{+3}, des trois jours les plus chauds, conduit à une répartition différente des actions en fonction du profil des occupants. Ainsi, dans la résidence isolée, on peut qualifier d'« experts », les occupants dont les pratiques induisent un inconfort réduit (le DHI_{+3} est inférieur à 150 °C.h). Les « actifs » sont ceux dont l'inconfort est modéré avec un DHI_{+3} inférieur à 260 °C.h dans la résidence isolée. Enfin les « contre-productifs » sont ceux dont l'inconfort est maximal. Les typologies sont donc différentes de celles étudiées en 2014 et sont également répertoriées dans le *tableau 4.8*.

TYPOLOGIES DES USAGES				COUPLE	ORIENTATION SUD	
FENÊTRE		VOLET			2014	2015
R	Aération réduite	O	Ouvert toute la journée	R-O	CP	CP
		M	Protection le matin	R-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	R-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	R-P	E	A
M	Aération le matin	O	Ouvert toute la journée	M-O	CP	CP
		M	Protection le matin	M-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	M-A	A	A
		P	Protection toute la journée	M-P	E	A
J	Aération en journée	O	Ouvert toute la journée	J-O	CP	CP
		M	Protection le matin	J-M	CP	CP
		A	Protection l'après-midi	J-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	J-P	A	A
L	Aération journée longue	O	Ouvert toute la journée	L-O	CP	A
		M	Protection le matin	L-M	CP	A
		A	Protection l'après-midi	L-A	CP	A
		P	Protection toute la journée	L-P	A	A
O	Ouverture > 20h/j	O	Ouvert toute la journée	O-O	CP	E
		M	Protection le matin	O-M	A	E
		A	Protection l'après-midi	O-A	A	E
		P	Protection toute la journée	O-P	E	E
S	Aération le soir	O	Ouvert toute la journée	S-O	A	CP
		M	Protection le matin	S-M	A	A
		A	Protection l'après-midi	S-A	A	CP
		P	Protection toute la journée	S-P	E	E
N	Ventilation matin-soir-nuit	O	Ouvert toute la journée	N-O	E	E
		M	Protection le matin	N-M	E	E
		A	Protection l'après-midi	N-A	E	E
		P	Protection toute la journée	N-P	E	E
F	Fermée toute la journée	O	Ouvert toute la journée	F-O	CP	CP
		M	Protection le matin	F-M	A	A
		A	Protection l'après-midi	F-A	CP	A
		P	Protection toute la journée	F-P	E	E

TABLEAU 4.8 : *Définition des couples de typologies des usages de la fenêtre et du volet pour un occupant « contre-productif » (CP), un occupant « actif » (A) et un occupant « expert » (E) en **été** pour des appartements orientés **Sud** en fonction des années (2014 et2015)*
de l'auteur

La *figure 4.15* présente le DHI_{+3} de la période estivale (du 1er juin au 31 août) en 2014 et 2015. Contrairement à ce que nous venons de voir, on observe qu'en moyenne l'inconfort est plus marqué dans la résidence isolée (DHI_{+3} de 360 °C.h en 2014 et de 2662 °C.h en 2015) que dans la résidence non-isolée (DHI_{+3} de 120 °C.h en 2014 et de 1664 °C.h en 2015). Les faibles valeurs du DHI_{+3} de l'été 2014, dans les deux résidences, expliquent pourquoi nous n'observons que très peu de périodes d'inconfort dans les appartements étudiés. L'analyse des graphiques permet de retrouver sur toute la période estivale les mêmes effets sur le confort que ceux obtenus lors de l'étude des trois jours les plus chauds pour chaque typologie comportementale.

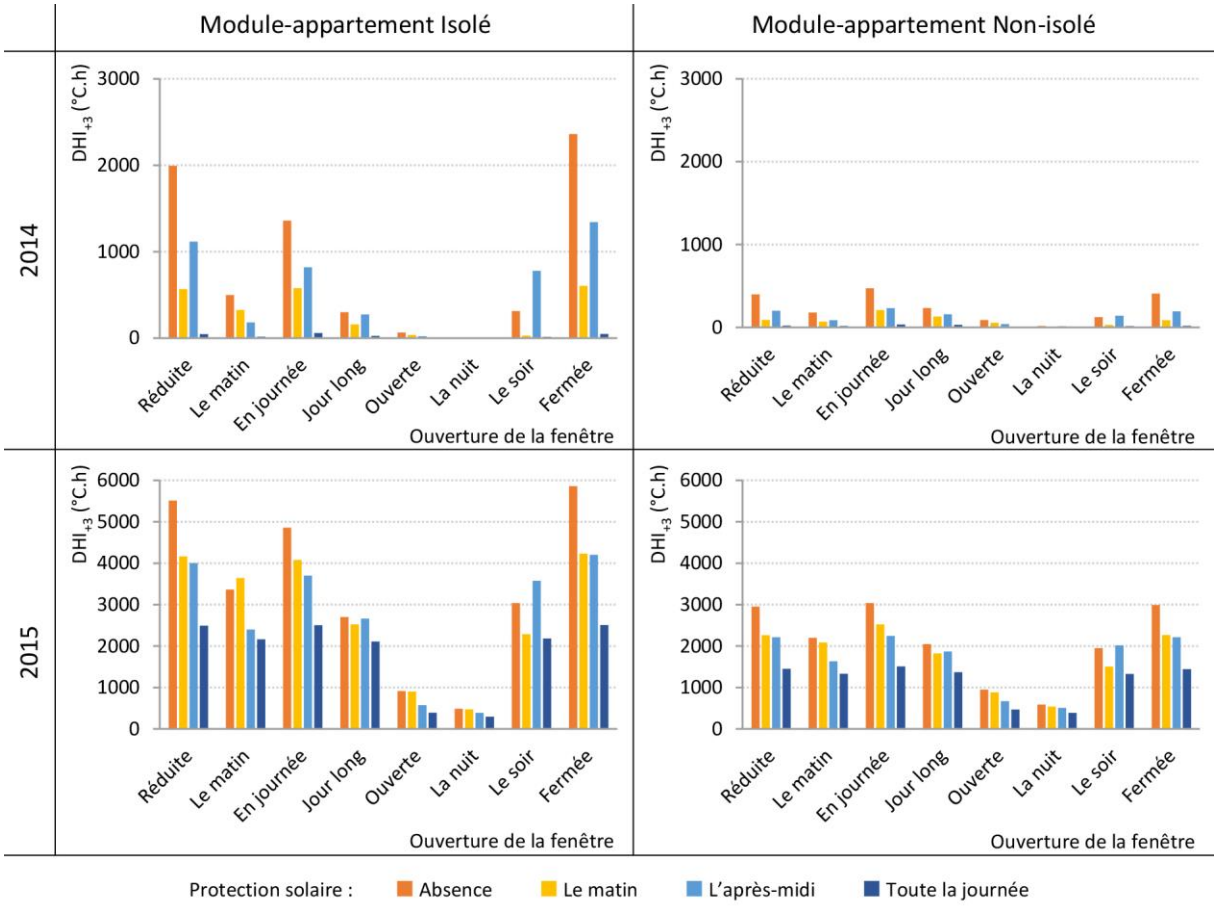


FIGURE 4.15 : *DHI_{+3} des modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés **Sud** en fonction des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet pendant toute la période estivale en 2014 et 2015*
de l'auteur

En conclusion, le confort d'été est d'autant meilleur que le bâtiment a des caractéristiques thermiques dégradées. Or pour se protéger du froid en hiver, il est important d'isoler les bâtiments comme nous le verrons par la suite. Dans tous les cas, les combinaisons des usages de la fenêtre et du volet ont un impact différencié sur le confort des occupants. Cependant, en fonction des caractéristiques météorologiques, certaines actions peuvent être pénalisantes une année et avantageuses l'année suivante. Dans tous les cas, les actions sont importantes à mettre en œuvre pour limiter l'inconfort d'été au sein des logements. La plus efficace est la ventilation nocturne ou en continu. Enfin, si la sur-ventilation nocturne n'est pas possible (nuisances sonores, nuisibles, nuisances lumineuses, intimité…) la mise en place des protections solaires toute la journée est nécessaire pour se protéger des apports solaires quel que soit l'usage de la fenêtre.

III.1.1.2. Orientation Est

La *figure 4.16* présente les DHI_{+3} pour les deux modules-appartements orientés Est en 2014 (graphiques du haut) et 2015 (graphique du bas). On observe qu'en 2014, les moyennes du DHI_{+3} sur les trois jours étudiés sont similaires d'une résidence à l'autre (63 °C.h dans la résidence isolée et 69 °C.h dans la résidence non-isolée soit une dégradation par rapport à l'orientation Sud de respectivement, 173 % et 163 %). Au contraire en 2015, c'est dans la résidence isolée que l'inconfort est maximum (DHI_{+3} moyen de 292 °C.h contre 257 °C.h dans la résidence non-isolée soit une dégradation de, respectivement, 28 % et 433 %). On observe que, par rapport à une orientation Sud, les DHI_{+3} sont dégradés dans les deux résidences. Cependant, en 2015, alors que pour l'orientation Sud l'inconfort était très faible dans la résidence non-isolée, on observe ici que pour une orientation Est, il est très similaire à celui de la résidence isolée. Cela peut être expliqué par une ventilation moins efficace due à l'orientation de la résidence par rapport aux vents dominants mais aussi par des apports solaires plus importants le matin.

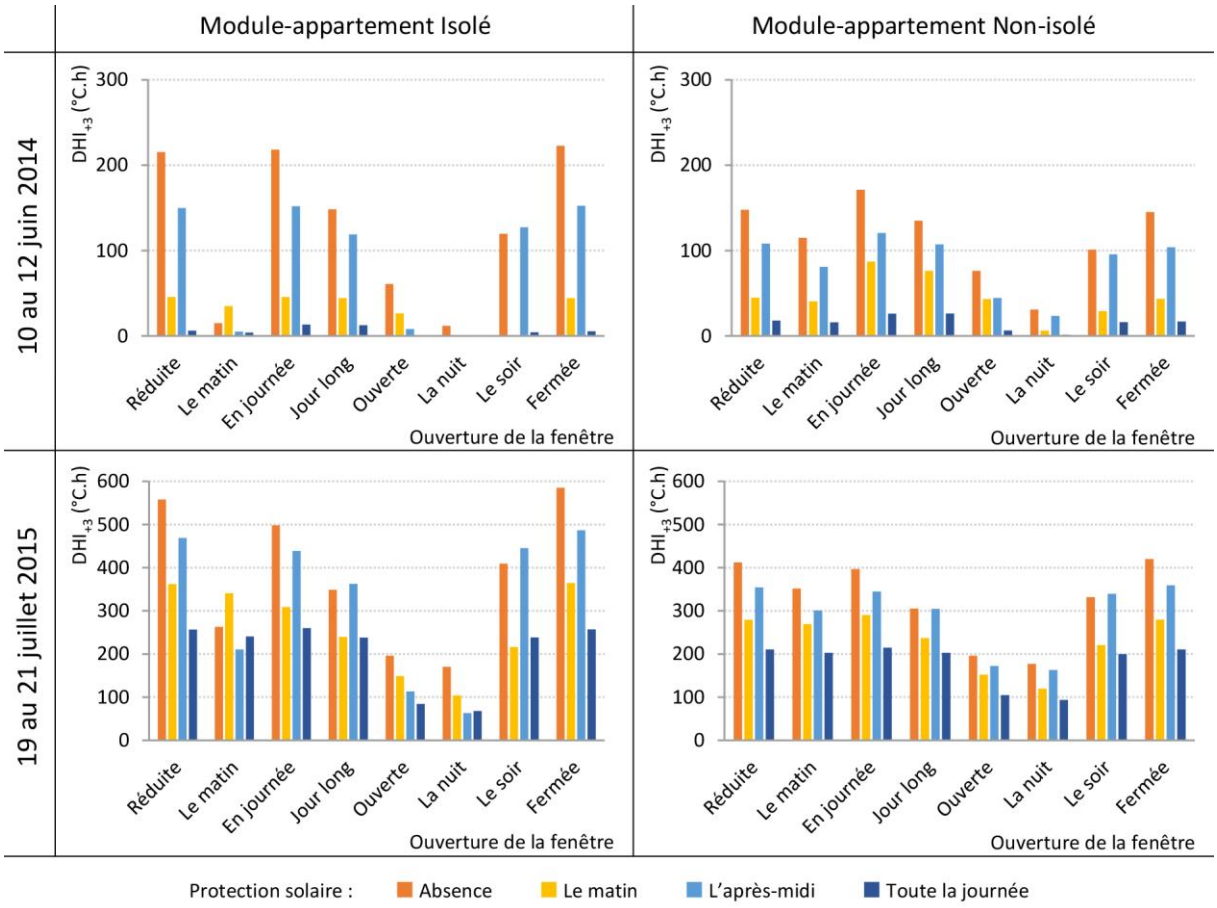


FIGURE 4.16 : ***DHI+3 des modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés Est en fonction des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet pendant les trois jours les plus chauds de 2014 et 2015***
de l'auteur

Comme pour l'orientation Sud, on observe sur la *figure 4.16*, que les mêmes actions n'ont pas les mêmes implications entre 2014 et 2015. Cependant, en règle générale, la ventilation nocturne permet d'obtenir un inconfort minimum et ce, même si la fenêtre est laissée également ouverte en journée. La ventilation nocturne couplée à une protection solaire toute la journée correspond à la typologie comportementale optimale. Cependant, dans le cas des appartements orientés Est, la protection solaire le matin permet également de diminuer de façon significative l'inconfort au sein

des appartements. Sur la base des mêmes seuils que ceux déterminés pour l'orientation Sud, nous établissons la correspondance entre typologies et profils d'occupant. Ils sont décrits dans le *tableau 4.9*.

TYPOLOGIES DES USAGES				COUPLE	ORIENTATION EST	
FENÊTRE		VOLET			2014	2015
R	Aération réduite	O	Ouvert toute la journée	R-O	CP	CP
		M	Protection le matin	R-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	R-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	R-P	A	A
M	Aération le matin	O	Ouvert toute la journée	M-O	A	A
		M	Protection le matin	M-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	M-A	A	A
		P	Protection toute la journée	M-P	A	A
J	Aération en journée	O	Ouvert toute la journée	J-O	CP	CP
		M	Protection le matin	J-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	J-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	J-P	A	A
L	Aération journée longue	O	Ouvert toute la journée	L-O	CP	CP
		M	Protection le matin	L-M	A	A
		A	Protection l'après-midi	L-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	L-P	A	A
O	Ouverture > 20h/j	O	Ouvert toute la journée	O-O	CP	A
		M	Protection le matin	O-M	A	E
		A	Protection l'après-midi	O-A	A	E
		P	Protection toute la journée	O-P	E	E
S	Aération le soir	O	Ouvert toute la journée	S-O	CP	CP
		M	Protection le matin	S-M	E	A
		A	Protection l'après-midi	S-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	S-P	A	A
N	Ventilation matin-soir-nuit	O	Ouvert toute la journée	N-O	A	A
		M	Protection le matin	N-M	E	E
		A	Protection l'après-midi	N-A	E	E
		P	Protection toute la journée	N-P	E	E
F	Fermée toute la journée	O	Ouvert toute la journée	F-O	CP	CP
		M	Protection le matin	F-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	F-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	F-P	A	A

TABLEAU 4.9 : *Définition des couples de typologies des usages de la fenêtre et du volet pour un occupant « contre-productif » (CP), un occupant « actif » (A) et un occupant « expert » (E) en **été** pour des appartements orientés **Est** en fonction des années (2014 et2015)*
de l'auteur

III.1.1.3. Orientation Ouest

Comme pour les orientations précédentes, la *figure 4.17* présente les DHI_{+3} pour les deux modules-appartements orientés Ouest en 2014 (graphiques du haut) et 2015 (graphique du bas). On observe qu'en 2014, les moyennes du DHI_{+3} sur les trois jours étudiés sont similaires d'une résidence à l'autre (46 °C.h dans la résidence isolée et 44 °C.h dans la résidence non-isolée soit une dégradation par rapport à l'orientation Sud de respectivement, 100 % et 76 %). Au contraire en 2015, c'est dans la résidence isolée que l'inconfort est maximum (DHI_{+3} moyen de 273 °C.h contre 230 °C.h dans la résidence non-isolée soit une dégradation de respectivement, 19 % et 379 %). Les dégradations par rapport à l'orientation Sud sont du même ordre que celles de l'orientation Est.

Ici aussi, c'est la ventilation nocturne et la protection solaire toute la journée qui conduisent à l'inconfort minimal. De même, l'ouverture toute la journée permet de limiter l'inconfort par une ventilation continue de l'appartement. La chaleur n'est pas accumulée. Sur la base des mêmes seuils que ceux déterminés pour l'orientation Sud, nous établissons la correspondance entre typologies et profils d'occupant. Ils sont décrits dans le *tableau 4.10*.

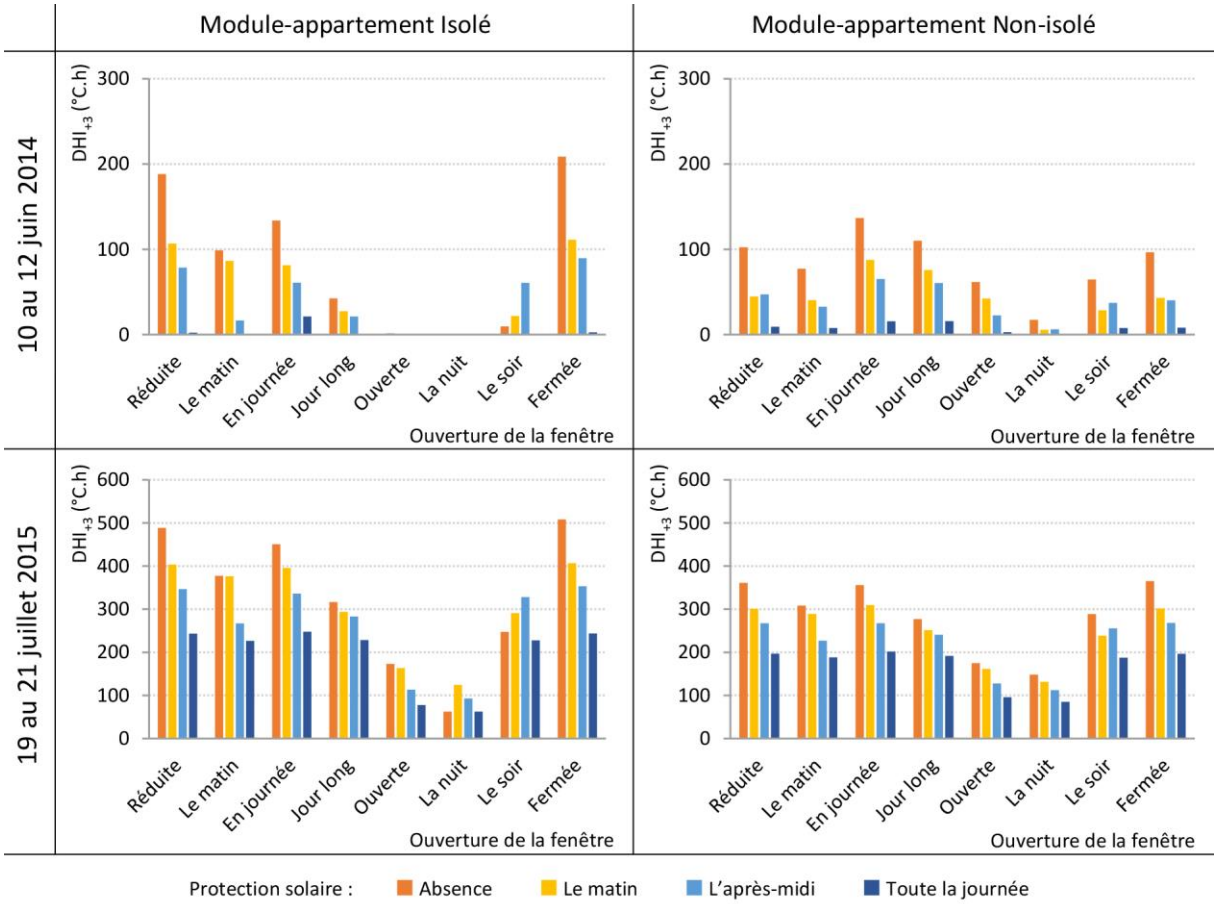


FIGURE 4.17 : *DHI_{+3} des modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés **Ouest** en fonction des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet pendant les trois jours les plus chauds de 2014 et 2015*
de l'auteur

TYPOLOGIES DES USAGES				COUPLE	ORIENTATION OUEST	
FENÊTRE		VOLET			2014	2015
R	Aération réduite	O	Ouvert toute la journée	R-O	CP	CP
		M	Protection le matin	R-M	CP	CP
		A	Protection l'après-midi	R-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	R-P	A	A
M	Aération le matin	O	Ouvert toute la journée	M-O	CP	CP
		M	Protection le matin	M-M	CP	CP
		A	Protection l'après-midi	M-A	A	A
		P	Protection toute la journée	M-P	E	A
J	Aération en journée	O	Ouvert toute la journée	J-O	CP	CP
		M	Protection le matin	J-M	CP	CP
		A	Protection l'après-midi	J-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	J-P	A	A
L	Aération journée longue	O	Ouvert toute la journée	L-O	A	CP
		M	Protection le matin	L-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	L-A	A	CP
		P	Protection toute la journée	L-P	E	A
O	Ouverture > 20h/j	O	Ouvert toute la journée	O-O	E	E
		M	Protection le matin	O-M	E	E
		A	Protection l'après-midi	O-A	E	E
		P	Protection toute la journée	O-P	E	E
S	Aération le soir	O	Ouvert toute la journée	S-O	A	A
		M	Protection le matin	S-M	A	CP
		A	Protection l'après-midi	S-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	S-P	E	A
N	Ventilation matin-soir-nuit	O	Ouvert toute la journée	N-O	E	E
		M	Protection le matin	N-M	E	E
		A	Protection l'après-midi	N-A	E	E
		P	Protection toute la journée	N-P	E	E
F	Fermée toute la journée	O	Ouvert toute la journée	F-O	CP	CP
		M	Protection le matin	F-M	CP	CP
		A	Protection l'après-midi	F-A	CP	CP
		P	Protection toute la journée	F-P	A	A

TABLEAU 4.10 : *Définition des couples de typologies des usages de la fenêtre et du volet pour un occupant « contre-productif » (CP), un occupant « actif » (A) et un occupant « expert » (E) en **été** pour des appartements orientés **Ouest** en fonction des années (2014 et 2015) de l'auteur*

En conclusion, les orientations Est et Ouest sont les plus défavorables pour le confort thermique d'été. Cela peut s'expliquer par des apports solaires plus importants le matin ou le soir, pour ces orientations, par rapport à une orientation Sud. En conséquence, quand la protection solaire est mise en place l'inconfort est réduit. La ventilation nocturne ou en continu couplée avec une protection solaire toute la journée est, dans tous les cas, l'option qui permet de limiter au maximum l'inconfort. Malgré une inertie importante dans les deux résidences, en été, la non-isolée conduit à un inconfort thermique réduit.

III.1.2. En hiver

En hiver, nous analysons les besoins de chauffage pour atteindre une température minimum ($T_{C\text{-}3}$: la limite basse de température de confort). Nous proposons ici l'étude des 32 typologies de pratiques de la fenêtre et du volet. Cependant, nous avons vu au *chapitre 3-II* qu'elles n'étaient pas toutes représentatives du comportement hivernal des locataires.

III.1.2.1. Orientation Sud

L'analyse de la *figure 4.18* montre qu'en 2014, la moyenne des besoins de chauffage est de 54,7 kWh/(m².an) dans la résidence isolée et de 75,5 kWh/(m².an) dans la résidence non isolée. En 2015 par contre elle est de 63,3 kWh/(m².an) dans la résidence isolée et de 85,6 kWh/(m².an) dans la résidence non isolée. On observe ici que l'isolation par l'extérieure de la résidence permet de réduire de 27,5 % en 2014 et 26,0 % en 2015 les besoins de chauffage d'où l'intérêt d'isoler les bâtiments.

De plus, quels que soit la résidence et l'hiver étudié (janvier-février 2014 ou 2015 et novembre-décembre 2014), les typologies de pratiques ont un impact identique sur les besoins de chauffage, seul le niveau varie :

- La **fermeture de la fenêtre** quelle que soit la position du volet (avec une préférence pour son ouverture complète ou l'après-midi) conduit à un besoin de chauffage réduit.
- L'**ouverture réduite**, qui peut être favorisée dans le cas d'une ventilation mécanique faible pour éviter des condensations, est également une typologie de comportement conduisant à un besoin de chauffage réduit et, ce, quelle que soit la position du volet.
- L'ouverture de la fenêtre le matin, le soir ou en journée permet également de limiter les besoins de chauffage. Cependant, cela n'est efficace que lorsque la protection solaire est mise en place au moment de l'ouverture de manière à réduire le taux de ventilation.
- Les autres typologies sont essentiellement utilisées en été. Si elles sont mises en place en hiver, elles induisent de forts besoins de chauffage.

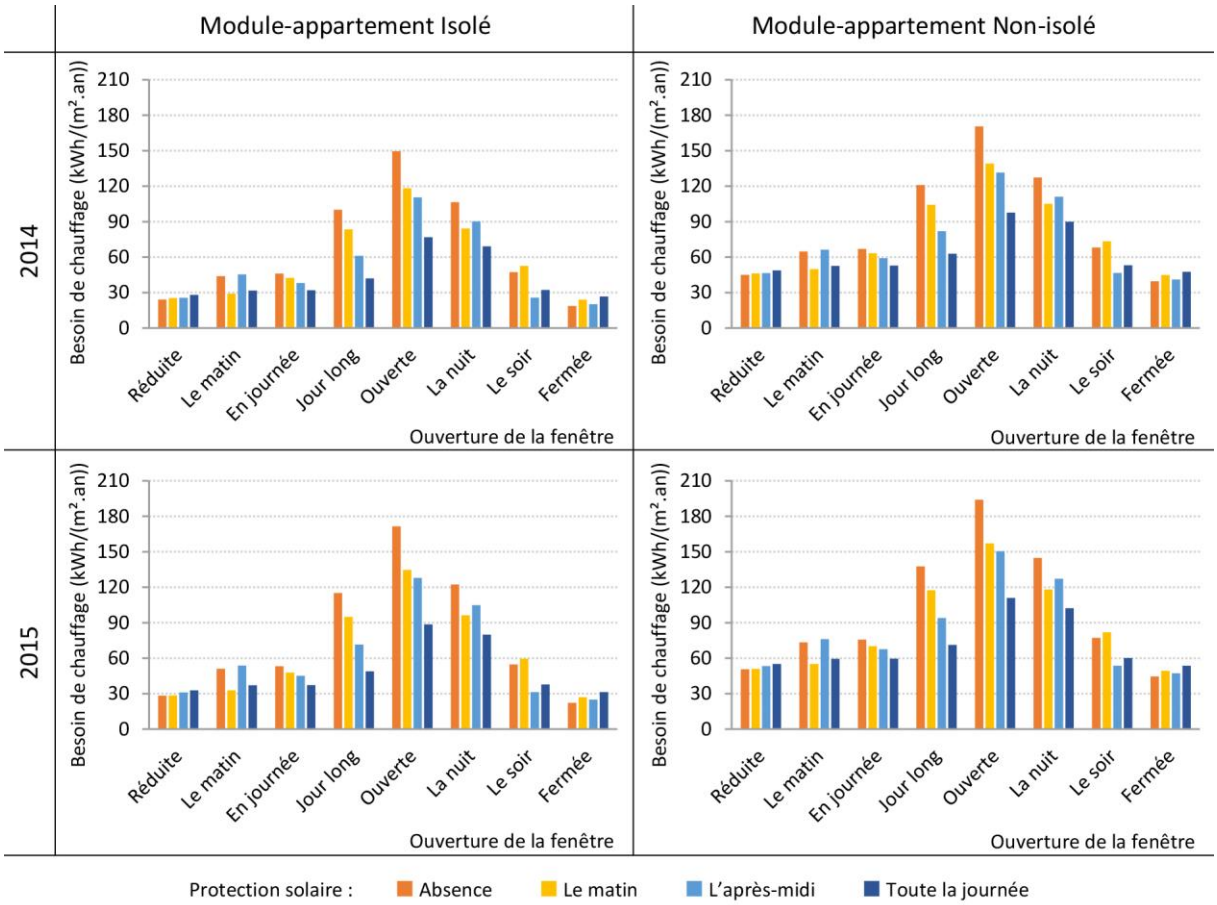


FIGURE 4.18 : *Besoin de chauffage des modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés* ***Sud*** *en fonction des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet en 2014 et 2015 de l'auteur*

III.1.2.2. Orientation Est

L'étude de l'orientation Sud indique que les impacts des typologies de comportements sur les besoins de chauffage étaient identiques en 2014 et 2015. Nous n'étudierons donc ici que les données de 2015. L'analyse de la *figure 4.19* montre de fortes ressemblances entre les besoins de chauffage pour les appartements orientés Sud, que nous venons d'expliciter, et ceux orientés Est. En moyenne les besoins de chauffage sont de 64,5 kWh/(m².an) et de 87,2 kWh/(m².an) dans la résidence non-isolée, soit une augmentation de 18% par rapport à une orientation Sud dans la résidence isolée et 15% dans la résidence non-isolée. Ces écarts sont certainement dus à la diminution des apports solaires directs. En ce qui concerne les comportements, on remarque, comme pour les orientations Sud, que la fermeture de la fenêtre et son ouverture réduite, quelle que soit la position du volet, permettent de réduire les besoins de chauffage. De même, lorsque la protection solaire est totale, l'inconfort est réduit quelle que soit la position de la fenêtre en raison du taux de renouvellement d'air diminué par la présence du volet. Le pourcentage d'ouverture de la fenêtre est alors réduit à 10 % (contre 53 % s'il n'y a aucune protection solaire), or en hiver, si le taux de renouvellement d'air est important, les consommations de chauffage augmentent fortement.

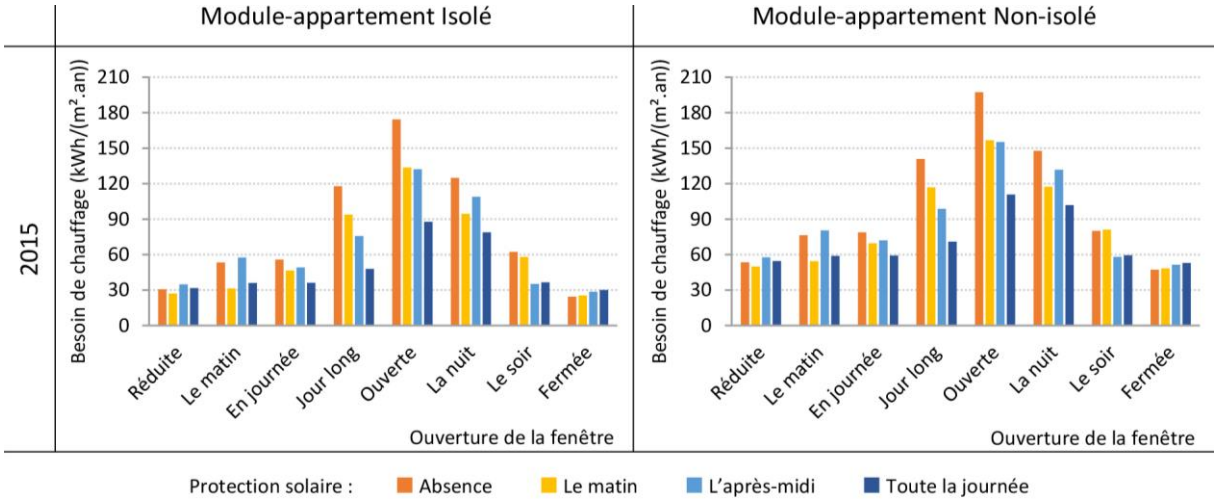


FIGURE 4.19 : *Besoin de chauffage des modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés **Est** en fonction des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet en 2015*
de l'auteur

III.1.2.3. Orientation Ouest

Comme pour l'orientation Est, nous n'étudierons ici que les données de 2015. L'étude de la *figure 4.20* montre des besoins de chauffage similaires à ceux observés précédemment dans les appartements orientés Est. En effet, la moyenne des besoins de chauffage dans la résidence isolée est de 65,9 kWh/(m².an) et de 88,6 kWh/(m².an) dans la résidence non-isolée, valeurs très proches de celles observées précédemment. Cela peut, également, s'expliquer par une durée réduite d'accès aux apports solaires directs. L'analyse des comportements montre un impact identique des différentes typologies sur les besoins de chauffage.

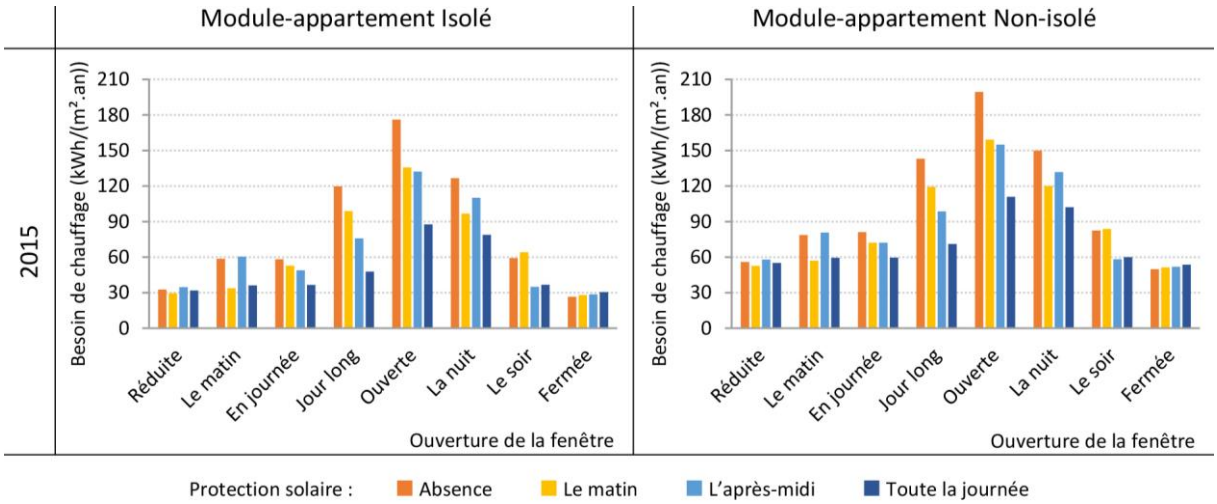


FIGURE 4.20 : *Besoin de chauffage des modules-appartements (isolé et non-isolé) orientés **Ouest** en fonction des typologies d'ouverture et de fermeture de la fenêtre et du volet en 2015*
de l'auteur

En conclusion, en hiver, l'orientation Sud de l'appartement est celle qui conduit à un besoin de chauffage réduit. Cependant, l'isolation par l'extérieur est nécessaire pour diminuer encore le besoin de chauffage de façon significative. Le maintien fermé de la fenêtre ou à sa faible ouverture (inférieure à 2h) sont les comportements optimaux. Toutefois, si la fenêtre doit être ouverte plus longtemps, elle ne doit l'être que partiellement de manière à réduire le taux de renouvellement d'air. Les volets, par contre, n'ont qu'un très faible impact sur le besoin de chauffage.

III.2. Stratégie architecturale : l'enveloppe bioclimatique

Au paragraphe précédent, nous avons identifié les différentes stratégies que l'occupant peut mettre en place afin de se protéger des surchauffes ou pour avoir une consommation énergétique réduite. Face à des climats différents, les solutions à envisager sont différentes. En climat méditerranéen, la difficulté réside dans la combinaison de deux stratégies opposées :

- En hiver, mettre en place une stratégie de chauffage : limiter les infiltrations et la ventilation en profitant des apports solaires (*Figure 3.50*)
- En été, mettre en place une stratégie de rafraîchissement : augmenter la ventilation et limiter les apports solaires *(Figure 3.43)*

Si lors de la conception du bâtiment aucune solution bioclimatique n'est mise en place, le rôle de l'occupant devient primordial afin de mettre en place ces deux stratégies antagonistes. Or, aujourd'hui, la réglementation thermique de l'existant n'impose pas de réflexion globale qui les prenne en compte. De nombreuses rénovations consistent donc, d'une part, à isoler thermiquement par l'extérieur les bâtiments afin de réduire la précarité énergétique des locataires et d'autre part, à ventiler les logements avec la mise en place d'une V.M.C. afin de diminuer l'humidité et les moisissures présentes dans les logements (c'est notamment le cas de la résidence isolée que nous étudions). Cependant, les surchauffes estivales sont souvent sous-estimées. Même si la mise en place d'une isolation par l'extérieur permet de se protéger du froid et de la chaleur, nous avons vu qu'une fois que la chaleur est accumulée au sein du logement, c'est à l'occupant d'agir pour réduire son inconfort. Or, ce-dernier n'a pas toujours un comportement thermiquement optimal. C'est alors à l'architecte de proposer une solution pérenne procurant les conditions pour obtenir un confort thermique (mais aussi lumineux, acoustique, etc.) optimal quelle que soit la saison. « *L'architecture bioclimatique est celle qui optimise le fonctionnement du bâtiment sur les ressources (ou les nuisances) offertes par son environnement extérieur (température, soleil, lumière, air...).* » *(ARENE et I.C.E.B., 2014)*. Une enveloppe qualifiée de bioclimatique permet de prendre en considération chacun des phénomènes afin que les dispositifs mis en place puissent procurer un maximum de conforts suivant un arbitrage nécessaire pour combiner ces stratégies opposées.

III.2.1. Approche avec le confort thermique

Au cours de ce paragraphe, nous testons diverses solutions architecturales afin d'estimer leurs impacts sur l'amélioration ou la dégradation du confort thermique. L'objectif n'est pas de faire une liste exhaustive des possibilités mais de comprendre comment elles agissent sur le confort thermique. Pour un meilleur confort thermique en hiver, la solution la plus efficace réside en la pose d'une isolation thermique. En été, par contre, pour assurer un rafraîchissement passif, des combinaisons de solutions bioclimatiques doivent être proposées et sont présentées en détail dans les ouvrages suivants : *(IZARD et MILLET, 1993 ; SALOMON et AUBERT, 2004 ; WRIGHT et COOK, 2004 ; ARENE et I.C.E.B., 2014)*.

III.2.1.1. Typologie d'occultation et protections solaires

Les typologies d'occultation permettent de se protéger ou au contraire de profiter des apports solaires. En termes d'occultation, plusieurs typologies sont envisageables. Un dispositif architectural fixe du type casquette ou un dispositif mobile (typologie du volet) peuvent être des stratégies permettant de pallier le comportement inopportun des occupants.

L'analyse du diagramme solaire (Annexe G) montre que la hauteur du soleil varie fortement entre l'hiver et l'été. En hiver (1er novembre-1er février), la hauteur maximale du soleil est de 30 °. En été par contre, elle est de 70 °. Cette différence permet de mettre en place une stratégie profitant des apports solaires en hiver tout en s'en protégeant en été. Ainsi, en fonction de la position du dispositif choisi, les apports solaires peuvent être optimisés en fonction des saisons. La *figure 4.21* présente deux solutions qui permettent de capter les rayons solaires dont l'angle est inférieur à 56 ° et de se protéger de ceux dont l'angle en est supérieur. Ainsi en été, la fenêtre n'est pas impactée par une partie des rayons solaires. La *figure 4.22* permet de visualiser l'impact des masques sur la fenêtre dus à sa position au nu intérieur et dus à la présence de la casquette présentée sur la *figure 4.21*. La position au nu intérieur de la fenêtre induit une réduction des apports solaires tout au long de l'année. Cependant, les solutions présentées sur la *figure 4.21* permettent de réduire de moitié les apports solaires en été alors qu'en hiver ils sont identiques.

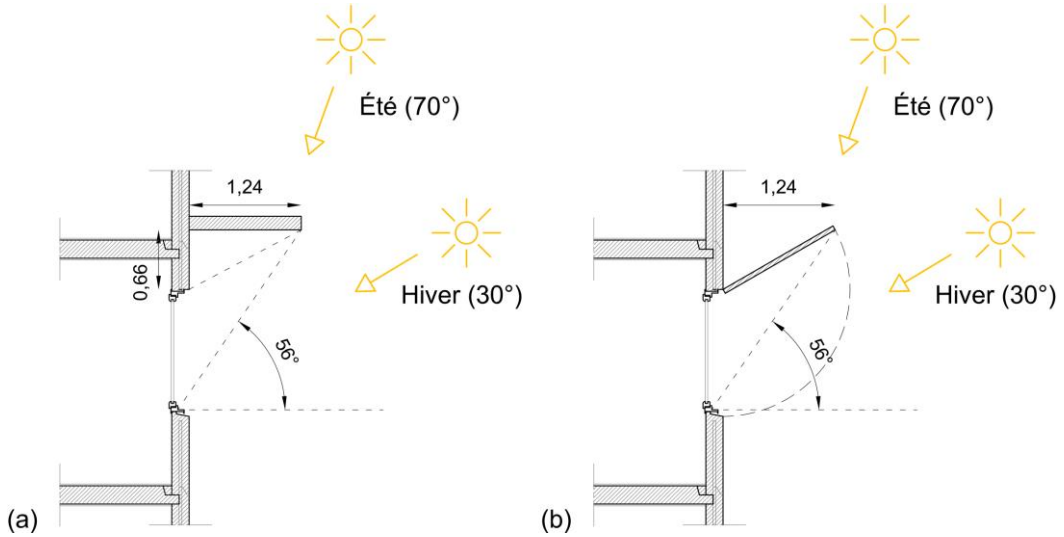


FIGURE 4.21 : *Différentes typologies de protection solaire sur les fenêtres existantes (a) avec une casquette et (b) avec un volet mobile pour une orientation Sud*
de l'auteur

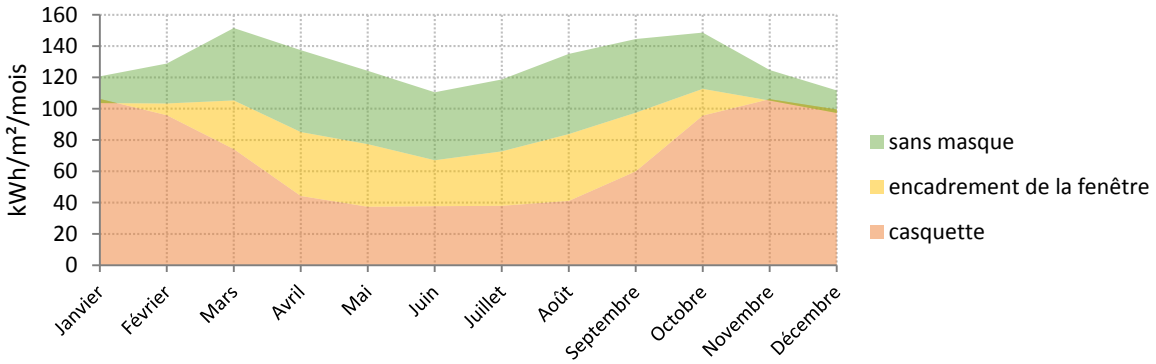


FIGURE 4.22 : *Visualisation de l'effet des masques pour une orientation Sud*
de l'auteur d'après Pléiades+COMFIE

La *figure 4.21.a* présente une solution avec une casquette fixe. Dans ce cas, l'action de l'occupant n'impacte pas les protections solaires. La *figure 4.21.b* présente une nouvelle typologie du volet. Lorsque l'occupant agit sur celui-ci, il met indirectement en place une protection solaire. La *figure 4.23* présente l'étude des DHI_{+3} pour la solution envisagée. Nous observons que les deux solutions proposées, dont la simulation est identique, permettent de réduire partiellement l'inconfort. Lorsque le volet est ouvert toute la journée, la mise en place de la casquette permet de

réduire l'inconfort de 8,1 % quand la fenêtre est ouverte en journée et de 19,6 % lorsque la fenêtre est ouverte la nuit. Une protection solaire totale par la fermeture des volets reste, tout de même, la solution la plus efficace. Elle permet de réduire de 32,7 % l'inconfort lorsque la fenêtre est ouverte toute la journée et 31,8 % lorsque la fenêtre est ouverte la nuit.

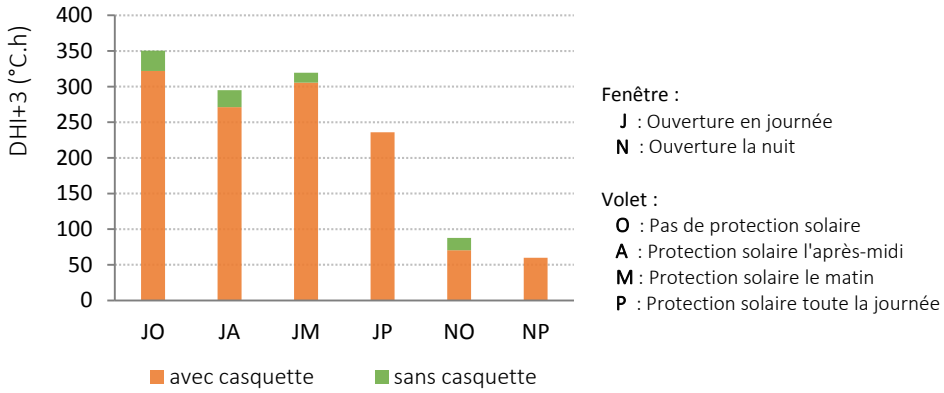


FIGURE 4.23 : *Impact des solutions imaginées sur les DHI_{+3} pour les trois jours les plus chauds de 2015 (19 au 21 juillet) pour une orientation Sud*
de l'auteur

En termes de protections solaires, d'autres solutions sont envisageables, notamment les panneaux perforés ou les moucharabiehs. Ces panneaux qui se positionnent devant la fenêtre permettent de réaliser une protection solaire plus efficace en fonction du pourcentage d'occultation. Les solutions précédentes (casquette et volet mobile) n'ont que peu d'impact sur le taux de ventilation par contre ces panneaux peuvent le modifier fortement. La *figure 4.24* montre l'impact sur le DHI_{+3} de différents panneaux ayant différents pourcentages d'occultation. Dans ces modèles, le taux de renouvellement est identique à un dispositif sans protection (la fenêtre a donc un pourcentage d'ouverture à 53 %). On observe que la mise en place de la casquette précédente provoque le même inconfort qu'une occultation de 30 %. La protection maximale (avec un taux de renouvellement d'air réduit à 10 % – JP_2015 sur la *figure 4.24*) permet une réduction de l'inconfort de 32,7 % mais dans ce cas, le volet étant complètement fermé, le confort lumineux est dégradé. En hiver, pour que ces panneaux soient efficaces, il faut prévoir des panneaux mobiles que l'occupant doit positionner devant sa fenêtre en début d'été et les déplacer en fin d'été. Cette manipulation nécessite cependant, une connaissance des actions efficaces mais peut éventuellement être aidée par la sensibilisation des locataires ou une démarche de la part du bailleur social ou du gardien pour prévenir les différents locataires.

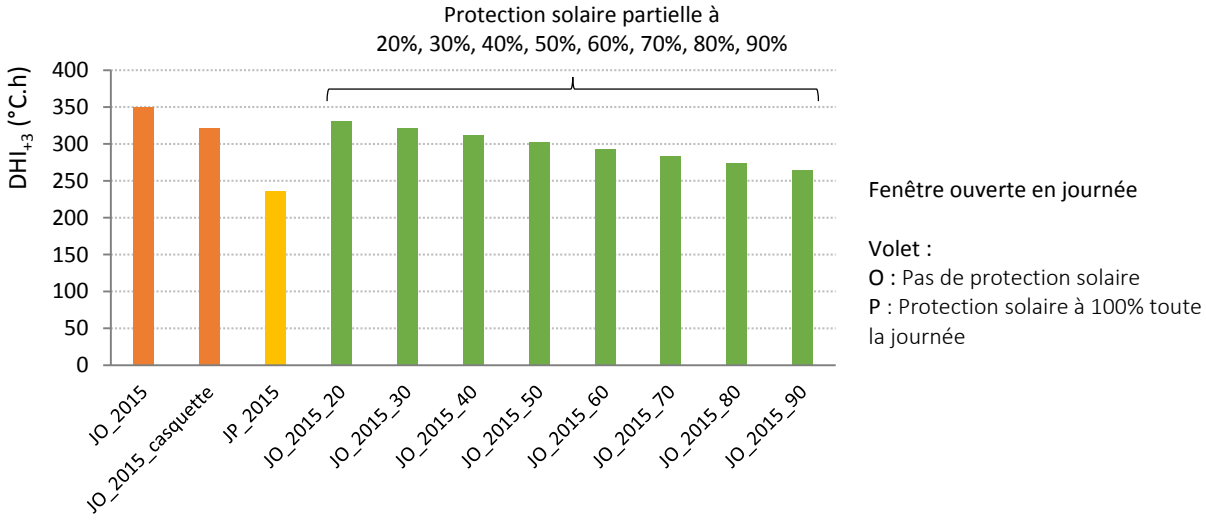


FIGURE 4.24 : *Impact de différents dispositifs d'occultation sur les DHI_{+3} pour une pratique « contre-productive » lors des trois jours les plus chauds de 2015 (19 au 21 juillet) pour une orientation Sud*
de l'auteur

III.2.1.2. Typologie de baie et ventilation naturelle

Nous avons vu au paragraphe précédent que la mise en place d'une ventilation naturelle nocturne voire en continu permet de réduire de façon significative l'inconfort en été. En hiver, au contraire, la ventilation doit être réduite au minimum afin d'assurer seulement le renouvellement hygiénique de l'air des appartements. La mise en place d'une stratégie architecturale de ventilation naturelle nécessite, la plupart du temps, l'intervention de l'occupant afin de pouvoir combiner ces deux stratégies saisonnières opposées.

Il existe plusieurs typologies d'ouverture des fenêtres qui impliquent des taux de renouvellement d'air différents (*Figure 4.25*). Effectuer une ventilation continue avec une fenêtre qui s'ouvre à la française (*Figure 4.25.a*) peut être difficile dans la mesure où elle peut générer un encombrement de l'espace intérieur ou réduire le sentiment de sécurité des occupants. Pour atténuer ces points négatifs, on peut proposer d'autres typologies de menuiseries. On retrouve dans l'architecture traditionnelle tropicale des solutions de ventilation continue comme les jalousies. Il s'agit de lames vitrées mobiles (*Figure 4.25.c*) qui peuvent, ici, être installées à la place du vantail fixe des fenêtres existantes. Nous proposons ainsi une ouverture continue de ce vantail à 80 % ce qui correspond à une ouverture de 25 % de la totalité de la fenêtre. Les baies avec une imposte ouvrante (*Figure 4.25.d*) sont également à privilégier dans la mesure où elles n'encombrent pas l'espace intérieur et permettent d'évacuer l'air chaud situé en hauteur. Nous proposons également de positionner cette ouverture sur la partie fixe de la fenêtre existante et proposons ainsi une ouverture à 12% de la superficie totale de la fenêtre.

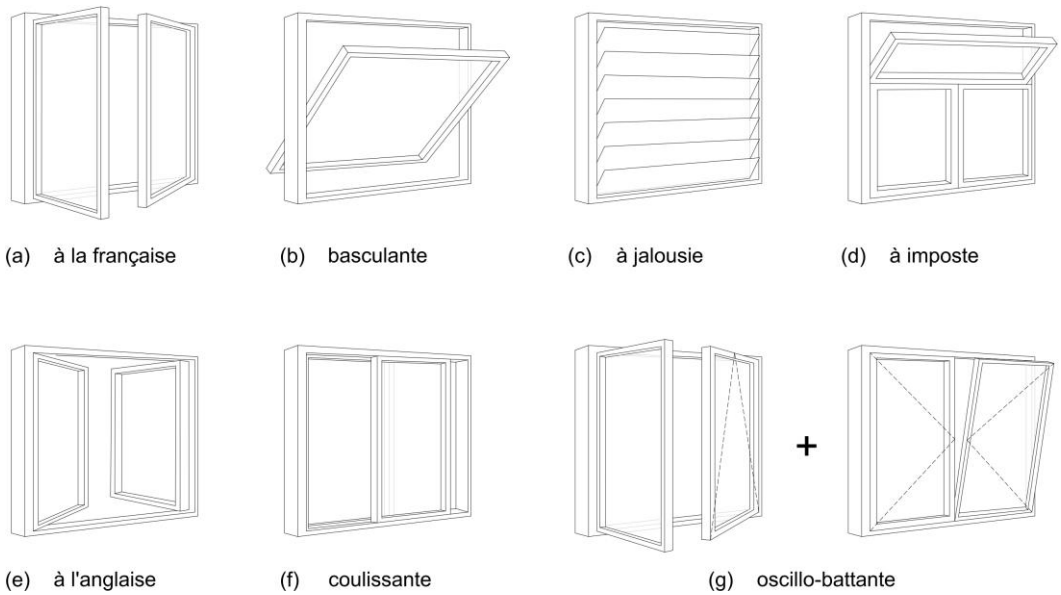


FIGURE 4.25 : *Différentes typologies d'ouverture des fenêtres*
de l'auteur

L'ouverture en journée est la pratique la plus défavorable pour le confort thermique. Si le pourcentage d'ouverture est réduit, le confort est dégradé de 1,34 % quand la fenêtre a une ouverture à jalousie et de 2,12 % quand l'ouverture est à imposte (*Figure 4.26*). *(LOCKTON, HARRISON, et STANTON, 2008)* présentent différentes méthodes permettant de créer des objets rendant l'utilisateur plus responsable au niveau énergétique. Ils présentent notamment le concept d'affordance développé par *(GIBSON, 1979)*. Ce concept se base sur la capacité que possède un objet à suggérer sa propre utilisation. En conséquence, un utilisateur, ici l'occupant, peut avoir un comportement différent en fonction des caractéristiques d'un même objet, ici la fenêtre. La mise en place d'un nouveau type de fenêtre peut alors avoir un impact sur le comportement des occupants. Aidé par une démarche de sensibilisation, on peut ainsi supposer que le changement de typologie d'ouverture de la fenêtre peut modifier les pratiques. La mise en place d'un dispositif améliorant plusieurs paramètres (ici, la ventilation, l'anti-intrusion, la réduction de l'encombrement intérieur) peut générer une ouverture continue (24h/24h) de cette nouvelle fenêtre. Cette pratique réalisée avec une fenêtre avec une ouverture à jalousie permet de réduire l'inconfort (le DHI_{+3}) de 61,1 % alors qu'avec une fenêtre à imposte il est seulement réduit de 41,3 % ce qui montre l'importance d'une surface d'ouverture suffisamment grande (*Figure 4.26*).

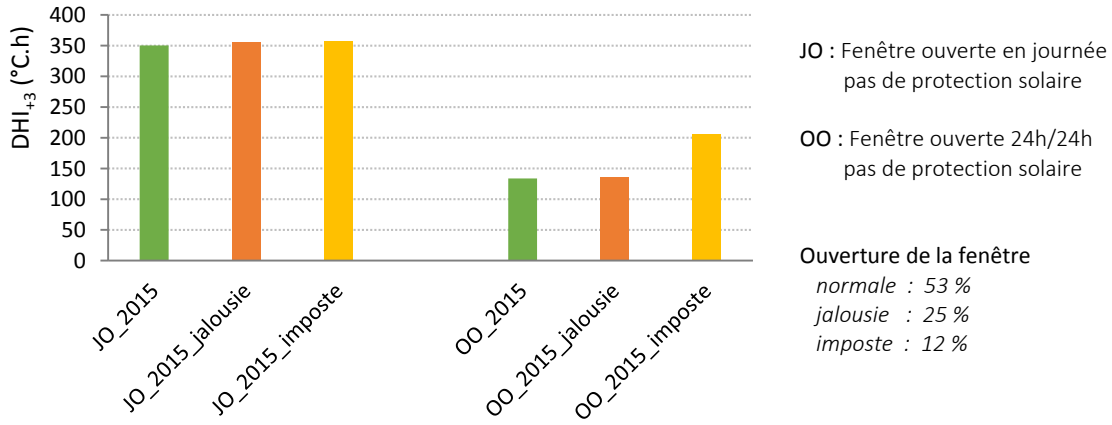


FIGURE 4.26 : *Impact sur le DHI_{+3} de différentes menuiseries avec peu d'encombrement dans l'espace habité pendant les trois jours les plus chauds de 2015 (du 19 au 21 juillet)*
de l'auteur

Nous avons jusqu'à présent imaginé des solutions pour une mono-orientation de la fenêtre. Or, la configuration des bâtiments étudiés nous permet de mettre en place une solution de ventilation naturelle par balayage transversal. En effet, comme nous l'avons indiqué paragraphe *I.2.1 de ce chapitre*, la cuisine, l'entrée et le séjour communiquent et leurs portes sont très souvent ouvertes (*Figure 4.27*).

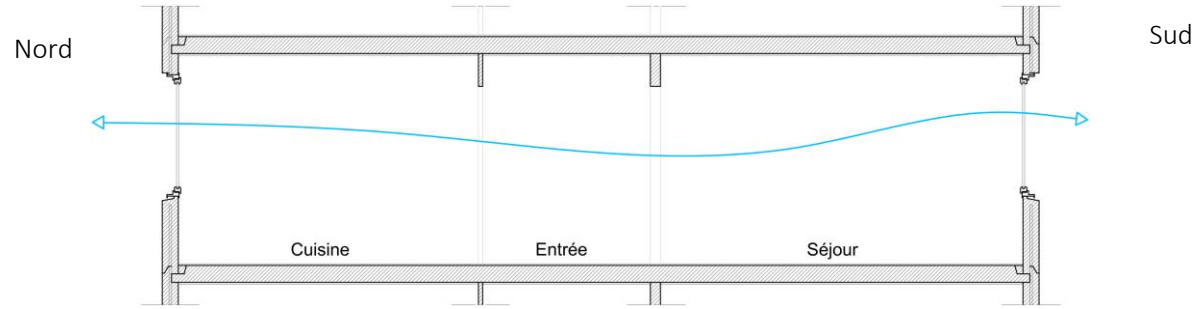


FIGURE 4.27 : *Mise en place d'une ventilation naturelle par balayage transversal*
de l'auteur

Afin d'étudier l'impact sur le DHI_{+3} de différents pourcentages d'ouverture de la fenêtre, nous traçons sur la *figure 4.28* le DHI_{+3} en fonction du pourcentage d'ouverture de la fenêtre exposée Sud (en abscisse) et de celle exposée Nord (en légende). On observe, pour une ventilation avec une seule orientation (en orange sur le graphique), qu'à 35 % d'ouverture de la fenêtre au Sud, l'inconfort se stabilise autour de 100 °C.h. Au-delà de ce pourcentage, l'ouverture de la fenêtre ne permet pas de réduire de manière significative l'inconfort. On remarque également, que l'ouverture d'une seule fenêtre au Nord de 10 % ou 20 % permet de réduire davantage l'inconfort que l'ouverture de la fenêtre Sud (respectivement de 28,4 % et 10,8 % pour chaque pourcentage d'ouverture). Enfin, on observe également que la ventilation naturelle à balayage transversal permet de réduire l'inconfort. Cependant, à partir de 35-40 % d'ouverture de la fenêtre Sud, on observe que l'ouverture d'une seule fenêtre permet d'atteindre un meilleur confort qu'une ouverture à balayage transversal. Cela peut être expliqué par le fait que, l'ouverture étant continue, le taux de renouvellement d'air important en journée fait augmenter la température intérieure. Les calories sont alors stockées dans les parois par effet d'inertie. La nuit, le rafraîchissement passif possible est déjà maximal ce qui explique l'inconfort observé.

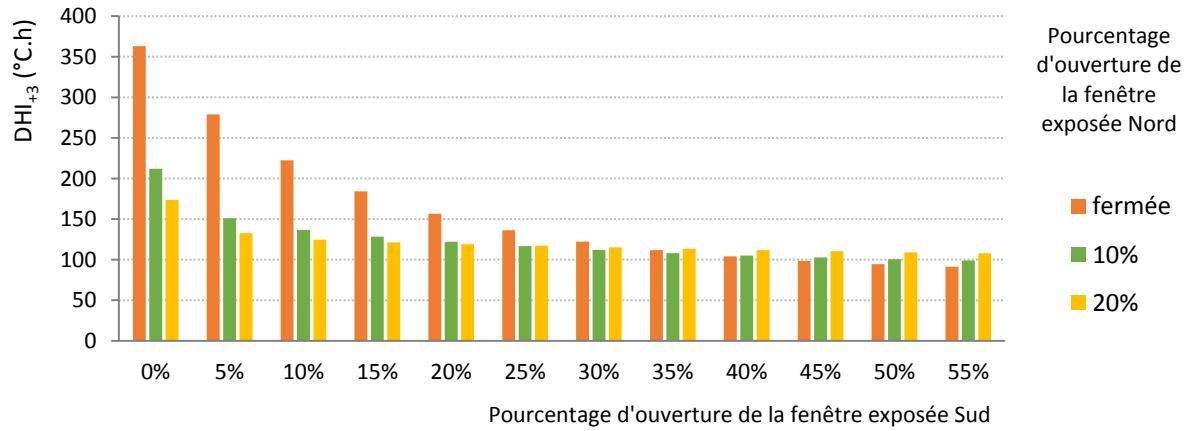


FIGURE 4.28 : *Impact sur le DHI_{+3} de la mise en place d'une ventilation par balayage transversal et de différents pourcentages d'ouverture continue des deux fenêtres lors des trois jours les plus chauds de 2015 (du 19 au 21 juillet)*
de l'auteur

L'analyse précédente permet de valider l'intérêt de modifier la typologie des baies malgré la mise en place d'une ventilation à balayage transversal. Sur la *figure 4.29*, ce type de ventilation permet de réduire l'inconfort d'environ 5 % dans le cas d'une ouverture en journée quelle que soit la typologie de la fenêtre. Si l'ouverture est continue, une fenêtre à imposte permet de réduire de 36 % l'inconfort alors que pour la fenêtre avec ouverture à la française ou à jalousie, il n'est réduit que de 18 %.

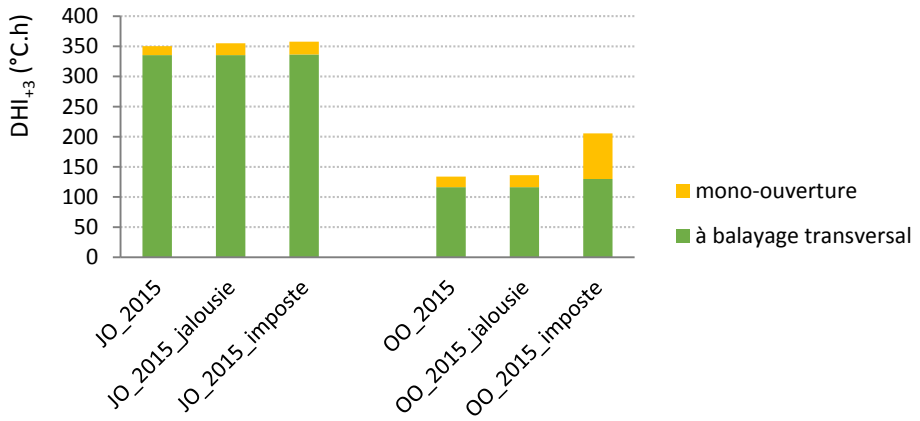


FIGURE 4.29 : *Impact sur le DHI_{+3} de la mise en place d'une ventilation par balayage transversal avec différentes menuiseries avec peu d'encombrement dans l'espace habité lors des trois jours les plus chauds de 2015 (du 19 au 21 juillet)*
de l'auteur

III.2.1.3. Façade double peau

La façade double peau permet de créer un espace tampon entre la façade existante et celle créée en ajoutant une paroi vitrée devant la façade existante. Au cours de sa thèse *(ARANTES, 2013)* développe le principe de « Core-Skin-Shell » basé sur l'ajout d'une façade double peau à un bâtiment existant. Elle montre ainsi que ce système qui permet de diminuer les consommations énergétiques en hiver. Cependant, en été, des surchauffes peuvent apparaître notamment si l'espace entre le bâti et la façade vitrée n'est pas ventilé et que cette dernière n'est pas abritée par des protections solaires adaptées. *(R.A.G.E., 2014)* présente différentes dispositions constructives de façade double peau ventilée sur l'extérieur.

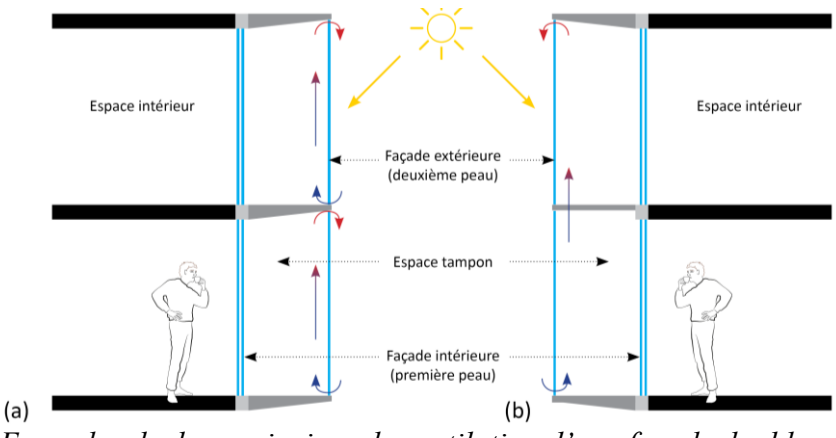


FIGURE 4.30 : *Exemples de deux principes de ventilation d'une façade double peau (a) sur un niveau et (b) sur plusieurs niveaux*

III.2.1.4. Végétalisation de la façade ou du pied de façade

La végétalisation de la façade permet de créer un microclimat plus frais en rafraîchissant l'air par évapotranspiration. Comme l'être humain, les plantes maintiennent leur température grâce à la transpiration. Pour que cette eau excédentaire soit évaporée, elle a besoin de calories supplémentaires qu'elle trouve dans son environnement immédiat. La température ambiante diminue alors et un microclimat plus frais est créé. Lorsque la végétation est située proche des bâtiments et notamment près des ouvrants, la ventilation par ouverture des fenêtres permet de rafraîchir les espaces habités.

De même, la végétalisation du pied de façade permet, d'une part, de créer ce microclimat et, d'autre part, de réduire la chaleur absorbée par le sol. En effet, un sol goudronné absorbe la chaleur et la libère à la tombée de la nuit ralentissant ainsi la chute de la température ambiante. Le rafraîchissement nocturne est alors moins efficace puisque la température extérieure reste élevée. Par contre, un sol de couleur claire ou végétalisé, réfléchit le rayonnement solaire ce qui limite l'absorption de la chaleur et l'augmentation nocturne de la température qui en découle. Le rayonnement réfléchi en journée l'est dans toutes les directions. Il a donc un faible impact sur les apports solaires au niveau de la façade.

La végétalisation de l'environnement des bâtiments est une technique efficace pour rafraîchir les espaces *(SALOMON et AUBERT, 2004)*. Cependant, Pléiades+COMFIE ne prend pas en compte l'humidité de l'air dans ses calculs et n'en permet donc pas l'analyse.

III.2.1.5. Matériaux innovants : matériaux à changement de phase

Pour limiter l'inconfort, les industriels développent des matériaux innovants capables d'absorber de la chaleur et de la restituer quand la température diminue. Ce sont les matériaux à changement de phase (M.C.P.) : c'est-à-dire qu'ils changent d'état physique (solide-liquide et inversement) à partir d'une température donnée. Une partie de la chaleur accumulée au sein du logement est absorbée par le matériau lorsque la température ambiante dépasse la température de fusion (la journée dans un bâtiment en été). Elle est restituée lorsque la température ambiante descend en dessous de la température de solidification (la nuit en été).

Pour que le changement d'état opère, il faut que le mur sur lequel le matériau à changement de phase est placé ait une température qui évolue. Sur notre modèle nous le positionnons donc sur la façade extérieure puisque les autres parois sont définies comme adiabatiques. Nous testons deux types de matériaux à changement de phase : l'un dont la température de fusion est de 23 °C (M.C.P. à 23°C) et le second dont la température de fusion est de 28 °C (M.C.P. à 28 °C). L'analyse de la *figure 4.31* montre que la mise en place des deux matériaux à changement à phase améliore l'ambiance thermique (de 1,87 % avec le M.C.P. à 23 °C et de 1,88 % avec le M.C.P. à 28 °C) lorsque le comportement de l'occupant est qualifié de « contre-productif », mais par contre la dégrade (respectivement de 13,10 % et de 11,09 %) lorsque le comportement est qualifié d'« expert ».

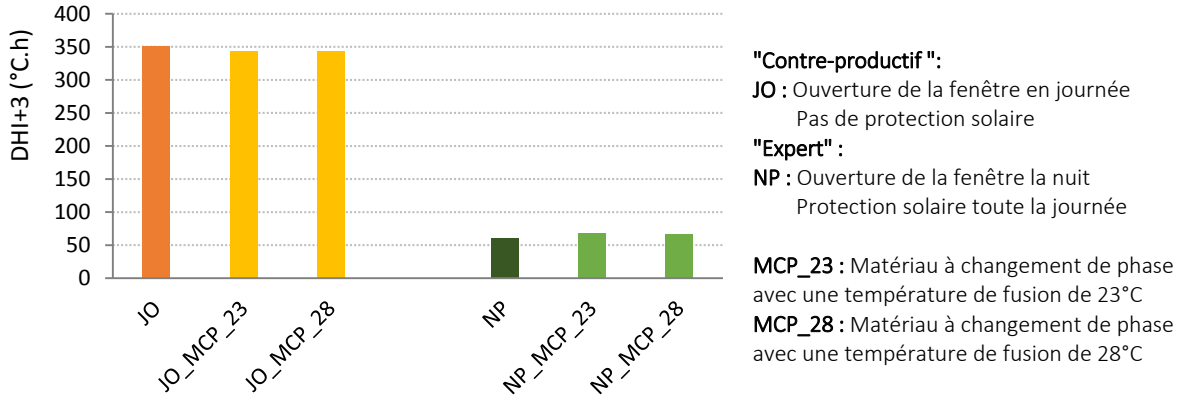


FIGURE 4.31 : *Impact de l'utilisation de deux types de matériaux à changement de phase sur le DHI_{+3} sur les trois jours les plus chauds de 2015 (du 19 au 21 juillet)*
de l'auteur

L'analyse de la *figure 4.32* montre que la mise en place du M.C.P. à 23°C dégrade de 0,1 °C en journée la température intérieure. L'usage du M.C.P. à 28 °C montre que lorsque la température intérieure descend en dessous de 28 °C la nuit, la température intérieure est inférieure à celle produite sans mise en place de ce matériau. Cependant, dès que la température ne descend plus en dessous du seuil des 28 °C, les conditions thermiques sont dégradées comme avec le M.C.P. à 23 °C.

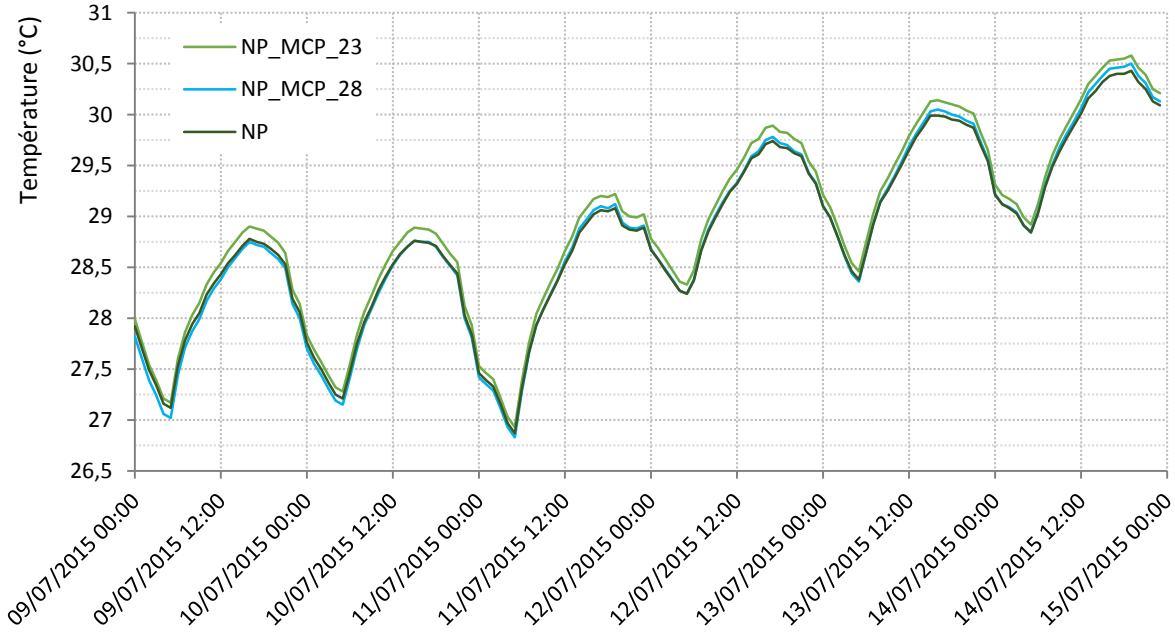


FIGURE 4.32 : *Évolution des températures intérieures sur six jours avec les deux matériaux à changement de phase envisagés*
de l'auteur

Cette analyse montre que ce type de matériau n'améliore que faiblement l'ambiance thermique des logements étudiés et peut même la dégrader. En effet, on observe que dès que la température de fusion est atteinte et que les températures ne passent plus en dessous de ce seuil, les températures intérieures sont dégradées. On peut expliquer ce phénomène par le fait que la paroi en béton absorbe davantage la chaleur que le M.C.P.. Ce dernier présente des propriétés isolantes qui réduisent alors l'inertie de la paroi. Dans notre cas, ce genre de matériau ne semble pas adapté car nous avons déjà une forte inertie. Cependant, dans le cas de bâtiments avec une faible inertie, leur étude est à reconsidérer.

III.2.2. Approche multi-confort

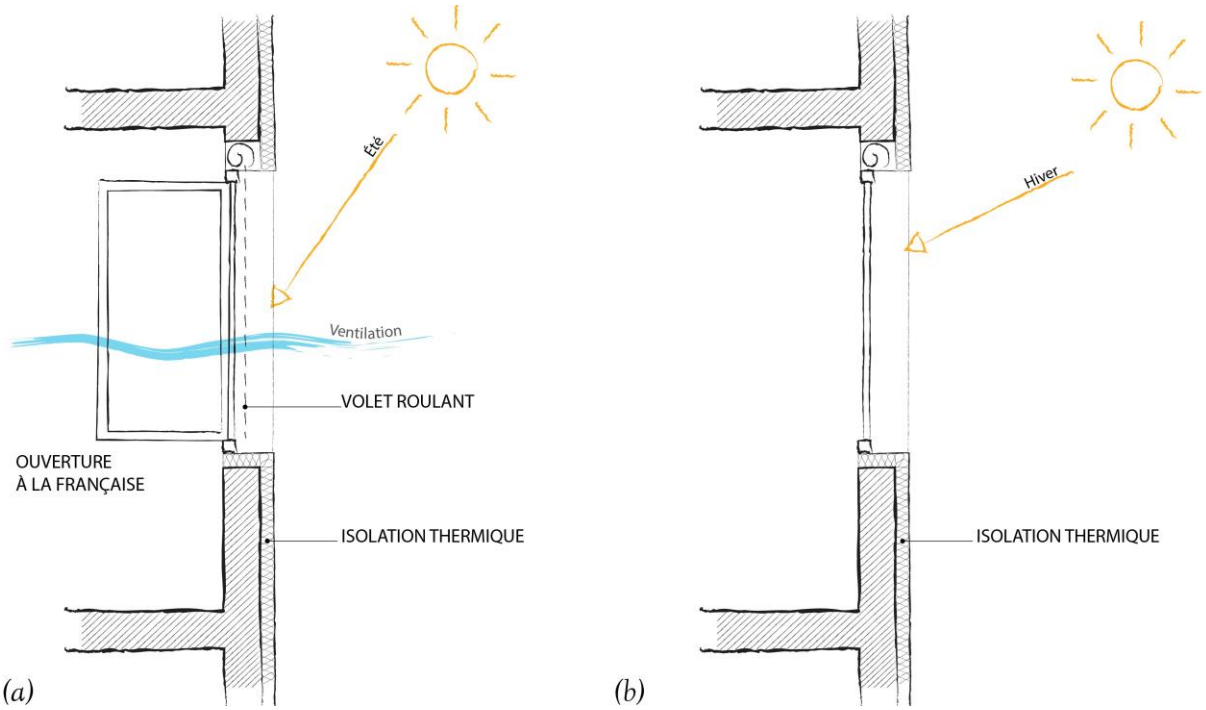
Les analyses monocritères précédentes montrent bien que c'est par une combinaison de dispositifs que l'on pourra atteindre le confort thermique optimal au sein des logements. Cependant, plus qu'une succession d'éléments, c'est une analyse systémique de la façade qui est nécessaire afin d'arbitrer les choix architecturaux. *(CAZEAUX, MORAIN, et DESÈVEDAVY, 2015)* définissent sur la base d'entretiens semi-directifs que l'utilisation des fenêtres et des protections solaires dépend de différents facteurs qui ont également été cités par les locataires des appartements investigués lors des visites bimensuelles à leur domicile : le confort lumineux, la perte de lien direct et visuel avec l'extérieur, l'intrusion d'insectes, le cambriolage, les nuisances olfactives et la perte d'intimité.

Les choix de conception (en neuf ou en rénovation) ont un fort impact sur les conforts mais aussi sur les pratiques des occupants. Pour répondre à chacun des problèmes précédemment cités, l'objectif n'est pas de mettre en place une accumulation d'éléments architecturaux mais de concevoir un ensemble architectural homogène. Ainsi un même dispositif peut avoir plusieurs fonctions : un volet permet par exemple de se protéger des apports solaires, de moduler le taux de ventilation naturelle ou d'apporter de l'intimité aux locataires. Afin d'analyser, d'une manière sensible, les solutions proposées, nous proposons de les étudier suivant les différents critères suivants.

- Le confort thermique
- L'action de l'occupant
- Le confort lumineux
- Le confort acoustique
- L'encombrement intérieur
- L'intimité
- L'anti-intrusion
- L'anti-nuisible
- Le confort olfactif

III.2.2.1. Analyse sensible de l'existant

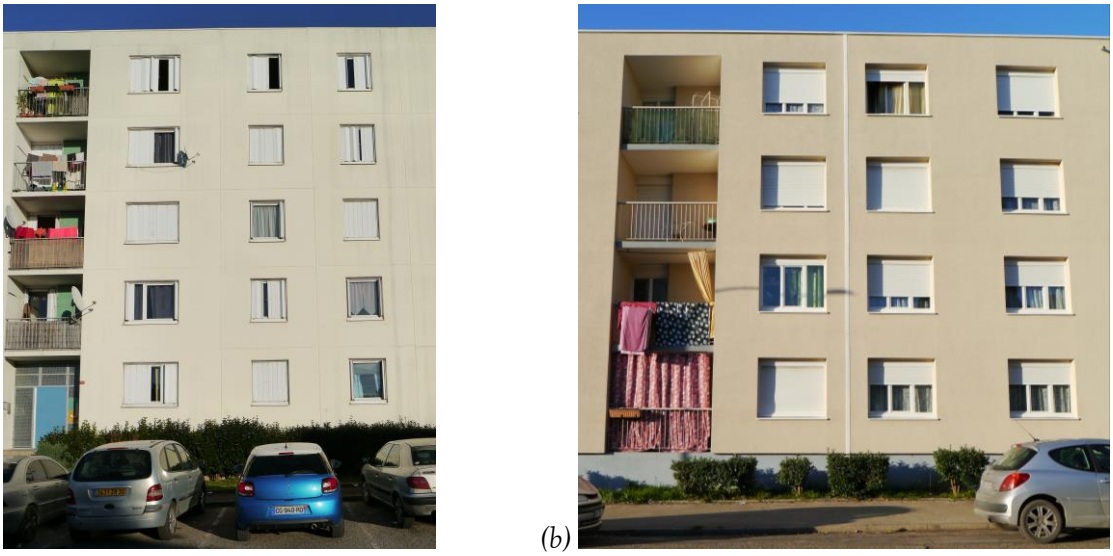
Nous avons jusqu'ici principalement étudié la relation entre les actions de l'occupant et le confort thermique. Les analyses précédentes des deux résidences ont montré que si l'occupant veut optimiser son confort thermique, il doit mettre en place un usage « expert » de sa fenêtre et de son volet en fonction des saisons (*Figure 4.33*). En été, l'inconfort observé, quel que soit l'occupant, témoigne de la difficulté à avoir un comportement « expert ». En règle générale, l'occupant cherche également à se protéger du bruit extérieur à son appartement. En été, la fenêtre devant rester ouverte pour permettre de ventiler (notamment la nuit) s'il y a du bruit dans la rue, l'inconfort acoustique peut facilement apparaître. La fenêtre sera alors refermée, empêchant le rafraîchissement nocturne. Lors des visites bimensuelles, certains locataires se sont également plaints du fait que l'intérieur de leur appartement pouvait être observé depuis l'extérieur. Pour l'éviter, deux stratégies ont été mises en place par les locataires : la fermeture des volets même en plein hiver ou l'installation de voilages. Ces derniers participent alors à atténuer l'éblouissement que peut générer le rayonnement direct du soleil. De plus, les fenêtres actuelles s'ouvrent à la française mais aucun dispositif n'est mis en place pour limiter l'intrusion d'insectes ou de cambrioleurs. Dans de nombreux appartements, les locataires ont positionné du mobilier sur le pourtour de leur séjour y compris sous les fenêtres. L'ouverture des deux vantaux génère alors un encombrement de l'espace intérieur.



(a) (b)

FIGURE 4.33 : *Croquis en coupe de la solution existante pour (a) l'été et (b) l'hiver*
de l'auteur

Au début de ce paragraphe (cf. *III.2 de ce chapitre*) nous expliquons que de nombreuses rénovations consistent en la pose d'une isolation thermique par l'extérieur généralement couplée avec la mise en place d'une V.M.C.. Ces choix conduisent à un nouveau dessin de la façade, c'est notamment le cas des bâtiments étudiés. En effet, la résidence non-isolée (*Figure 4.34.a*), malgré une façade au dessin assez simple, présente une écriture spécifique grâce à la présence des joints des panneaux préfabriqués qui disparaissent totalement lors de la pose de l'isolation thermique par l'extérieur (*Figure 4.34.b*).



(a) (b)

FIGURE 4.34 : *Photographie d'une façade (a) de la résidence non-isolée et (b) de la résidence isolée*
de l'auteur

III.2.2.2. Analyse sensible de solutions bioclimatiques

La mise en place de solutions architecturales bioclimatiques conduit, d'une part, à une meilleure prise en compte des conforts et, d'autre part, à une nouvelle expression de la façade. Nous définissons, ici, trois solutions permettant d'améliorer les conforts au sein des logements. Cependant, il existe aujourd'hui de nombreux livres sur l'architecture bioclimatique détaillant des solutions peu consommatrices d'énergie permettant d'atteindre le confort thermique *(IZARD et MILLET, 1993 ; SALOMON et AUBERT, 2004 ; WRIGHT et COOK, 2004 ; OLIVA et COURGEY, 2006 ; FERNANDEZ et LAVIGNE, 2009 ; LÉVY, 2010 ; ARENE et I.C.E.B., 2014; etc.)*. Il ne s'agit donc pas de réaliser une liste exhaustive des solutions bioclimatiques possibles mais bien de points de départs pour une réflexion globale afin de proposer aux occupants les conditions optimales leur permettant d'atteindre le confort, notamment thermique, sans qu'ils aient une connaissance précise des usages « experts » de la fenêtre et du volet. Les trois dispositifs proposés sont principalement étudiés en coupe pour comprendre les relations entre intérieur et extérieur car comme le dit l'architecte Philippe MADEC « *Dans la conception bioclimatique des architectures, il y a une prédominance de la coupe plutôt que de la façade dans le projet, de la façade qui s'imagine en section, plutôt qu'en élévation, proportion et harmonie, elle devient peau, membrane, lieu de l'osmose* » *(MADEC, 2015)*.

III.2.2.2.a. L'objet fenêtre

Une première solution consiste à modifier la typologie de la fenêtre et celle du volet. À l'heure actuelle, les fenêtres s'ouvrent à la française. Or son changement pour une fenêtre à ouverture oscillo-battante ou à imposte peut proposer aux occupants une ouverture continue de leur fenêtre tout en réduisant l'encombrement intérieur et en proposant les conditions de sécurité suffisantes pour les enfants. Aujourd'hui, quand le volet est ouvert, la fenêtre n'est plus protégée des apports solaires en été. La mise en place d'un volet à projection permet de profiter de la luminosité naturelle tout en se protégeant des apports solaires. Cette solution permet ainsi de minimiser l'impact d'un comportement « contre-productif » des occupants en proposant une protection solaire même lorsque le volet est laissé ouvert. De plus, la protection solaire réduit le rayonnement direct et donc améliore la luminosité en favorisant le rayonnement diffus pour éclairer l'intérieur de l'appartement. La ventilation est augmentée grâce à une ouverture créée au-dessus de la fenêtre tout en limitant l'inconfort acoustique, grâce à la mise en place de matériaux absorbants. Pour l'hiver, un clapet positionné à l'intérieur permet de refermer cette ouverture en fin d'été pour réduire la ventilation. Grâce à ce dispositif, la ventilation est possible tout en se protégeant de l'intrusion (de cambrioleurs ou d'insectes). Cependant, cette solution n'apporte pas de solution particulière pour proposer une meilleure intimité aux locataires vis-à-vis de l'extérieur.

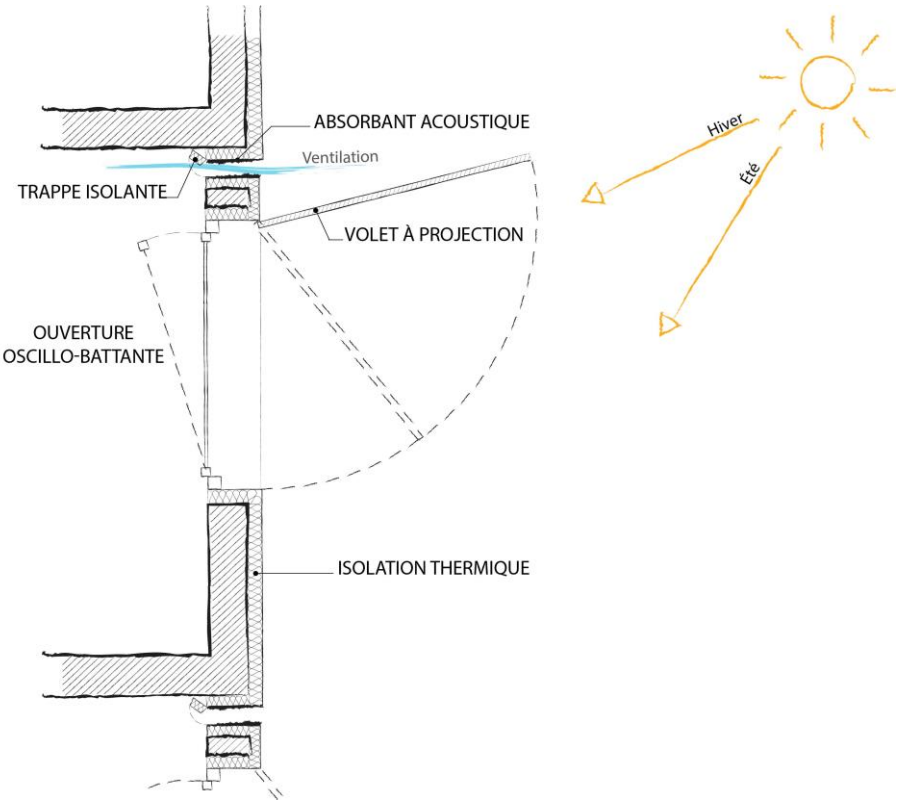


FIGURE 4.35 : *Croquis en coupe de la solution « objet fenêtre »*
de l'auteur

La solution présentée peut également être déclinée suivant différentes possibilités notamment celle présentée sur la *figure 4.36*. En effet, les impacts sont similaires pour le confort thermique mais peuvent varier pour les autres conforts. Le concepteur devra ensuite choisir la solution adaptée pour chaque projet.

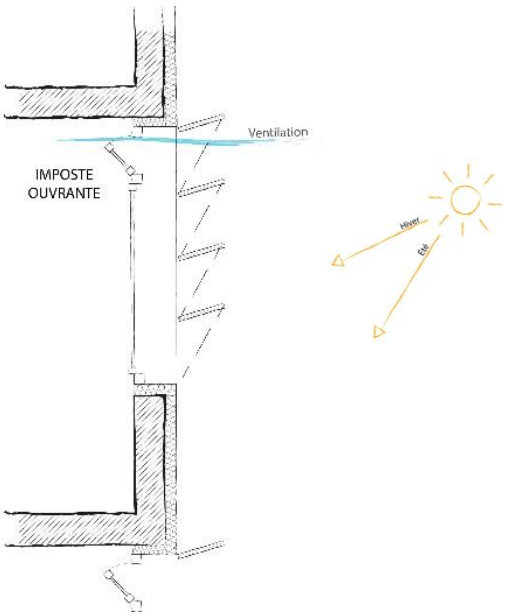


FIGURE 4.36 : *Solution alternative permettant de limiter l'inconfort thermique*
de l'auteur

III.2.2.2.b. L'objet fenêtre végétalisée

Une deuxième solution consiste à mettre en place une tablette au niveau de l'appui de la fenêtre de l'appartement situé à l'étage N soutenue par des câbles. En été, elle fait de l'ombre à la fenêtre située à l'étage N-1 ; en hiver, sa dimension permet de profiter au maximum des apports solaires. La tablette peut également être le support pour des jardinières à partir desquelles des plantes peuvent grimper sur les câbles de soutien. La présence de végétation permet de proposer un microclimat plus frais, grâce au phénomène d'évapotranspiration, permettant ainsi de rafraîchir davantage l'appartement lorsqu'une ventilation naturelle, par l'ouverture de la fenêtre ou par le dispositif placé au-dessus de la fenêtre, est mise en place (*Figure 4.37*).

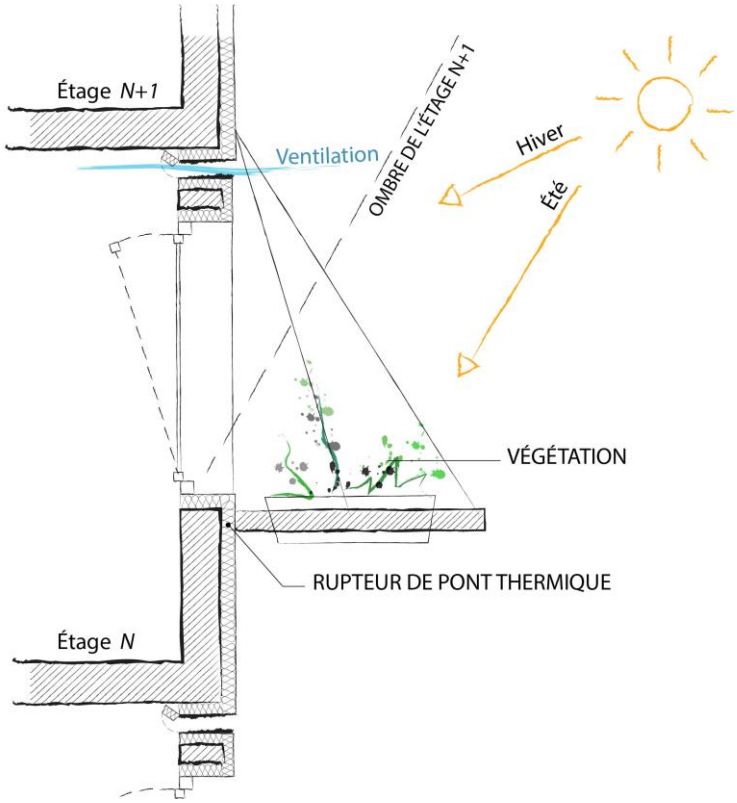


FIGURE 4.37 : *Croquis en coupe de la solution « objet fenêtre végétalisée »*
de l'auteur

Cette solution fait référence à l'immeuble Tower Flower de l'architecte Édouard FRANÇOIS (*Figure 4.38*). Ici, les jardinières servent de garde-corps pour les terrasses. Pour que le système de plantations fonctionne, notamment en milieu méditerranéen, une réflexion sur l'arrosage doit tout de même être mise en place. Mais cette sensibilisation peut également passer par une démarche volontariste pour aider les locataires au développement de ce concept. Aujourd'hui, différentes initiatives pour végétaliser la ville ont vu le jour. Nous pouvons citer les programmes « Embellissons nos murs » à Rennes ou « Mettons nos murs au vert » à Troyes[10] qui encouragent les habitants à planter des plantes sur une petite partie des trottoirs afin de remettre de la végétation au cœur des villes.

[10] http://jardinons-ensemble.org/spip.php?article1216



FIGURE 4.38 : *Photographie de l'immeuble Tower Flower d'Édouard FRANÇOIS, Paris de l'auteur*

Dans cette solution, l'action de l'occupant pour réduire son inconfort thermique est minimale. En effet, la protection solaire est assurée par le système de casquette fixe et la ventilation par le même dispositif que pour la solution précédente. L'occupant doit alors ouvrir le système de ventilation mis au-dessus de sa fenêtre en début d'été et le refermer en fin d'été. Cependant, l'arrosage des plantes est un élément essentiel qui, s'il n'est pas automatisé, peut engendrer de vraies contraintes pour l'occupant. Suivant la position du soleil, les plantes peuvent également créer un filtre qui permet de réduire le rayonnement direct et donc favoriser l'éclairage naturel diffus ce qui améliore le confort lumineux au sein des logements notamment en été. La présence de la végétation et de la tablette réduit le champ de vision à l'intérieur des logements. L'intimité est donc augmentée permettant aux locataires de limiter l'usage des volets notamment la nuit, période où l'intérieur d'un appartement est visible notamment lorsque la lumière est allumée. La présence de végétation augmente potentiellement le nombre d'insectes. En été, si l'occupant n'utilise que le système de ventilation placé au-dessus de sa fenêtre, nous pouvons supposer que la solution proposée permet une bonne protection contre les nuisibles. Ce système, constitué d'un matériau absorbant, permet également de diminuer l'impact des nuisances sonores extérieures. Dans cette solution, le choix du type de fenêtre n'est pas le plus important. Cependant, la mise en place d'une fenêtre oscillo-battante permet, comme pour la solution précédente, de proposer aux occupants un dispositif d'ouverture permettant, d'une part, de se protéger des intrusions mais, d'autre part, de laisser la fenêtre ouverte sans que les vantaux empiètent sur l'espace intérieur et génèrent un inconfort, notamment si du mobilier est positionné sous la fenêtre.

III.2.2.2.c. L'objet ventilation renforcée

Nous avons vu précédemment que la ventilation naturelle permet de réduire de manière significative l'inconfort. Pour cela, nous proposons de mettre en place une cheminée solaire qui permet d'augmenter la ventilation naturelle par tirage thermique.

Grâce à la mise en place d'une casquette au-dessus de la fenêtre, nous ajoutons une paroi lourde permettant le stockage thermique devant laquelle est placé un vitrage (*Figure 4.39*). Le rayonnement solaire direct sur cette partie vitrée permet de réchauffer la paroi située derrière qui stocke alors des calories. L'air à l'intérieur de la cheminée se réchauffe et s'allège. En s'élevant, il augmente extraction de l'air chaud situé dans le logement. Une ouverture en partie basse sur la façade opposée est alors nécessaire afin que le tirage thermique soit optimal.

L'action de l'occupant est minimale. En effet, cet élément permet de protéger la fenêtre des apports directs du soleil en été et d'augmenter la ventilation naturelle. Cependant, en hiver, l'occupant doit refermer la trappe isolante. De plus, cette solution réduit les apports solaires, à moins que la casquette soit inclinée à 30° (cf. *III.2.1.1 de ce chapitre*), les besoins de chauffage sont alors légèrement augmentés. En été, la typologie du volet ou de la fenêtre n'a plus un impact aussi fort que pour la première solution proposée. Ce dispositif réduit l'inconfort acoustique dû aux nuisances extérieures et l'intrusion des insectes ou des cambrioleurs car la fenêtre n'a pas besoin d'être ouverte pour créer une ventilation.

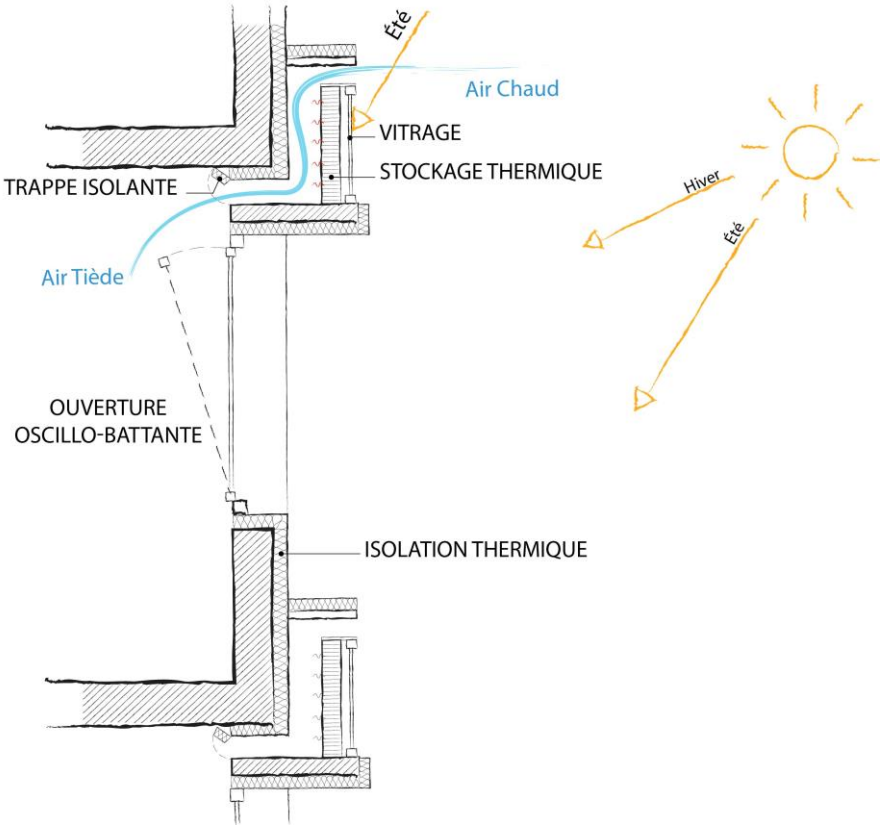


FIGURE 4.39 : *Croquis en coupe de la solution « objet ventilation aidée » de l'auteur*

Cette solution permet de proposer une nouvelle écriture architecturale de la façade. Cependant, la ventilation naturelle est surement l'élément le plus complexe à mettre en place au sein des logements, notamment en rénovation, à cause des réglementations qui imposent des débits et des sens de circulation des flux d'air (entrée d'air dans les pièces à vivre et extraction dans les pièces humides) *(ARENE et I.C.E.B., 2012)*. Des tests sur la forme, la surface et la hauteur de la cheminée solaire sont alors nécessaires. Toutefois, la solution présentée ici semble ne pas pouvoir être mise en œuvre en l'état car elle inverse les flux de ventilation. On peut alors imaginer de positionner ce dispositif en toiture et profiter des gaines techniques situées entre la cuisine et la salle de bain pour placer les gaines d'extraction. Dans ce sens, l'architecte Philippe MADEC a développé des tourelles à vent positionnées en toiture alliant tirage thermique par un capteur solaire et mise à profit des vents (*Figure 4.40*). Cette solution est largement détaillée dans *(ARENE et I.C.E.B., 2012)*. Il s'agit, en France, d'une démarche pionnière permettant une ventilation naturelle des logements.



FIGURE 4.40 : *Logements collectifs, Saint Nazaire (44), atelier Philippe MADEC architecture (a) vue générales des toitures avec des tours à vents (b) détail d'une tour à vent. Source : http://www.atelierphilippemadec.fr/architecture/logements-collectifs/96-logements-mixtes-_-thpe-enr-bbc-et-vnac.html*

III.2.3. Impact sur le confort en fonction des modèles comportementaux des occupants

Les trois solutions précédentes ne peuvent malheureusement pas être toutes simulées avec le logiciel choisi car l'humidité n'y est pas prise en compte et qu'il faut définir les ventilations internes entre le séjour et le volume de la cheminée solaire. Nous nous concentrons donc ici sur une analyse du confort thermique d'été après la mise en place de l'« objet fenêtre ».

Nous avons vu au cours de ce chapitre (cf. *III.1.1* et *III.2.1.1*) que l'occultation des fenêtres permet de réduire les apports solaires et donc l'inconfort d'été. Dans un premier temps, les simulations ont été réalisées en changeant la typologie du volet. En été, son impact chez chaque modèle d'occupant est observable sur la *figure 4.41*. Les mesures de l'appartement I-SN-1-A étant partielles, nous n'étudions pas ses données. L'analyse montre que le changement du type de volet permet de réduire l'inconfort thermique d'été chez tous les locataires. Cependant, en fonction des pratiques, l'impact est plus ou moins accentué.

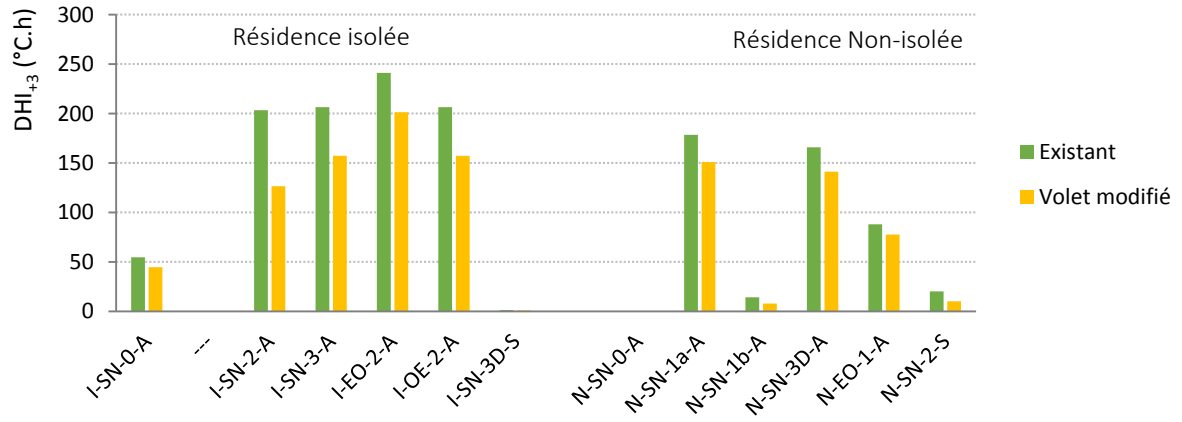


FIGURE 4.41 : *Impact sur le DHI+3 de la période estivale de 2014 (juin à août) du changement du type de volet*
de l'auteur

En hiver, la mise en place de cette typologie de volet a peu d'impact sur les besoins de chauffage permettant d'atteindre la limite basse de température de confort (T_{C-3}) (*Figure 4.42*). Le choix de la typologie du volet ou des protections solaires à mettre en place est donc un des éléments essentiels pour limiter l'inconfort thermique tout en palliant le comportement des occupants.

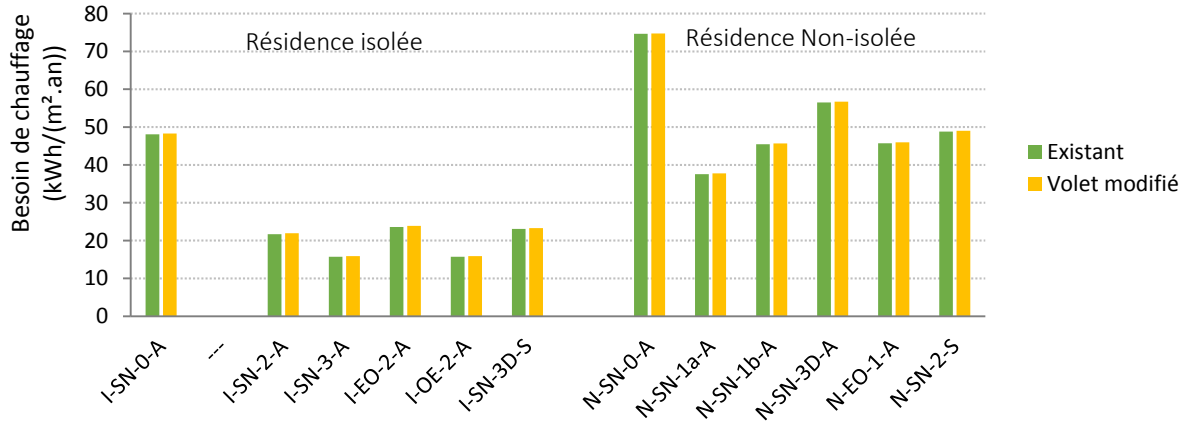


FIGURE 4.42 : *Besoin de chauffage pour atteindre la température de confort minimal T_{C-3} pour l'existant et pour la modification de la typologie du volet*
de l'auteur

Suite à cette analyse sur la typologie des volets, nous modifions la typologie d'ouverture des fenêtres afin de proposer une ouverture supplémentaire en imposte comme dessiné sur la *figure 4.35*. Sur la *figure 4.43*, en orange, nous observons que la mise en place d'une ouverture de 5 % (soit 0,126 m²) sur la façade où donne la fenêtre du séjour améliore le confort chez tous les locataires sauf chez le locataire de l'appartement orienté Ouest (I-OE-2-A). De plus l'augmentation de l'ouverture à 10 % (soit 0,252 m², en violet sur la figure) ne permet de diminuer l'inconfort que faiblement par rapport à la dimension précédente. Dans l'appartement orienté Ouest, par contre, cette dimension d'ouverture permet de réduire l'inconfort. De plus, la mise en place d'une ventilation par balayage transversal (en bleu et gris sur la figure) peut engendrer une dégradation du confort en fonction des pratiques des occupants. C'est, par exemple, le cas pour les appartements I-SN-3D-S, N-SN-0-A, N-SN-1b-A et N-SN-2-S dont l'inconfort est absent ou faible. Pour ceux dont l'inconfort est élevé, la ventilation par balayage transversal n'a réellement d'impact que pour les appartements orientés Est ou Ouest dans la résidence isolée. Pour les autres appartements, les valeurs sont de l'ordre de celles observées avec une ouverture de 5%. Nous pouvons expliquer ces phénomènes par deux éléments. Tout d'abord, pour ceux dont l'inconfort est faible, l'ouverture en continu engendre un inconfort car si des pratiques d'ouverture nocturne sont mises en place, le fait d'ouvrir en plus en journée augmente les flux entre l'intérieur (plus frais en journée) et l'extérieur (plus chaud) générant alors une augmentation de la température intérieure (par exemple pour l'appartement I-SN-3D-S). Pour les appartements où l'inconfort est important, il semble que les fenêtres soient largement ouvertes or nous avons vu qu'à partir d'un certain seuil, la ventilation n'a plus d'effet, les températures intérieures et extérieures sont alors semblables. Il semble que ce seuil soit atteint dès la mise en place d'une ouverture de 5 %. Cependant, ces éléments sont à considérer avec précautions. En effet, avec ce logiciel, nous ne maîtrisons pas totalement les échanges qui sont réellement mis en place lors d'une ventilation mono-exposée ou à balayage transversal. Néanmoins, les différents ouvrages sur l'architecture bioclimatique, cités au *paragraphe III.2.2.2 de ce chapitre*, préconisent la mise en place de la ventilation par balayage transversal.

En hiver, par contre, le dispositif devant être refermé, les besoins de chauffage ne sont pas modifiés. Cependant, on peut supposer que l'étanchéité de ce dispositif n'est pas parfaite. Des infiltrations peuvent alors apparaître et augmenter les besoins de chauffage.

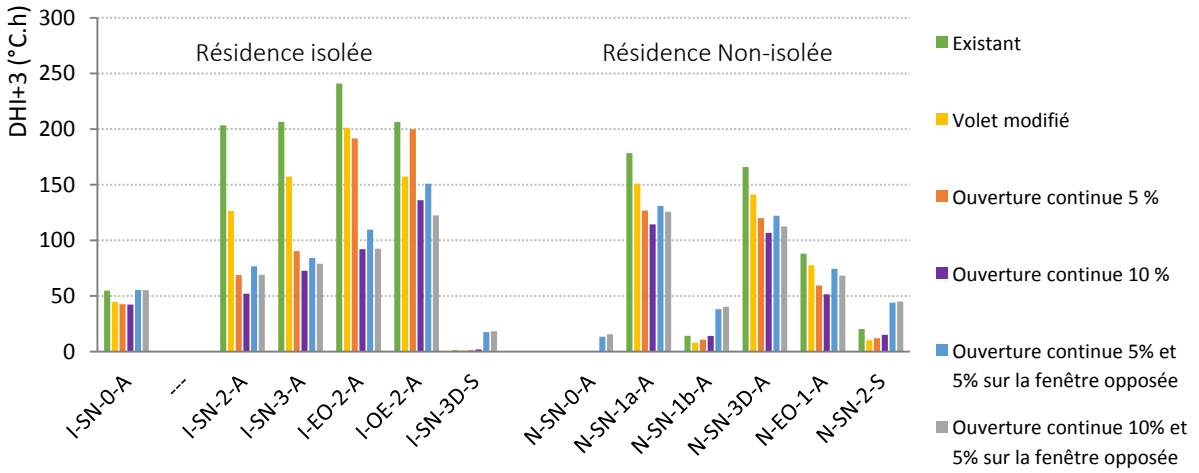


FIGURE 4.43 : *Impact sur le DHI_{+3} de la période estivale de 2014 (juin à août) de différentes solutions de ventilation*
de l'auteur

Il est clair que la modification des typologies de la fenêtre et du volet permet de diminuer l'inconfort au sein des appartements. Cependant, en effectuant ces changements, il faut garder en mémoire que les opportunités adaptatives de l'occupant se trouvant modifiées, il est alors probable que le comportement des occupants soit également modifié. Cependant cette analyse montre que le choix des dispositifs architecturaux est primordial pour offrir aux occupants les conditions nécessaires à leur confort thermique. L'inconfort pouvant, en effet, être diminué de moitié. C'est ensuite à l'architecte de choisir les solutions les plus adaptées à chaque projet.

Conclusion

La conception architecturale de bâtiments performants repose sur la réalisation de simulations de thermique dynamique. Pour cela trois paramètres sont nécessaires : la modélisation des caractéristiques constructives et techniques du bâtiment, les données météorologiques du site d'étude et les scénarios de comportement au pas de temps horaire. Les mesures ont montré que les différences de confort thermique et de consommations énergétiques sont liées aux pratiques des occupants. Nous définissons alors deux modules-appartements avec des caractéristiques similaires aux appartements étudiés. Les données météorologiques concernent les années 2014 (avec un été frais) et 2015 (avec un été chaud).

Aujourd'hui, les scénarios de la réglementation thermique se basent sur les pratiques d'un occupant idéal, d'un point de vue thermique, qui se protège des apports solaires avec ses volets et effectue un rafraîchissement passif en ouvrant sa fenêtre la nuit. Les études des pratiques des occupants (cf. *Chapitre 3*) nous ont permis de diagnostiquer une forte variabilité des usages de la fenêtre et du volet. Grâce à l'analyse des données nous avons déterminé un modèle comportemental composé de 32 typologies d'usage de la fenêtre et du volet. Après avoir validé la modélisation du module-appartement avec les scénarios issus des comportements réels, les simulations ont montré que les résultats issus des scénarios conventionnels sous-estiment le confort thermique. Nous proposons alors la simulation avec le modèle comportemental dont les résultats reflètent la réalité. L'objectif de ces travaux est donc de poser les bases pour améliorer les hypothèses de comportement de la réglementation thermique afin que les simulations conventionnelles reflètent davantage une réalité comportementale.

L'étude de ces typologies comportementales aide à la définition des actions permettant d'atteindre le confort thermique dans les logements. Sur la base des préconisations de l'architecture bioclimatique, nous proposons trois pistes de réflexion pour la mise en place de solutions architecturales simples palliant les comportements « contre-productifs » des occupants : l'« objet fenêtre » qui propose une nouvelle typologie de volet et de fenêtre dont la simulation valide l'amélioration du confort pour tous les occupants, l'« objet fenêtre végétalisée » qui crée un microclimat plus frais autour du bâtiment et l'« objet ventilation renforcée » qui propose d'augmenter la ventilation des logements en période estivale. Elles sont basées sur trois principes de base : séparer les fonctions afin que chaque élément réponde à une caractéristique spécifique du confort global, proposer des dispositifs aux manipulations simples ou inexistantes et définir une enveloppe qui évolue en fonction des saisons.

Aujourd'hui la réglementation thermique de l'existant n'impose pas la prise en compte du confort d'été. En conséquence dans de nombreux cas, une isolation thermique par l'extérieur et une V.M.C. sont mises en place afin de lutter contre la précarité énergétique mais elles peuvent engendrer des surchauffes en été. Loin de remettre en question l'intérêt de ces solutions, nécessaire en hiver (et dont la mise en œuvre en site occupé reste la plus simple), les solutions architecturales développées ici, proposent les conditions nécessaires pour atteindre le confort d'été, notamment en milieu méditerranéen, et redéfinissent l'expression architecturale de la façade.

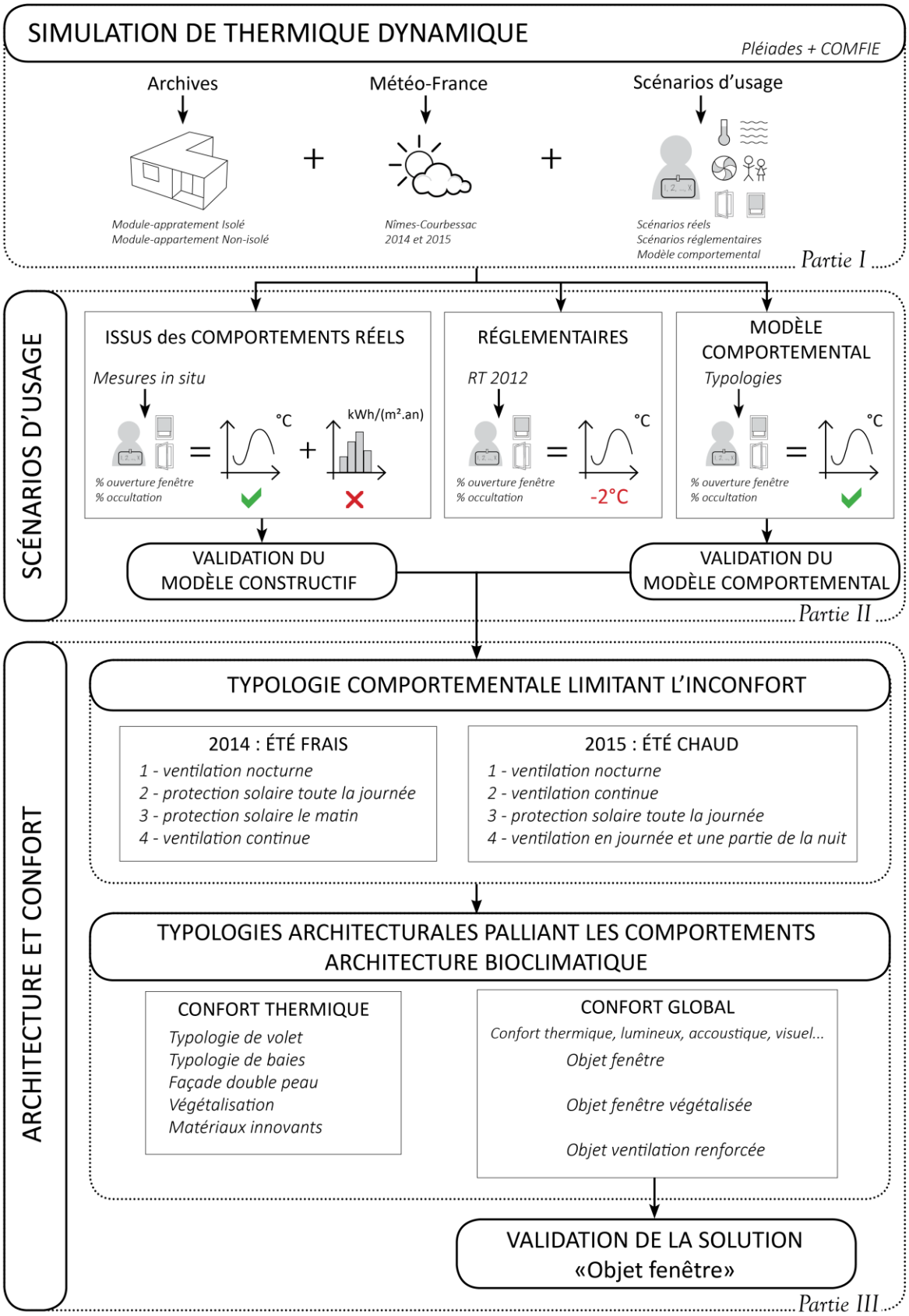


FIGURE 4.44 : *Schéma conclusion du chapitre 4 de l'auteur*

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

La conception en neuf ou en rénovation de bâtiments performants se base aujourd'hui sur des hypothèses idéalisées (bâtiment, météorologie, comportement des occupants). La comparaison entre les mesures *in situ* et les prévisions faites avec les logiciels de thermique dynamique montre, d'une part, de réels écarts de consommations énergétiques et, d'autre part, des dégradations du confort thermique notamment en été. Si plusieurs hypothèses concernant les matériaux ou leur mise en œuvre peuvent être avancées, nous avons montré que l'occupant y joue un rôle majeur. En conséquence deux actions principales peuvent être mises en place afin de limiter son impact : aider au changement de comportement ou proposer des solutions architecturales prenant en compte les pratiques (souvent « contre-productives ») des occupants.

L'étude bibliographique a mis en avant que le changement de comportements est un processus long qui nécessite une politique d'incitation aidée des compétences des sociologues. L'objectif de cette thèse est donc d'étudier les comportements des occupants afin de mettre en place une méthodologie permettant aux concepteurs d'avoir des pistes de réflexions pour proposer des solutions architecturales palliant les actions qui dégradent le confort thermique des occupants tout en limitant les consommations énergétiques.

Pour étudier le confort et les comportements des occupants nous avons investigué deux résidences : l'une thermiquement isolée par l'extérieur et l'autre non. Dans un premier temps, une enquête au porte à porte a permis de mettre en évidence une différence d'inconfort ressenti entre les deux résidences : dans celle qui est isolée, une sensation de chaleur accrue est rapportée en été et dans celle qui ne l'est pas, une sensation de froid est signalée en hiver. Cependant, d'après les déclarations, nous n'observons pas de différence majeure entre les comportements des occupants des deux résidences. L'enquête a cependant permis d'identifier les appartements à instrumenter afin d'étudier le confort et les comportements des occupants.

Les usages des individus ont été examinés grâce à l'instrumentation du séjour de 13 appartements réels répartis dans les deux résidences (isolée et non-isolée) sur une année complète par l'intermédiaire de deux boîtiers de capteurs que nous avons conçus et réalisés. Les données relevées permettent d'étudier les actions des occupants sur leur fenêtre et leur volet ainsi que de définir des niveaux de confort/inconfort estimés grâce à la méthode adaptative. Les actions sur les fenêtres et les volets évoluent en fonction des saisons. Toutefois, nous n'identifions pas de relation directe entre un inconfort momentané et une action mais, à plus long terme, les comportements ont un impact positif ou négatif sur les niveaux de confort/inconfort. Nous mettons ainsi en évidence trois typologies de comportement : **l'occupant « expert »** qui met en place des actions efficaces pour limiter son inconfort, **l'occupant « actif »** qui met en place

quelques actions, mais dont l'efficacité n'est pas complète et **l'occupant « contre-productif »** dont les actions vont à l'encontre d'une protection efficace face à l'inconfort observé.

Les mesures, analysées saison par saison, mettent en évidence de fortes variations dans les comportements des occupants des appartements étudiés. L'usage de la fenêtre impacte le taux de renouvellement d'air de la pièce. Son analyse journalière nous permet de définir huit typologies d'ouverture ou de fermeture en fonction des moments de la journée. De même, nous définissons quatre typologies d'usage du volet impactant la gestion des apports solaires. Il s'agit des deux éléments principaux sur lesquels les concepteurs peuvent travailler afin de limiter les surchauffes d'été. Contrairement aux scénarios réglementaires qui se basent sur un occupant dont les actions ne sont guidées que par la gestion thermique optimale de son appartement. Nous développons ici un **modèle comportemental**, basé sur **32 combinaisons d'usages de la fenêtre et du volet**, prenant ainsi en compte la diversité des pratiques. Nous proposons ainsi les bases d'un modèle permettant d'améliorer les hypothèses des scénarios conventionnels dans le but d'obtenir une meilleure relation entre la réalité et les prévisions de performance énergétique et de température intérieure.

Les analyses du modèle comportemental et les propositions de conception architecturale sont basées sur des simulations de thermique dynamique réalisées avec le logiciel Pléiades+COMFIE. Pour cela nous définissons deux modules-appartements représentatifs du séjour des deux résidences étudiées. Les résultats des simulations réalisées avec **les scénarios issus des comportements réels** montrent de très faibles écarts de température avec les mesures *in situ*, et valident ainsi les hypothèses mises en place pour réaliser les modules-appartements. Les résultats des simulations avec **les scénarios réglementaires** (même s'ils n'ont pas vocation à être comparés à la réalité) montrent une sous-estimation des températures de 2 °C par rapport aux mesures *in situ* ce qui peut conduire à une sous-estimation de l'inconfort en été. Les résultats des simulations réalisées avec **le modèle comportemental** montrent des écarts de température très faibles avec les mesures ce qui nous permet de le valider.

La réalisation de simulations avec notre modèle comportemental permet de définir les actions permettant de réduire l'inconfort en fonction de la typologie de l'été (été frais en 2014 et été chaud en 2015). Cependant, nous avons observé au cours de notre étude que les comportements varient fortement et que les pratiques permettant de limiter l'inconfort ne sont pas toujours mises en place par les occupants. Afin de pallier ces manquements, nous proposons trois stratégies de conception architecturales fondées sur les préceptes de l'**architecture bioclimatique** prenant en compte les conforts (thermique, lumineux, visuel, acoustique, etc.) : **l'« objet fenêtre »**, **l'« objet fenêtre végétalisée »** et **l'« objet ventilation renforcée »**. Ces solutions, qui apportent une nouvelle écriture architecturale de la façade, ne remettent pas en question les apports d'une isolation thermique par l'extérieur d'un bâtiment mais mettent en évidence que cela ne suffit pas pour proposer aux occupants les conditions suffisantes pour leur confort d'été. En rénovation, cette partie est régulièrement mise de côté en pensant que l'occupant saura gérer son volet et sa fenêtre pour limiter l'inconfort. Ces solutions permettent donc de l'accompagner en réduisant les impacts de ses actions sur le confort thermique.

Pour conclure, les solutions proposées sont testées avec les modèles comportementaux de locataires que nous avons étudiés. Nous validons ainsi les stratégies proposées, notamment pour les occupants qualifiés de « contre-productifs ». Cependant, pour ceux qui sont qualifiés d'« experts » l'impact est limité. Cette étude permet ainsi de proposer des **stratégies architecturales** offrant à un maximum de personnes les conditions suffisantes pour assurer leur confort sans avoir une connaissance « experte » de leur logement et des pratiques à mettre en place. Par contre, pour que les solutions proposées puissent être bien acceptées et appropriées de chacun, il nous semble nécessaire qu'un accompagnement des locataires soit proposé avant, pendant et après la phase des travaux.

Limites de l'étude et Perspectives

Au même titre que l'étude menée regroupe de nombreuses thématiques, les limites et les perspectives sont donc aussi variées que les domaines étudiés. Pour une meilleure prise en compte de ces-derniers, il me semble important de souligner que la constitution d'une équipe pluridisciplinaire est essentielle à la poursuite de ces travaux. Toutefois, cinq thématiques principales peuvent être développées pour la suite de ce travail.

- Les modèles de confort

L'analyse de l'inconfort et des actions semble être un élément important à améliorer. Or, à l'heure actuelle, les modèles de définition du confort sont la plupart du temps basés sur des études en chambre climatique. Le modèle adaptatif, basé sur des mesures en situation réelle, semble être de plus en plus reconnu pour définir les situations de confort/inconfort. Cependant, les modèles de la littérature diffèrent en fonction des lieux ou des bâtiments étudiés. Bien que plus complexe, une analyse du confort ressenti semble alors essentielle. Qu'elle soit basée sur des questionnaires ou des entretiens semi-directifs, elle permettrait de définir les périodes d'inconfort en fonction des locataires et une meilleure relation entre inconfort et action pourrait être trouvée.

- Une instrumentation plus complète

Les études par instrumentation du comportement et du confort se basent soit sur l'étude d'une personne ou d'une famille dans d'une maison témoin équipée de multiples capteurs, soit sur l'étude du comportement des occupants dans des bureaux. Dans la première hypothèse, l'occupant, sachant que l'étude porte sur ses réactions face à son confort/inconfort, peut avoir des réactions différentes de celles qu'il aurait chez lui. Dans la seconde hypothèse, les personnes étudiées étant plus statiques, elles sont plus sensibles à leur sensation thermique. Les actions peuvent donc être reliées à un inconfort. De plus, ces lieux permettent la mise en place de multiples capteurs permettant des analyses croisées avec différents paramètres. L'instrumentation de logements en site occupé engendre de nombreuses contraintes et notamment une limitation du nombre de capteurs à positionner. Dans notre étude, cela me conduit à une première approximation sur la température opérative, car nous n'avons pas pu mesurer en temps réel la température moyenne de rayonnement des parois. Des mesures de débits de ventilation lorsque les fenêtres et les volets sont actionnés seraient également des données intéressantes pour la poursuite de cette étude car les vitesses d'air ont un impact important sur le confort. Cependant, pour rejoindre le premier point abordé, c'est l'étude du confort qui doit être amélioré. En effet, je me suis basée sur les modèles de confort de la littérature mais des questionnaires à remplir après avoir réalisé une action permettraient d'étudier le confort ressenti. Un boîtier avec des boutons poussoirs pourrait être envisagé. Ils pourraient être actionnés en cas d'inconfort (cela faisait partie du cahier des charges de l'instrumentation puis cela a été abandonné pour limiter l'investissement des locataires) ou en fonction des raisons d'une action (par exemple : ouverture de la fenêtre pour renouveler l'air, sensation de chaud, etc.).

L'étude des consommations d'énergie est également un point à développer. En effet, j'ai relevé les consommations globales de gaz afin de déterminer la part liée au chauffage. Or nous avons vu au cours de cette étude que cette approche induit de fortes incertitudes. Cependant, la généralisation future des compteurs communicants pourrait permettre une étude plus détaillée des relations entre les actions et les consommations énergétiques. Cela permettrait de comprendre les impacts énergétiques en fonction des actions des locataires.

- Développement du modèle comportemental

L'étude de l'usage et de la typologie de la fenêtre et du volet est nécessaire pour le concepteur afin de proposer les solutions les plus adaptées pour limiter l'inconfort. Cette étude nous a permis de mettre en place un modèle comportemental basé sur 32 typologies d'usages de la

fenêtre et du volet qui peuvent être implémentés dans les logiciels de thermique dynamique. Cependant, cela nécessite des recherches supplémentaires. En effet, les typologies ont été identifiées à partir d'hypothèses établies sur les durées et les moments d'ouverture ou de fermeture de la fenêtre et du volet. Il est clair que l'étude d'un plus grand nombre d'appartements permettrait de définir de manière statistique des typologies plus précises. Mais c'est surtout la répartition des profils d'occupant dans les résidences qui doit être étudiée. En effet, en connaissant le pourcentage d'occupants « experts », « actifs » ou « contre-productifs », nous pouvons orienter les propositions architecturales pour limiter l'inconfort.

– Choix d'un logiciel de thermique dynamique

Une réflexion sur le logiciel à utiliser pour réaliser des simulations de thermique dynamique doit également être mise en place. En effet, au moment de proposer les solutions architecturales, avec le logiciel que nous avons choisi, il est nécessaire de faire des approximations en faisant des équivalences afin d'étudier les différents dispositifs proposés (pourcentage d'ouverture, d'occultation, etc.). La possibilité de détailler davantage les dispositifs architecturaux permettrait, en effet, d'obtenir des solutions plus proches d'une réalité. Ainsi le développement par *(SADEGHIPOUR ROUDSARI et PAK, 2013)* du module additionnel « Ladybug + Honeybee » pour le modeleur 3D « Rhinoceros » couplé à l'environnement paramétrique « Grasshopper » permet de concevoir en trois dimensions les dispositifs et de visualiser les évolutions des températures dans le temps. Il est basé sur le moteur de calcul « Énergie + ». Pour le concepteur, cet environnement peut aider au développement de solutions architecturales.

– Des stratégies pour limiter l'inconfort

Des solutions domotiques n'ont pas été testées pour deux raisons. La première car la domotique se base sur des capteurs et sur une programmation qui gère de manière optimale les ambiances mais ne tient pas toujours compte des attentes des locataires. En conséquence, le confort thermique est assuré par un élément extérieur et les individus peuvent avoir des expectatives différentes conduisant à de l'inconfort. La seconde tient au fait que nous étudions des logements sociaux et que la mise en place d'appareils technologiques nécessite d'une part un budget conséquent mais surtout une maintenance (réglage initial, réparation des détériorations..) qui peut être lourde pour le bailleur social qui doit déjà gérer tous les disfonctionnements actuels (fenêtres dégondées, V.M.C. mal réglées, humidité dans les logements, etc.).

Nous avons ainsi défini trois dispositifs architecturaux limitant l'inconfort d'été. Nous n'avons pas cherché à réaliser une liste exhaustive des solutions mais les préceptes de l'architecture bioclimatique (détaillés dans de nombreux livres aujourd'hui) ont été une réelle base pour les réflexions menées. En milieu méditerranéen, la complexité de la conception architecturale limitant les inconforts d'été et d'hiver réside dans deux stratégies opposées à mettre en place en fonction des saisons : se protéger de la chaleur en été et profiter des apports gratuits en hiver. Les solutions que nous avons proposées sont essentiellement orientées pour un confort d'été. Cependant une réflexion sur l'hiver doit également être menée en prenant par exemple appui sur les prescriptions proposées pour les maisons passives du Nord de l'Europe. Au final, un arbitrage, de la part de l'architecte, entre ces deux stratégies est nécessaire pour pouvoir proposer les stratégies optimales en été mais aussi en hiver.

Schéma conclusion

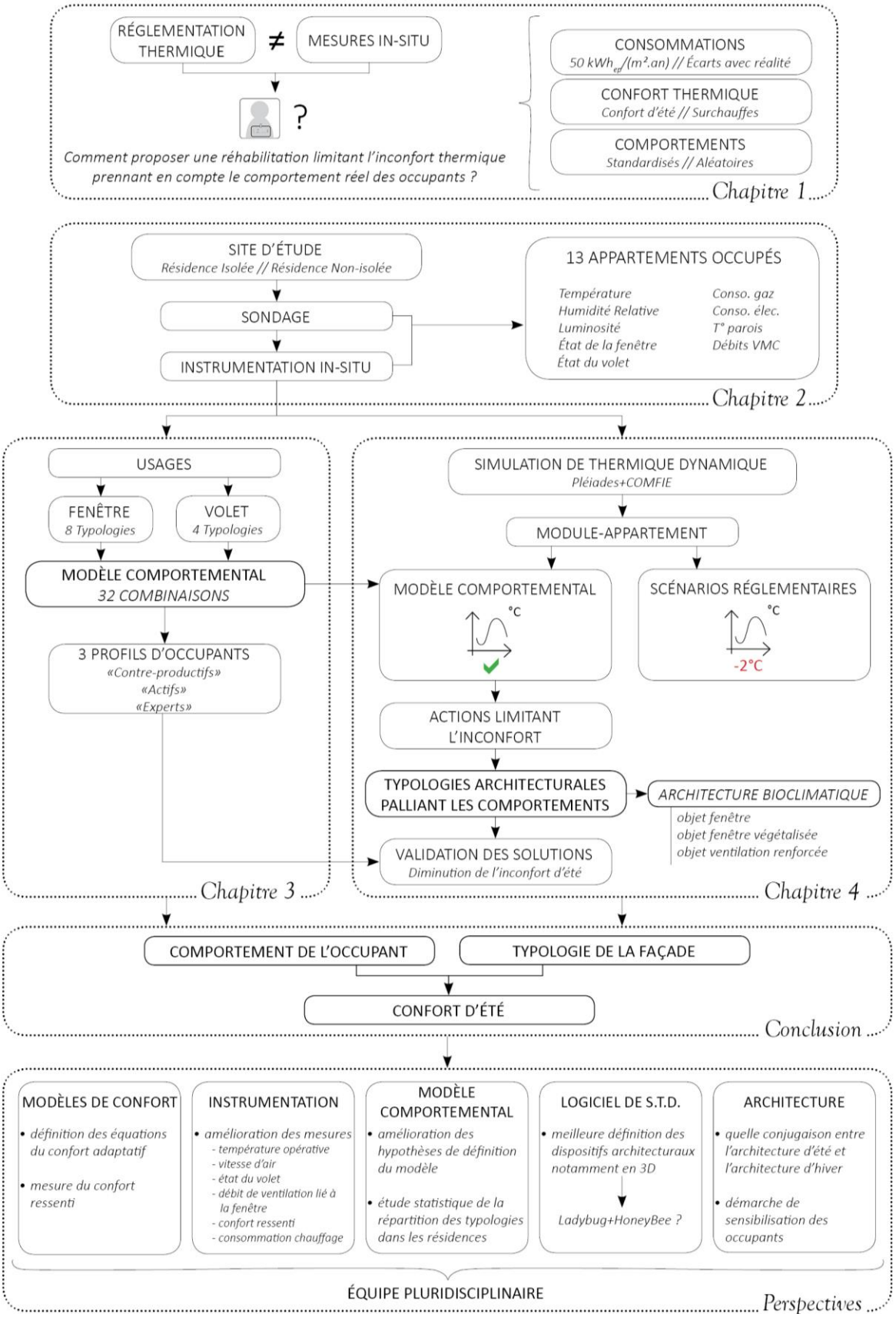


FIGURE 4.45 : *Schéma conclusion de la démarche entreprise et des perspectives envisagées de l'auteur*

BIBLIOGRAPHIE

ADEME, Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. 2015. Alléger l'empreinte environnementale de la consommation des français en 2030, Vers une évolution profonde des modes de production et de consommation [En ligne]. Disponible sur : < http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport_technique_prospective_consommation_novembre_2015.pdf > (Consulté le 1 décembre 2015).

---. 2013. Les chiffres clés du bâtiment [En ligne]. Disponible sur : < http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-batiment-edition-2013-8123.pdf > (Consulté le 3 juillet 2015).

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.

---. 2006. NF EN ISO 7730 Ergonomie des ambiances thermiques.

ANDERSEN, Rune, Valentina FABI, Jorn TOFTUM, Stefano P. CORGNATI, et Bjarne W. OLESEN. 2013. « Window opening behaviour modelled from measurements in Danish dwellings ». Building and Environment. Vol. 69, p. 101‑113.

ARANTES, Laëtitia. 2013. [Thèse]. L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située [En ligne]. Thèse en Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Électrochimie. Université de Grenoble, 473 p. Disponible sur : < https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00965670/document > (Consulté le 6 mai 2015).

ARDUINO. 2013. « Arduino - Forum ». Disponible sur : < http://forum.arduino.cc/ > (Consulté le 5 septembre 2013).

ARENE, Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies. 2008. Le confort d'été méditerranéen [En ligne]. Marseille : ARENE Provence-Alpes-Côte d'Azur, Disponible sur : < http://www.enviroboite.net/fiches-confort-d-ete-en-provence-alpes-cote-d-azur > (Consulté le 13 février 2013).

ARENE, Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies, et Institut pour la conception environnementale du bâti I.C.E.B. 2014. Confort d'été passif [En ligne]. Paris : ARENE Île-de-France, ICEB, Disponible sur : < http://www.asso-iceb.org/cafe/imagescafe/GT_confort_ete_ICEB.pdf > (Consulté le 11 décembre 2013). ISBN : 978-2-911533-07-5.

---. 2012. Ventilation naturelle et mécanique [En ligne]. [Paris]; [Ivry-sur-Seine] : ARENE Île-de-France ; ICEB, Disponible sur : < http://www.asso-iceb.org/wp-content/uploads/2014/07/guide_bio_tech_ventilation_naturelle_et_mecanique.pdf > ISBN : 978-2-911533-00-6.

ASHRAE, American Society of Heating Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, éd. 2009. « Chapter 9: Thermal Comfort ». Dans : ASHRAE : Fundamentals Handbooks. Atlanta : p. 9.1‑9.27.

ASSEGOND, Christèle. 2015. « Affichage des consommations et réflexivité des ménages : construire une culture domestique de l'énergie par l'information ». Dans : Les sociétés contemporaines à l'épreuve des transitions énergétiques [En ligne]. 2èmes Journées internationales de sociologie de l'énergie. Tours, France : Disponible sur : < http://www.socio-energie2015.fr/wp-content/uploads/2015/06/Actes_JISE_2015_web.pdf > (Consulté le 3 juillet 2015).

ATMEL Corporation. 2009. ATmega328 datasheet [En ligne]. Disponible sur : < http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf > (Consulté le 8 juillet 2013).

BARREAU, Blandine, Anne DUJIN, et Marie VEDIE. 2013. Comment limiter l'effet rebond des politiques d'efficacité énergétique dans le logement ? L'importance des incitations comportementales [En ligne]. Paris, France : Centre d'analyse stratégique, 14 p.(La note d'analyse, n°320) Disponible sur : < www.strategie.gouv.fr > (Consulté le 18 février 2013).

BATIER, Cécile. 2015. « De la simulation thermique dynamique à la simulation comportementale de l'occupant ». Dans : Rencontres Universitaires de Génie Civil. Bayonne, France : Disponible sur : < https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01167741/document > (Consulté le 15 octobre 2015).

BECKER, R., et M. PACIUK. 2009. « Thermal comfort in residential buildings – Failure to predict by Standard model ». Building and Environment. Vol. 44, n°5, p. 948‑960.

BESLAY, Christophe, Romain GOUNET, et Marie Christine ZÉLEM. 2013. « Pas de "smart cities" sans "smart habitants" ». Urbia. p. 46‑60.

BONTE, Mathieu. 2014. [Thèse]. Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment. Thèse en Énergétique et Transferts. Toulouse : Université Paul Sabatier, 206 p.

BOXALL, John. 2011. « Tutorial : Arduino and the SPI bus part II ». Dans : tronix stuff [En ligne]. Disponible sur : < http://tronixstuff.wordpress.com/2011/06/15/tutorial-arduino-and-the-spi-bus-part-ii/ > (Consulté le 18 juillet 2013).

BRAGER, Gail S., et Richard John DE DEAR. 1998. « Thermal adaptation in the built environment: a literature review ». Energy and Buildings. Vol. 27, n°1, p. 83‑96.

BRISEPIERRE, Gaëtan. 2011. [Thèse]. Les conditions sociales et organisationnelles du changement des pratiques de consommation d'énergie dans l'habitat collectif [En ligne]. Thèse en Sociologie. Paris : Université Paris Descartes, 847 p. Disponible sur : < http://gbrisepierre.fr/wp-content/uploads/2012/04/Th%C3%A8se-Ga%C3%ABtan-Brisepierre-2011.pdf > (Consulté le 16 janvier 2013).

BRUNDRETT, G. W. 1977. « Ventilation: A behavioural approach ». Int. J. Energy Res. Vol. 1, n°4, p. 289‑298.

BURGESS, Jacquelin, et Michael NYE. 2008. « Re-materialising energy use through transparent monitoring systems ». Energy Policy. Vol. 36, n°12, p. 4454‑4459.

CACCAVELLI, Dominique. 2014. « Le confort d'été dans la RT 2012 ». Dans : Forum Bâtiment Durable. Marseille : Disponible sur : < http://www.forumbatimentdurable.com/images/Confort-thermique-d-ete-et-temperature-interieure-conventionnelle-Dominique-Caccavelli-CSTB.pdf > (Consulté le 10 octobre 2015).

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) Disponible sur : < http://moodle.insa-toulouse.fr/pluginfile.php/32017/mod_resource/content/0/42207210-be9085_Toperative.pdf > (Consulté le 15 décembre 2012).

CAYLA, Jean-Michel, Benoit ALLIBE, et Marie-Hélène LAURENT. 2010. « From Practices to Behaviors: Estimating the Impact of Household Behavior on Space Heating Energy Consumption ». Dans : Summer Study on Energy Efficiency in Buildings [En ligne]. ACEEE. Disponible sur : < http://www.aceee.org/files/proceedings/2010/data/papers/2141.pdf > (Consulté le 15 avril 2013).

CAZEAUX, Lauréna, Marine MORAIN, et Gilles DESÈVEDAVY. 2015. « Du retour d'usage à une conception soft-tech ». Dans : Les sociétés contemporaines à l'épreuve des transitions énergétiques [En ligne]. 2èmes Journées Internationales de Sociologie de l'Énergie. Tours, France : p. 120‑123. Disponible sur : < http://www.socio-energie2015.fr/wp-content/uploads/2015/06/Actes_JISE_2015_web.pdf > (Consulté le 3 juillet 2015).

C.F.B.P., Comité Français du Butane et du Propane. 2014. « Comité Français du Butane et du Propane ». Disponible sur : < http://www.cfbp.fr/ > (Consulté le 11 décembre 2015).

CHANTRELLE, Fanny Pernodet, Hicham LAHMIDI, Werner KEILHOLZ, Mohamed El MANKIBI, et Pierre MICHEL. 2011. « Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings ». Applied Energy. Vol. 88, n°4, p. 1386‑1394.

CORREIA DA SILVA, Pedro, Vítor LEAL, et Marilyne ANDERSEN. 2013. « Occupants interaction with electric lighting and shading systems in real single-occupied offices: Results from a monitoring campaign ». Building and Environment. Vol. 64, p. 152‑168.

C.R.E., Commission de Régulation de l'Énergie. 2012. « Les NTIC / Les outils de maîtrise de la demande en électricité à disposition des consommateurs ». Disponible sur : < http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=ntic-outils-maitrise-demande > (Consulté le 21 mai 2013).

C.S.T.B., Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. 2011. Annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012 [En ligne]. Disponible sur : < http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201114/met_20110014_0100_0007%20annexe.pdf > (Consulté le 31 août 2015).

---. 2015. « La réglementation thermique des bâtiments existants ». Dans : Les économies d'énergie dans le bâtiment [En ligne]. Disponible sur : < http://www.rt-batiment.fr/batiments-existants/rt-existant-dispositif-general/presentation-generale-dispositif.html > (Consulté le 23 juillet 2015).

C.S.T.B., Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, et Institut Français pour la Performance Énergétique du Bâtiment I.F.P.E.B. 2012. Mieux comprendre les notions de consommations réglementaires, prévisionnelles et réelles [En ligne]. Disponible sur : < http://www.ifpeb.fr/publications-documents-en-telechargement/retour-dexperience-idc-ifpeb-cstb?eb872018df32af03565745661d14677c=bcd2d43b180f76f1420321096c522c18 > (Consulté le 22 juillet 2015).

DAY, Julia, Judy THEODORSON, et Kevin VAN DEN WYMELENBERG. 2012. « Understanding Controls, Behaviors and Satisfaction in the Daylit Perimeter Office: A Daylight Design Case Study ». Journal of Interior Design. Vol. 37, n°1, p. 17‑34.

DE DEAR, Richard John, Gail BRAGER, et Donna COOPER. 1997. Developing an Adaptative Model of Thermal Comfort and Preference [En ligne]. Australie : 312 p.(ASHRAE RP-884). Disponible sur : < http://sydney.edu.au/architecture/documents/staff/richard_de_dear/RP884_Final_Report.pdf > (Consulté le 3 décembre 2012).

DE DEAR, Richard John, et Gail S. BRAGER. 2002. « Thermal comfort in naturally ventilated buildings : revisions to ASHRAE Standard 55 ». Energy and Buildings. Vol. 34, p. 549‑561.

DE SINGLY, François. 2012. Le questionnaire. 3e édition. Paris : A. Colin, 124 p.(L'enquête et ses méthodes). ISBN : 978-2-200-25987-7.

D.G.A.L.N., Direction Générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature. 2011. Réglementation Thermique 2012 : Un saut énergétique pour les bâtiments neufs [En ligne]. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 8 p. Disponible sur : < http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_plaquetteRT2012_avril2011.pdf > (Consulté le 22 avril 2013).

D.G.U.H.C., Direction Générale de l'Urbanisme et de l'Habitat et de la Construction. 2006. Réglementation thermique 2005 Des bâtiments confortables et performants.

DOHERTY, T., et Edward A. ARENS. 1988. « Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models ». Center for the Built Environment. p. 16.

DUJIN, Anne, et Bruno MARESCA. 2010. La température du logement ne dépend pas de la sensibilité écologique [En ligne]. 4 p.(CREDOC, n°227) Disponible sur : < http://www.credoc.fr/publications/abstract.php?ref=CMV227 > (Consulté le 22 novembre 2012).

ENDRAVADAN, Mala. 2006. [Thèse]. Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation basée sur la sensation thermique humaine : impact sur la consommation d'énergie dans les bâtiments. Thèse en Énergétique. Toulouse : Université Paul Sabatier, 161 p.

FABI, Valentina, Rune Vinther ANDERSEN, Stefano CORGNATI, et Bjarne W. OLESEN. 2012. « Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models ». Building and Environment. Vol. 58, p. 188‑198.

FARUQUI, Ahmad, Sanem SERGICI, et Ahmed SHARIF. 2010. « The impact of informational feedback on energy consumption—A survey of the experimental evidence ». Energy. Vol. 35, n°4, p. 1598‑1608.

FERNANDEZ, Pierre, et Pierre LAVIGNE. 2009. Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes. Paris : Le Moniteur Editions, 430 p. ISBN : 978-2-281-11454-6.

FISHER, Corinna. 2008. « Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy? » Energy Efficiency. Vol. 1, n°1, p. 79‑104.

FLORY-CELINI, Caroline. 2008. [Thèse]. Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant [En ligne]. Thèse en Génie Civil. Lyon : Lyon 1 Claude Bernard, 212 p. Disponible sur : < http://www.bhee.fr/Documents/Theses/CaroCelliniThese.pdf > (Consulté le 21 décembre 2012).

FRONTCZAK, Monika, et Pawel WARGOCKI. 2011. « Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments ». Building and Environment. Vol. 46, n°4, p. 922‑937.

GAMMON, Nick. 2012. Power saving techniques for microprocessors [En ligne]. Electronics ; Microprocessors. Disponible sur : < http://www.gammon.com.au/forum/?id=11497 > (Consulté le 5 juillet 2013).

GIBSON, James Jerome. 1979. The ecological approach to visual perception. 332 p. ISBN : 978-0-89859-959-6.

GREENING, Lorna, David L. GREENE, et Carmen DIFIGLIO. 2000. « Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey ». Energy Policy. Vol. 28, n°6–7, p. 389‑401.

GREIMAN, Bill. 2013. « sdfatlib ». Disponible sur : < https://code.google.com/p/sdfatlib/ > (Consulté le 3 septembre 2013).

HALDI, Frédéric, et Darren ROBINSON. 2009. « Interactions with window openings by office occupants ». Building and Environment. Vol. 44, n°12, p. 2378‑2395.

---. 2008. « On the behaviour and adaptation of office occupants ». Building and Environment. Vol. 43, n°12, p. 2163‑2177.

HANSCR. 2013a. How to run an Arduino (clone) on a 9V battery for weeks or even months [En ligne]. Hardware Startup. Disponible sur : < http://hwstartup.wordpress.com/2013/03/11/how-to-run-an-arduino-on-a-9v-battery-for-weeks-or-months/ > (Consulté le 3 juillet 2013).

---. 2013b. How to run an Arduino (clone) on (AA) batteries for over a year – Part 2 [En ligne]. Hardware Startup. Disponible sur : < http://hwstartup.wordpress.com/2013/04/15/how-to-run-an-arduino-clone-on-aa-batteries-for-over-a-year-part-2/ > (Consulté le 3 juillet 2013).

HARGREAVES, Tom, Michael NYE, et Jacquelin BURGESS. 2013. « Keeping energy visible? Exploring how householders interact with feedback from smart energy monitors in the longer term ». Energy Policy. Vol. 52, p. 126‑134.

---. 2010. « Making energy visible: A qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitors ». Energy Policy. Vol. 38, n°10, p. 6111‑6119.

HERKEL, Sebastian, Ulla KNAPP, et Jens PFAFFEROTT. 2008. « Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings ». Building and Environment. Vol. 43, n°4, p. 588‑600.

HESCHONG, Lisa. 1981. Architecture et volupté thermique. Parenthèses. Marseille : 93 p.(Habitat/Ressources).

HINAULT, Xavier. 2010a. « Introduction au système Arduino ». Dans : Arduino [En ligne]. Disponible sur : < http://arduino.cc/fr/Main/DebuterIntroduction > (Consulté le 17 juillet 2013).

---. 2010b. « Librairie SdFatLib pour carte SD du module Ethernet (hors-référence) ». Dans : Référence Arduino Français [En ligne]. Disponible sur : < http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php?n=Main.LibrairieSdFatLib > (Consulté le 3 septembre 2013).

HUMPHREYS, Michael. 1978. « Outdoor temperatures and comfort indoors ». Batiment International, Building Research and Practice. Vol. 6, n°2, p. 92‑92.

HUMPHREYS, Michael A, et J FERGUS NICOL. 2002. « The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments ». Energy and Buildings. Vol. 34, n°6, p. 667‑684.

INKAROJRIT, Vorpat. 2005. [Thèse]. Balancing comfort: occupants' control of window blinds in private offices [En ligne]. Thèse en Architecture. University of California, Berkeley, Disponible sur : < http://escholarship.org/uc/item/3rd2f2bg > (Consulté le 7 août 2015).

INOUE, T., T. KAWASE, T. IBAMOTO, S. TAKAKUSA, et Y. MATSUO. 1988. « The development of an optimal control system for window shading devices based on investigations in office buildings ». Dans : ASHRAE Transactions. Annual Meeting of ASHRAE. Ottawa, Canada : ASHRAE, p. 1034‑1049.

I.P.C.C., Intergouvernmental Panel on Climate Change. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [En ligne]. Genève, Suisse : IPCC, Disponible sur : < http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf > (Consulté le 1 juin 2015).

IZARD, Jean-Louis, et Jean-Robert MILLET. 1993. Architectures d'été: construire pour le confort d'été. Aix-en-Provence : Édisud, 141 p. ISBN : 978-2-85744-655-2.

IZUBA ÉNERGIE. 2015. « Izuba énergies ». Disponible sur : < http://www.izuba.fr/ >

J.O.R.F., Journal Officiel de la République Française. 2007a. Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr/ > (Consulté le 23 juillet 2015).

---. 1980. Arrêté du 4 novembre 1980 Création d'un Label Haute Isolation Thermique attribué aux bâtiments d'habitation faisant partie des programmes immobiliers pour lesquels les maîtres d'ouvrage en auront sollicité l'octroi lors de l'établissement du dossier de consultation des

entreprises [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr/ > (Consulté le 17 juillet 2015).

---. 1988. Arrêté du 5 avril 1988 relatif aux équipements et aux caractéristiques thermiques des bâtiments d'habitation [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 17 juillet 2015).

---. 1974. Arrêté du 10 avril 1974 relatif à l'isolation thermique et au réglage automatique des installations de chauffage dans les bâtiments d'habitation. [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 17 juillet 2015).

---. 2006. Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 21 juillet 2015).

---. 1982a. Arrêté du 24 septembre 1982 Agrément des règles pour les méthodes de calcul des coefficients volumiques de déperdition thermique et de besoin de chauffage des bâtiments d'habitation [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 17 juillet 2015).

---. 2010. Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux des parties nouvelles de bâtiments [En ligne]. Disponible sur : < http://www.journal-officiel.gouv.fr > (Consulté le 21 juillet 2015).

---. 2000. Arrêté du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 17 juillet 2015).

---. 2007b. Code de la construction et de l'habitation - Article R131-29 [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 21 juillet 2015).

---. 1979. Décret n°79-907 du 22 octobre 1979 modifiant le code de la construction et de l'habitation et relatif à la limitation de la température de chauffage [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 17 juillet 2015).

---. 1982b. Décret n°82-269 du 24 mars 1982 portant modification de l'article R 111-6 du code de la construction et de l'habitation relatif aux équipements et aux caractéristiques thermiques des bâtiments d'habitation [En ligne]. Disponible sur : < http://www.legifrance.gouv.fr > (Consulté le 17 juillet 2015).

KIM, Ji-Hyun, Young-Joon PARK, Myoung-Souk YEO, et Kwang-Woo KIM. 2009. « An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer ». Building and Environment. Vol. 44, n°7, p. 1517‑1527.

LADYADA. 2012a. « DHTxx Sensors ». Dans : adafruit learning system [En ligne]. Disponible sur : < http://learn.adafruit.com/dht/overview > (Consulté le 17 juillet 2013).

---. 2012b. « Photocells ». Dans : adafruit learning system [En ligne]. Disponible sur : < http://learn.adafruit.com/photocells/overview > (Consulté le 18 juillet 2013).

---. 2012c. « TSL2561 Luminosity Sensor ». Dans : adafruit learning system [En ligne]. Disponible sur : < http://learn.adafruit.com/tsl2561/overview > (Consulté le 3 septembre 2013).

LAMBOT, Sébastien. 2013. « Interruptions multiples sur Arduino ». Dans : Sébastien Lambot [En ligne]. Disponible sur : < http://www.lambot.info/interruptions-multiples-sur-arduino/ > (Consulté le 3 septembre 2013).

LANGEVIN, Jared, Jin WEN, et Patrick L. GURIAN. 2015. « Simulating the human-building interaction: Development and validation of an agent-based model of office occupant behaviors ». Building and Environment [En ligne]. Disponible sur : < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314004090 > (Consulté le 11 février 2015).

LÉVY, Pierre. 2010. La rénovation écologique. Mens : Terre vivante, 317 p. ISBN : 978-2-914717-76-2.

LIU, Jing, Runming YAO, et Rachel McCLOY. 2012. « A method to weight three categories of adaptive thermal comfort ». Energy and Buildings. Vol. 47, p. 312‑320.

LOCKTON, Dan, David HARRISON, et Neville STANTON. 2008. « Making the user more efficient: design for sustainable behaviour ». International Journal of Sustainable Engineering. Vol. 1, n°1, p. 3‑8.

MADEC, Philippe. 2015. ... le climat que l'habite [En ligne]. Disponible sur : < http://www.philippemadec.eu/ecrits.html > (Consulté le 20 décembre 2015).

MAHDAVI, A. 2009. « Patterns and Implications of User Control Actions in Buildings ». Indoor and Built Environment. Vol. 18, n°5, p. 440‑446.

MANGOLD, Marie. 2015. « Habiter une maison "performante" énergétiquement : vers la construction d'une "expertise habitante" ? » Dans : Les sociétés contemporaines à l'épreuve des transitions énergétiques [En ligne]. 2ème Journées internationales de sociologie de l'énergie. Tours, France : p. 212‑215. Disponible sur : < http://www.socio-energie2015.fr/wp-content/uploads/2015/06/Actes_JISE_2015_web.pdf > (Consulté le 3 juillet 2015).

MARESCA, Bruno, Anne DUJIN, et Romain PICARD. 2009. La consommation d'énergie dans l'habitat, entre recherche de confort et impératif écologique [En ligne]. (CREDOC). Disponible sur : < http://www.credoc.fr/pdf/Rech/C264.pdf > (Consulté le 22 novembre 2012).

MARTIN, Olivier, et François DE SINGLY. 2012. L'analyse quantitative des données. 3e édition. Paris : A. Colin, 124 p.(L'enquête et ses méthodes). ISBN : 978-2-200-27826-7.

MAUGARD, Alain. 2013. Analyse détaillée du parc résidentiel existant [En ligne]. Disponible sur : < http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/regles-de-lart/detail/rapport-2012-analyse-detaillee-du-parc-residentiel-existant.html > (Consulté le 22 juillet 2015).

---. 2014. Rapport RAGE « Retours d'expériences (REX) - Bâtiments performants & Risques » Version 3 [En ligne]. Disponible sur : < http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/regles-de-lart/detail/rapport-rage-retours-dexperiences-rex-batiments-performants-risques-version-3-octobr.html > (Consulté le 22 juillet 2015).

McCARTNEY, Kathryn J, et J FERGUS NICOL. 2002. « Developing an adaptive control algorithm for Europe ». Energy and Buildings. Vol. 34, n°6, p. 623‑635.

M.E.D.D.E., Ministère de l'Écologie et de l'Énergie. 2014a. « Comment est née la notion de développement durable? » Dans : Développement durable - Les repères [En ligne]. Disponible sur : < http://www.developpement-durable.gouv.fr/Comment-est-nee-la-notion-du.html > (Consulté le 5 décembre 2014).

---. 2014b. « Défi 4 "Changement climatique et énergies" ». Dans : Observation et statistiques [En ligne]. Disponible sur : < http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/1932/0/consommation-denergie-secteurs-residentiel-tertiaire.html > (Consulté le 7 juillet 2015).

---. 2015. Politiques climat et efficacité énergétique : Synthèse des engagements et résultat de la France [En ligne]. Disponible sur : < http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/14111_Brochure_climat2013.pdf > (Consulté le 16 juillet 2015).

M.E.D.D.E., Ministère de l'Écologie et de l'Énergie, et Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement M.E.T.L. 2013. Arrêté du 16 avril 2013 modifiant l'annexe à l'arrêté du 20 juillet 2011 portant approbation de la méthode de calcul Th-B-C-E prévue aux articles 4, 5 et 6 de l'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments [En ligne]. Disponible sur : < http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO20139/met_20130009_0100_0002.pdf > (Consulté le 31 août 2015).

M.E.D.D.T.L., Ministère de l'Écologie du Développement Durable, des Transports et du Logement. 2011. Arrêté du 20 juillet 2011 portant approbation de la méthode de calcul Th-B-C-E prévue aux articles 4, 5 et 6 de l'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments [En ligne]. Disponible sur : < http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201114/met_20110014_0100_0007.pdf > (Consulté le 31 août 2015).

M.E.E.D.D.M., Ministère de l'Écologie de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer. 2009. La première loi du Grenelle [En ligne]. Paris, France : 20 p.(Le Grenelle Environnement). Disponible sur : < http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/La_premiere_loi_du_Grenelle.pdf > (Consulté le 24 avril 2013).

MORRISSEY, Donal. 2010a. Sleeping Arduino - Part 1 [En ligne]. Arduino, Zigbee and Embedded Development. Disponible sur : < http://donalmorrissey.blogspot.fr/2010/04/putting-arduino-diecimila-to-sleep-part.html > (Consulté le 3 juillet 2013).

---. 2010b. Sleeping Arduino - Part 2 Wake Up Via An External Interrupt [En ligne]. Arduino, Zigbee and Embedded Development. Disponible sur : < http://donalmorrissey.blogspot.fr/2010/04/putting-arduino-diecimila-to-sleep.html > (Consulté le 3 juillet 2013).

---. 2011. Sleeping Arduino - Part 5 Wake Up Via The Watchdog Timer [En ligne]. Arduino, Zigbee and Embedded Development. Disponible sur : < http://donalmorrissey.blogspot.fr/2010/04/sleeping-arduino-part-5-wake-up-via.html > (Consulté le 15 juillet 2013).

MOSER, Gabriel. 2009. Psychologie environnementale, les relations homme-environnement. Bruxelles : de Boeck, 298 p. ISBN : 978-2-8041-1753-5.

MOUJALLED, Bassam. 2007. [Thèse]. Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés [En ligne]. Thèse en Génie Civil. Lyon : Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 330 p. Disponible sur : < http://fr.pdfsb.com/readonline/5a31684365774237576e64314448316b55513d3d-749128 > (Consulté le 4 décembre 2012).

NICOL, Fergus, Mike WILSON, et Cecilia CHIANCARELLA. 2006. « Using field measurements of desktop illuminance in European offices to investigate its dependence on outdoor conditions and its effect on occupant satisfaction, and the use of lights and blinds ». Energy and Buildings. Vol. 38, n°7, p. 802‑813.

NICOL, J.F., et M.A. HUMPHREYS. 2002. « Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings ». Energy and Buildings. Vol. 34, n°6, p. 563‑572.

NUSSAUME, Yann. 2013. « Choix énergétique à la française ou à la japonaise ». D'Architectures. n°214, p. 28‑32.

OLIVA, Jean-Pierre, et Samuel COURGEY. 2006. La conception bioclimatique : des maisons confortables et économes en neuf et réhabilitation. Mens : 239 p.

OSELAND, Nigel A. 1995. « Predicted and reported thermal sensation in climate chambers, offices and homes ». Energy and Buildings. Vol. 23, n°2, p. 105‑115.

OULLIER, Olivier, et Sarah SAUNERON. 2011. « Nudges verts » : de nouvelles incitations pour des comportements écologiques [En ligne]. Paris : Centre d'analyse stratégique, 12 p.(La note d'analyse, n°216) Disponible sur : < www.strategie.gouv.fr > (Consulté le 18 février 2013).

PIGG, Scott, Mark EILERS, et John REED. 1996. « Behavioral aspects of lighting and occupancy sensors in private offices : a case study of a University office building ». Dans : ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings [En ligne]. p. 8.161‑8.171. Disponible sur : < http://aceee.org/files/proceedings/1996/data/papers/SS96_Panel8_Paper18.pdf > (Consulté le 10 août 2015).

PIOT-ZIEGLER, Chantal, et Pascal GERBER. 2008. Perspectives psychologiques de la surchauffe estivale, Résultat d'un questionnaire d'enquête d'entretiens qualitatifs et d'un focus groupe [En ligne]. Lausanne : UNIL, Université de Lausanne, 75 p.(Projet EEDACS (Explosion of Energy Demand for Air Cooling in Summer), FNS n°405440-107126) Disponible sur : < http://www.nfp54.ch/files/nxt_projects_82/19_07_2011_09_53_35-NFP54KLIMATISIERUNGPerspectivespsychologiquesdelasurchauffeestivale.pdf > (Consulté le 11 décembre 2012).

POQUET, Guy, et Anne DUJIN. 2008. Pour les ménages, la recherche du confort prime sur les économies d'énergie [En ligne]. 4 p.(CREDOC, n°210) Disponible sur : < http://www.credoc.fr/publications/abstract.php?ref=CMV210 > (Consulté le 22 novembre 2012).

POUGET, André. 1982. « Réglementation 82 : mieux utiliser les apports gratuits ». Cahiers techniques du Bâtiment. n°41, p. 47‑59.

R.A.G.E., Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012. 2014. Façade multiple, Double peau ventilée naturellement sur l'extérieur [En ligne]. Disponible sur : < http://www.terranoi.fr/uploads/pdf/ressources_guides/48/1.pdf >

RAJA, Iftikhar A, J. Fergus NICOL, Kathryn J McCARTNEY, et Michael A HUMPHREYS. 2001. « Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings ». Energy and Buildings. Vol. 33, n°3, p. 235‑244.

REA, M. S. 1984. « Window blind occlusion: a pilot study ». Building and Environment. Vol. 19, n°2, p. 133‑137.

REINHART, C. F., et K. VOSS. 2003. « Monitoring manual control of electric lighting and blinds ». Lighting Research and Technology. Vol. 35, n°3, p. 243‑258.

RIVALLAIN, Mathieu. 2013. [Thèse]. Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants [En ligne]. Thèse en Sciences de l'ingénieur. Université Paris Est, 414 p. Disponible sur : < http://www.theses.fr/2013PEST1038 > (Consulté le 15 octobre 2013).

RODAN, Petre. 2013. « ds3234 ». Dans : GitHub [En ligne]. Disponible sur : < https://github.com/rodan/ds3234 > (Consulté le 3 septembre 2013).

ROHLES, Frédérick H. 2007. « Temperature & Temperment, A Psychologist Looks at Comfort ». ASHRAE Journal. p. 14‑22.

ROULET, Claude-Alain. 2008. Conditions de confort et de logement sain [En ligne]. EPFL, 70 p. Disponible sur : < www.enrdd.com/documents/documents/Construction-Ecoconstruction/Architecture responsable et developpement durable/roulet2008.pdf > (Consulté le 3 mai 2013).

RUBIN, Arthur I., Belinda L. COLLINS, et Robert L. TIBBOTT. 1978. « Window blinds as a potential energy saver - a case study ». NBS Building sciences series [En ligne]. n°112,. Disponible sur : < https://www.ncjrs.gov/App/Publications/abstract.aspx?ID=64368 > (Consulté le 10 août 2015).

SADEGHIPOUR ROUDSARI, Mostapha, et Michelle PAK. 2013. « Ladybug : a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design ». Dans : Proceedings of the 13th International IBPSA Conference [En ligne]. Lyon, France : Disponible sur : < http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_2499.pdf > (Consulté le 24 juillet 2015).

SALOMON, Thierry, et Claude AUBERT. 2004. Fraîcheur sans clim': le guide des alternatives écologiques. Mens (Isère) : Terre vivante, ISBN : 978-2-914717-09-0.

SCOTT, Greg. 2012. « Working up a sweat: Japan's cool biz campaign ». Disponible sur : < http://japanese.lingualift.com/blog/japan-cool-biz-campaign/ > (Consulté le 12 avril 2013).

SIDLER, Olivier. 2011. Enseignements des campagnes d'évaluation réalisées sur des bâtiments performants [En ligne]. Disponible sur : < http://www.enertech.fr/pdf/38/evaluation-par-mesure-des-premiers-batiments-bbc.pdf > (Consulté le 28 janvier 2013).

---. 2007. Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France [En ligne]. Projet « Renaissance », Programme européen CONCERTO, Disponible sur :

< http://www.enertech.fr/pdf/48/renovation%20basse%20consommation%20batiments.pdf > (Consulté le 25 août 2013).

SPARKFUN ELECTRONICS. 2011. « DeadOn RTC - DS3234 Breakout ». Dans : Sparkfun electronics [En ligne]. Disponible sur : < https://www.sparkfun.com/products/10160 > (Consulté le 3 septembre 2013).

SPITZ, Clara. 2012. [Thèse]. Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments [En ligne]. Thèse en Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Grenoble, France : Grenoble, Disponible sur : < http://www.theses.fr/2012GRENA004 > (Consulté le 24 juillet 2015).

SUBRÉMON, Hélène. 2009. [Thèse]. Habiter avec l'énergie. Pour une anthropologie sensible de la consommation d'énergie. [En ligne]. Thèse en Sciences sociales. Université de Nanterre - Paris X, Disponible sur : < https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00403802/document > (Consulté le 27 juillet 2015).

TAILLANDIER, Franck, Serge ARIES, Amadou NDIAYE, Benoit LEBLANC, Christophe FERNANDEZ, et Franck LABAT. 2013. « Aide au choix pour la réhabilitation thermique de maisons individuelles via un système expert ». Dans : De l'expérimentation à la modélisation en Génie Civil". 31ème rencontres universitaires de l'AUGC. Cachan, France : p. 10.

THELLIER, Françoise. 1989. [Thèse]. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat : une approche de l'étude du confort. France :

THELLIER, Françoise, Françoise MONCHOUX, et Jean-Pierre BEDRUNE. 2012. « Le confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant ! » Dans : Bâtiment-Énergie [En ligne]. JEEA 2012. Université de Cergy Pontoise : Disponible sur : < www.see.asso.fr/file/3383/download/7116 > (Consulté le 28 mars 2012).

VAN DEN WYMELENBERG, Kevin. 2012. « Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review ». Energy and Buildings. Vol. 51, p. 165‑176.

VILLOT, Jonathan. 2012. [Thèse]. Bâtiments et facteur 4, de l'émergence d'un objectif global à son application au niveau local. : Analyse des problématiques de rénovation dans le secteur résidentiel à caractère social. [En ligne]. Thèse en Sciences et Génie de l'environnement. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 350 p. Disponible sur : < http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00739707 > (Consulté le 5 février 2013).

VORGER, Éric. 2014. [Thèse]. Étude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment [En ligne]. Thèse en Énergétique. Paris : École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Disponible sur : < https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01144461/document > (Consulté le 6 mai 2015).

WARREN, P.R., et L.M. PARKINS. 1984. « Window-opening behavior in office buildings ». Dans : ASHRAE Transactions. Technical & Symposium Papers Presented at the 1984 Winter Meeting of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, GA, USA : p. 1056‑1076.

WRIGHT, David, et Jeffrey COOK. 2004. Manuel d'architecture naturelle. Marseille : Éditions Parenthèses, ISBN : 978-2-86364-124-8.

ZARAKET, Toufic. 2014. [Thèse]. Stochastic activity-based approach of occupant-related energy consumption in residential buildings [En ligne]. Thèse en Génie industriel. Paris : École centrale Paris, 269 p. Disponible sur : < https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01087894/document > (Consulté le 9 décembre 2014).

ANNEXES

A. Comparaisons des écarts annuels de températures des quatre stations météorologiques...253

B. Questionnaire d'enquête...255

C. Conception d'un enregistreur de données autonome avec la technologie Arduino...259

C.1. Montages et programmes initiaux...259

C.2. Réduction des consommations...261

D. Caractéristiques techniques des éléments du boîtier de capteurs...271

E. Programme du capteur fenêtre...275

F. Diagramme des appartements sélectionnés...283

G. Diagramme solaire...285

A. Comparaisons des écarts annuels de températures des quatre stations météorologiques

TEMPÉRATURE (°C)		VAUVERT	ECART ENTRE LA STATION ET VAUVERT (STATION-VAUVERT)		
			COURBESSAC	GARONS	FRÉJORGUES
2000	MAXIMUM	35,4	5,4	5,5	8,2
	MINIMUM	-2,4	-5,3	-5,1	-9,0
	MOYENNE	15,0	0,2	-0,1	0,3
	ÉCART TYPE	6,8	1,3	1,1	1,6
1999	MAXIMUM	34,0	6,0	6,4	7,9
	MINIMUM	-4,0	-6,8	-5,8	-7,4
	MOYENNE	14,6	0,2	-0,1	0,4
	ÉCART TYPE	7,5	1,4	1,2	1,6
1998	MAXIMUM	34,3	7,8	7,0	7,9
	MINIMUM	-3,9	-5,9	-5,1	-8,2
	MOYENNE	14,4	0,3	-0,1	0,5
	ÉCART TYPE	7,5	1,4	1,2	1,7
MOYENNE	MAXIMUM	34,6	6,4	6,3	8,0
	MINIMUM	-3,4	-6,0	-5,3	-8,0
	MOYENNE	14,6	0,2	-0,1	0,4
	ÉCART TYPE	7,3	1,4	1,2	1,7

Comparaison des moyennes, maximum, minimum et écart type des températures des quatre stations météorologiques étudiées
de l'auteur d'après Météo-France

B. Questionnaire d'enquête

VOTRE CONFORT THERMIQUE NOUS INTÉRESSE !

Répondre au questionnaire sur la double page suivante en cochant la réponse choisie OU sur internet à l'adresse suivante : http://confortthermiquelmgc.wix.com/enquete OU en flashant le code

QUI ETES-VOUS ?

1. *Bâtiment (adresse) :* ……
2. *Etage :* ……
3. *Numéro d'appartement :* ……
4. *Orientation principale :* N ☐ N/E ☐ E ☐ S/E ☐ S ☐ S/O ☐ O ☐ N/O ☐
5. *Type de chauffage :* Individuel ☐ Collectif ☐ — Gaz ☐ Electrique ☐ Fioul ☐ Bois ☐
6. *Type d'Eau chaude Sanitaire :* Individuel ☐ Collectif ☐ — Gaz ☐ Electrique ☐ Fioul ☐ Bois ☐
7. *Qui êtes vous ?(répondant)* H ☐ F ☐ — 0 - 15 ans ☐ 16 - 30 ans ☐ 31 - 65 ans ☐ Plus de 66 ans ☐
8. *Combien de personnes vivent avec vous ? (une réponse par ligne)*

	0	1	2	3	4 ou +
0 - 15 ans	☐	☐	☐	☐	☐
16 - 30 ans	☐	☐	☐	☐	☐
31 - 65 ans	☐	☐	☐	☐	☐
Plus de 66 ans	☐	☐	☐	☐	☐

9. *Vous êtes dans l'appartement depuis :* moins de 1 an ☐ moins de 3 ans ☐ plus de 3 ans ☐
10. *A quel moment de la journée êtes vous dans le logement?*

	9-12h	*12-14h*	*14-18h*	*18-20h*	*20h-9h*
Lundi-Vendredi	☐	☐	☐	☐	☐
Samedi	☐	☐	☐	☐	☐
Dimanche	☐	☐	☐	☐	☐

CHEZ VOUS, IL FAIT COMBIEN ?

11. *Thermiquement, trouvez-vous votre appartement confortable ?* Oui, en toute saison ☐ — Oui, sauf … *(Précisez)* ☐ …… — Non ☐
12. *Savez-vous que le confort thermique est défini par la température, l'humidité, la vitesse de l'air, l'habillement, l'activité métabolique du corps?* Oui ☐ Non ☐

L'ÉTÉ et votre appartement…

D'après votre expérience	cuisine	séjour	chambre	salle de bain	ne sais pas
13. *En été, la pièce la plus chaude est :*	☐	☐	☐	☐	☐
14. *En été, la pièce la plus fraîche est :*	☐	☐	☐	☐	☐

Dans votre séjour, en été, vous avez,

	Très froid	Froid	Un peu froid	Je suis bien	Un peu chaud	Chaud	Très chaud
15. *En moyenne :*	← ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐ →
16. *De temps en temps :*	← ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐ →

Vous trouvez cela,

	Supportable	Insupportable
17. *En moyenne :*	☐	☐
18. *De temps en temps :*	☐	☐

En été pour rafraîchir votre appartement vous faites quoi ?

19. *Ouvrez-vous la fenêtre pour créer un courant d'air ?*	Oui ☐	Non ☐				
20. *Si oui, à quel moment ?* *(plusieurs réponses possibles)*	le matin ☐	la journée ☐	le soir ☐	la nuit ☐	quand j'ai chaud ☐	
21. *En été avec la fenêtre ouverte, les mouvements d'air sont-ils présents ?*	Oui, beaucoup ☐	Moyennement ☐	Non ☐			
22. *Trouvez vous cela dérangeant ?*	Oui, beaucoup ☐	Moyennement ☐	Non ☐			
23. *Fermez-vous les volets ou utilisez-vous des protections solaires pour vous protéger de la chaleur ? (brise-soleils orientables,persiennes…)*	Oui, dans toutes les pièces ☐	Oui, dans la pièce où je me trouve ☐	Non ☐			
24. *Possédez-vous un ventilateur ?*	Oui ☐	Non ☐				
25. *Si oui, améliore-t-il votre confort ?*	Oui ☐	Non ☐				
26. *Possédez-vous une climatisation ?*	Oui ☐	Non ☐				

L'HIVER et votre appartement…

	cuisine	séjour	chambre	salle de bain	ne sais pas
D'après votre expérience					
27. *En hiver, la pièce la plus chaude est :*	☐	☐	☐	☐	☐
28. *En hiver, la pièce la plus fraîche est :*	☐	☐	☐	☐	☐

Dans votre séjour, en hiver, vous avez,

	Très froid	Froid	Un peu froid	Je suis bien	Un peu chaud	Chaud	Très chaud
29. *En moyenne :*	← ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐ →
30. *De temps en temps :*	← ☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐ →

Vous trouvez cela,

	Supportable	Insupportable
31. *En moyenne :*	☐	☐
32. *De temps en temps :*	☐	☐

Pour chauffer votre appartement ?

33. *Possédez-vous un chauffage d'appoint ?*	Oui, dans le séjour ☐	Oui, dans la salle de bain ☐		
	Oui, dans la chambre ☐	Oui, dans la cuisine ☐		
	Non ☐			
34. *Si oui, de quel type ?*	Poêle à pétrole ☐	Convecteur électrique ☐		
	Poêle à gaz ☐	Radiant électrique ☐		
	Radiateur à bain d'huile ☐	Soufflant électrique ☐		
	Autre ☐			
35. *Fermez vous les volets la nuit?*	Oui, dans toutes les pièces ☐			
	Oui, dans les chambres ☐			
	Non ☐			
36. *Si oui, ouvrez vous les volets le matin pour profiter des apports solaires ?*	Oui ☐	Non ☐		
37. *Ouvrez-vous les fenêtres pour aérer l'appartement ?*	Oui ☐	Non ☐		
38. *Baissez-vous le thermostat de votre chauffage principal quand vous n'êtes pas chez vous?*	Oui ☐	Non ☐		
39. *A l'intérieur, adaptez-vous votre habillement à la saison?*	Oui, je préfère mettre un pull au lieu d'augmenter le chauffage ☐			
	Non, je préfère augmenter le chauffage ☐			
	Je ne fais rien de spécial ☐			
40. *Le coût du chauffage est pour vous :*	Très élevé ☐	Elevé ☐	Raisonnable ☐	

VOUS ET LE DEVELOPPEMENT DURABLE ?

41. *L'environnement, vous…* — Intéresse et vous êtes actifs ☐ / Intéresse ☐ / Intéresse pas ☐

42. *Quelle est ou serait votre motivation pour réduire vos consommations d'énergie ?* — Devoir civique ☐ / Raisons économiques ☐ / Protection de l'environnement ☐

43. *Avez-vous reçu un guide pour vous inciter à réduire vos consommations d'énergie ?* — Oui ☐ Non ☐

44. *Si oui, avez-vous trouvé cela utile ?* — Oui ☐ Non ☐

45. *Selon vous et vos consommations d'énergie, vous diriez que votre foyer est :* — Energivore ☐ Moyen ☐ Sobre ☐

46. *Quel est, selon vous, la qualité de l'isolation* thermique de votre logement *(murs, volets, fenêtres)?* — Bonne ☐ Moyen ☐ Faible ☐

47. *Quel serait, selon vous, l'élément à réhabiliter en priorité?* — Fenêtres ☐ / Volets ☐ / Porte d'entrée ☐ / Isolation des parois ☐ / Système de chauffage. ☐

UN COMMENTAIRE, CETTE PARTIE EST A VOUS…

48. *Merci de nous faire part des commentaires en relation avec ce questionnaire ou qui vous semblent importants pour la suite de notre étude.*

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

49. *L'analyse détaillée de votre appartement nous intéresse : Accepteriez-vous de poursuivre l'étude et de participer à un suivi de votre appartement ?* — Oui ☐ Non ☐ Pourquoi pas ☐

C. Conception d'un enregistreur de données autonome avec la technologie Arduino

Dans le monde de l'Arduino, il existe une multitude de cartes avec microprocesseur. Dans un premier temps et sans connaissance particulière en électronique, nous nous sommes orientés vers la carte Arduino Uno qui est préconisée pour les débutants dans ce domaine. Il existe de plus, sur internet, une multitude de tutoriels concernant cette carte. Elle est composée d'un microcontrôleur ATmega328, (comme la plupart des cartes Arduino).



FIGURE C.1 : *Photographie de la carte Arduino Uno*
Arduino.cc

C.1. Montages et programmes initiaux

Sur la *Figure C.2*, les différents capteurs, le lecteur de carte mémoire et l'horloge sont connectés à un circuit imprimé lui-même relié à la carte Arduino Uno. Les alimentations continues (VCC) sont représentées en rouge alors que les connexions à la masse (GND) sont en noir. Les liaisons en blanc symbolisent les connexions de la communication par S.P.I. (Serial Peripheral Interface). Les connexions de couleur permettent le passage des données entre les composants et la carte Arduino Uno. Cette dernière est alimentée par quatre piles AA de 1,5 V chacune.

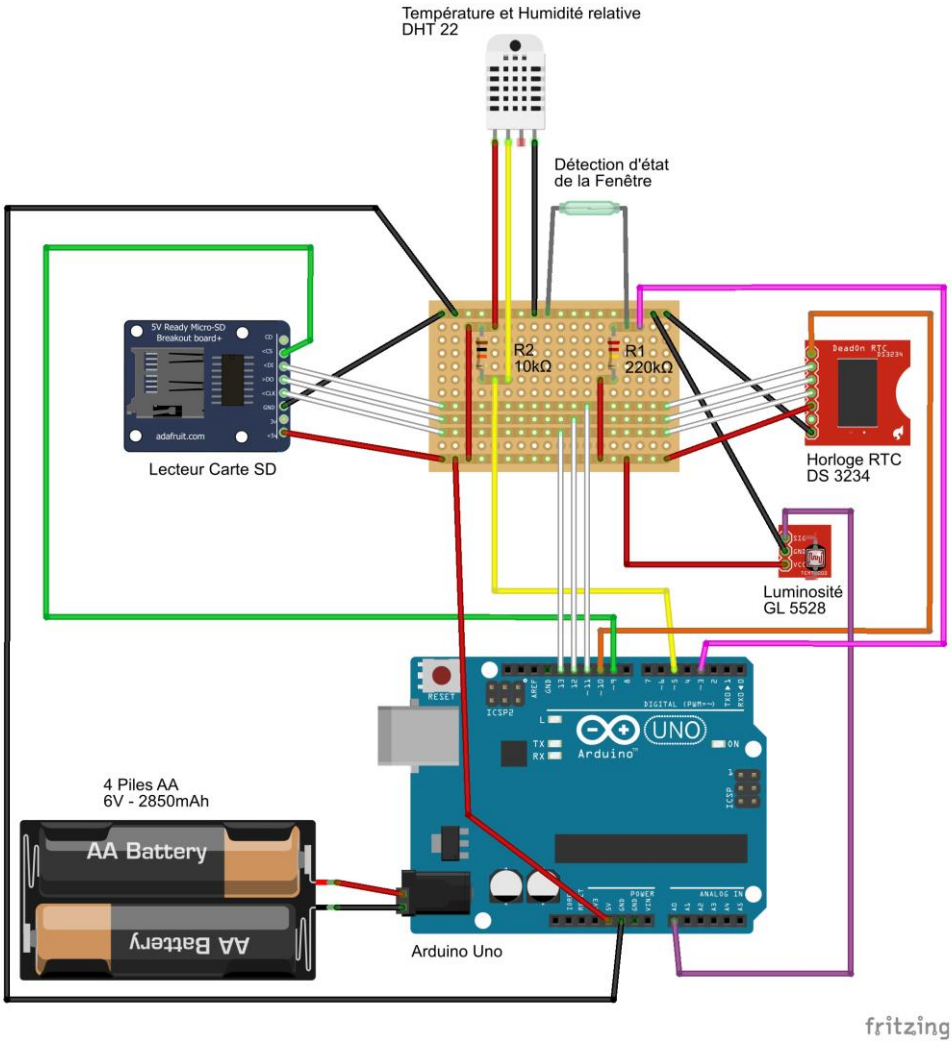


FIGURE C.2 : *Schéma de montage initial des capteurs sur la carte Arduino Uno.*
de l'auteur

La programmation d'une carte, synthétisée sur le diagramme en *Figure C.3*, comporte différentes étapes :

- Un en-tête déclaratif pour déclarer les éléments utilisés dans le programme
- Une fonction SETUP pour initialiser les capteurs et la carte mémoire
- Une fonction LOOP qui correspond à la phase de mesure qui sera répétée en boucle jusqu'à la fin de l'alimentation du microcontrôleur.

Cette programmation nous permet d'obtenir un fichier texte, enregistré sur une carte mémoire, dont les données peuvent ensuite être lues dans un tableur.

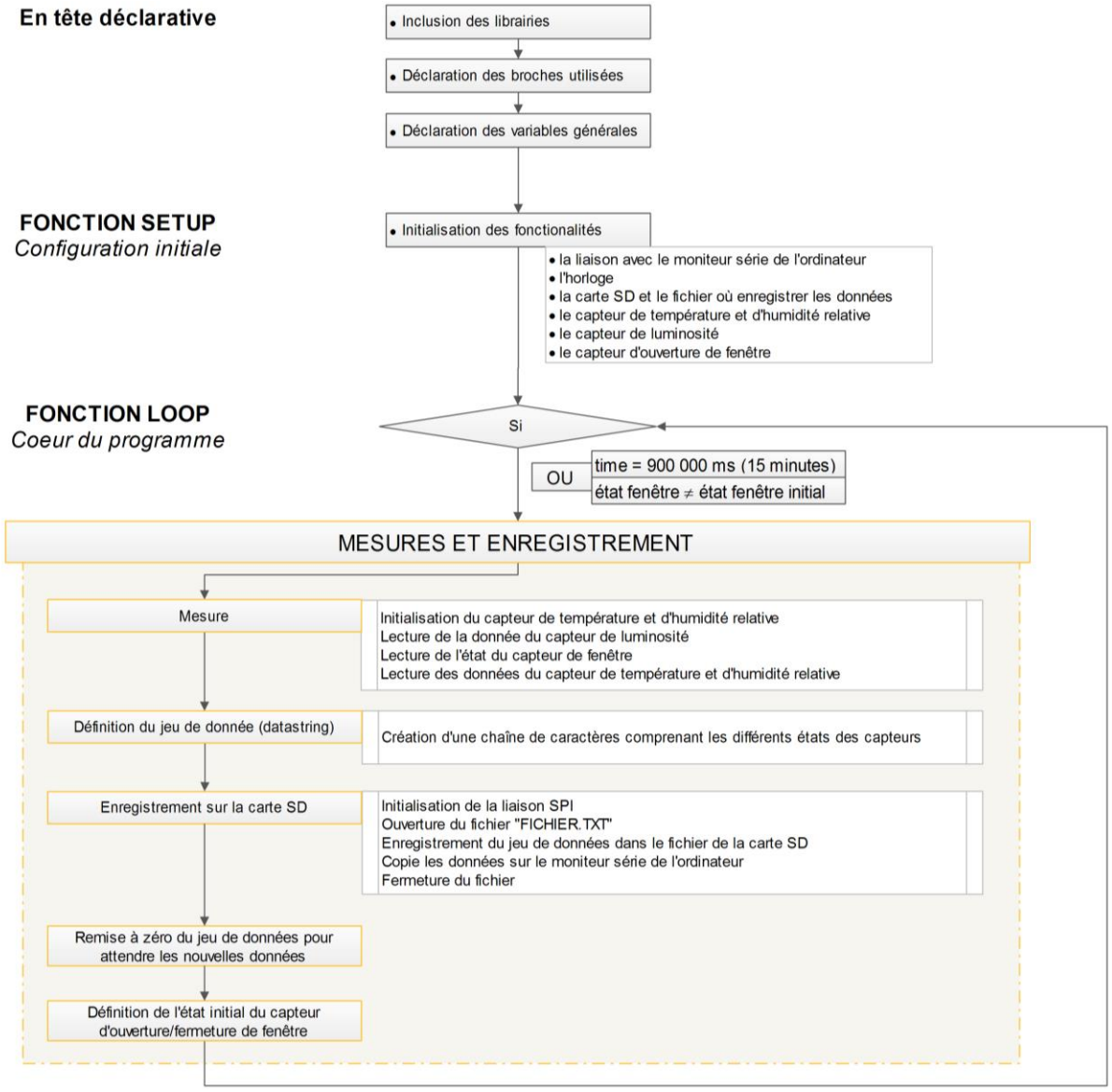


FIGURE C.3 : *Diagramme du programme initial téléchargé dans la carte*
de l'auteur

C.2. Réduction des consommations

Pour un minimum d'encombrement et de dérangement des locataires des appartements étudiés, le boîtier de capteur doit être alimenté indépendamment de l'alimentation électrique des appartements étudiés et avoir une autonomie suffisante pour pouvoir enregistrer et sauvegarder deux mois de mesures.

Par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition et du logiciel Signal Express de National Instruments, nous avons mesuré et enregistré la tension aux bornes d'une résistance de 10 ohms placée en série entre la pile et le branchement du boîtier de capteurs (*Figure C.4*). D'après la loi d'Ohm :

$$\boldsymbol{U} = R * I \qquad \text{[Éq. C.1]}$$

- U : *Tension, V*
- R : *Résistance, Ω*
- I : *Intensité, A*

Connaissant la résistance et mesurant la tension, nous avons obtenu l'intensité traversant notre circuit. Nous avons pu en déduire l'autonomie de notre boîtier de capteurs en fonction du type de pile.

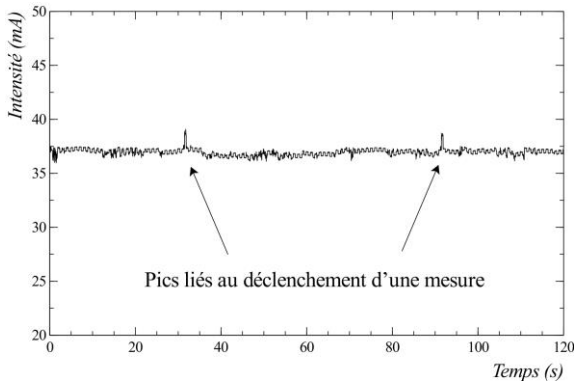


FIGURE C.4 : *Consommation de la carte Arduino et ses capteurs lors d'une prise de mesure toutes les minutes.*
de l'auteur

Lors de l'enregistrement de la tension, le déclenchement des mesures s'effectue toutes les minutes. La durée d'acquisition étant de deux minutes, nous observons deux pics correspondant aux déclenchements des mesures. Dans un premier temps, aucune mise en veille n'est programmée, la carte et ses capteurs restent actifs. Ils consomment en permanence 37,1 mA avec des pics à 38,6 mA lors des mesures (*Figure C.4*). La différence entre les deux est minime et la consommation pendant les mesures peut alors être négligée. Le circuit est alimenté avec quatre piles AA pour obtenir une tension de 6 V. Pour avoir une approximation de la capacité des piles, on peut se référer au site de *(GAMMON, 2012)*, dont les résultats sont résumés dans le tableau de l'*annexe D*. La capacité des piles AA est de 2850 mAh et d'après l'équation suivante, le « boîtier de capteur » a une autonomie d'environ 77 heures, soit trois jours.

$$autonomie\ du\ capteur\ [h] = \frac{capacité\ de\ la\ pile\ [mAh]}{consommation\ [mA]} \qquad \text{[Éq. C.2]}$$

Dans notre cas nous souhaitons un dispositif avec une autonomie de deux à trois mois. D'après l'équation *[Éq. C.2]* il nous faudrait une pile ayant une capacité de 54 Ah, pour une durée de deux mois pour le même niveau de consommation, ou diviser par vingt la consommation pendant la veille (soit une consommation autour de 1 mA) pour conserver l'alimentation sur piles AA. Pour connaître les économies pouvant être envisagées, nous nous sommes alors basés sur la démarche de *(GAMMON, 2012)*. Afin de réduire la consommation, différentes solutions ont été envisagées.

- Mettre le microprocesseur en veille

Il existe différents types de mise en veille permettant de désactiver certaines fonctions du microprocesseur. Le choix du type de mise en veille dépend des fonctionnalités que l'on souhaite conserver pendant la veille. Dans notre cas, nous nous servons uniquement des interruptions pour détecter l'ouverture ou la fermeture des fenêtres et de l'interruption de l'alarme de l'horloge pour les cycles de 15 minutes. D'après le tableau suivant le mode Power_Down, est le plus économe et correspond à nos exigences.

Fonctionnalité du Processeur / Mode	Analog to Digital Converter (ADC)	Brownout Detector (BOD)	Watchdog Timer	Timer 2	Timer 1	Timer 0	Serial Peripheral Interface (SPI)	USART, port USB	Two-Wire Interface (TWI)	Interrupt system	Oscillateur externe	Processeur
IDLE	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	I
ADC	A	A	A	A	I	I	I	I	A	A	A	I
PWR_SAVE	A	A	A	A	I	I	I	I	A	A	I	I
STANDBY	A	A	A	I	I	I	I	I	A	A	A	I
PWR_DOWN	A	A	A	I	I	I	I	I	A	A	I	I

A : Actif I : Inactif

TABLEAU C.1: *Modules actifs ou inactifs en fonction du type de mise en veille*
de l'auteur d'après (ATMEL Corporation, 2009)

Une acquisition des consommations a été réalisée en mettant la carte Arduino dans les différents types de mise en veille. Le code stipulait seulement de mettre la carte en veille sans connecter les capteurs.

Type de mise en veille	Intensité (mA) Arduino Uno
Pas de mise en veille (setup et boucle vide)	33,4
SLEEP_MODE_IDLE	32,0
SLEEP_MODE_ADC	27,3
SLEEP_MODE_PWR_SAVE	26,3
SLEEP_MODE_STANDBY	25,8
SLEEP_MODE_PWR_DOWN	25,1

TABLEAU C.2 : *Consommation de la carte Arduino Uno en fonction des différents types de mise en veille.*
de l'auteur

On remarque différents niveaux de consommation. Cette dernière baisse en même temps que le nombre de fonctionnalités mises en veille. Le mode *power down* est celui qui désactive le plus de fonctionnalités et donc, qui consomme le moins : 25,1 mA (*Tableau C.2*).

Nous avons vu précédemment que le mode le plus économique est le *SLEEP_MODE_PWR_DOWN*. Les caractéristiques du constructeurs du microcontrôleur (ATMEL Corporation, 2009), nous indiquent qu'il existe que trois façons de réveiller le microcontrôleur lorsqu'il se trouve dans ce mode de veille :

- Une interruption externe sur les broches D2 (INT0) et D3 (INT1) ou une interruption changement d'état d'une broche. (à déclarer dans le programme)
- Le minuteur Watchdog
- Une correspondance d'adresse T.W.I.

Nous souhaitons détecter une ouverture/fermeture de fenêtre, l'interruption externe (INT1) semble alors appropriée. Nous désirons, de plus, une minuterie toutes les 15 minutes. L'alarme de l'horloge temps réel peut provoquer une interruption externe (INT0) permettant de réveiller le microcontrôleur. La programmation de la carte change sensiblement afin d'intégrer les interruptions (cf. *Figure C.6*). *(MORRISSEY, 2010a, 2010b, 2011)* fournit des explications permettant de mettre en place ces interruptions.

Mis en veille, le capteur consomme 29,4 mA (*Figure C.5*) au lieu de 37,1 mA vu précédemment, soit une économie de 7,7 mA et le signal est stabilisé pendant les phases de veille. Lors des mesures, la consommation est toujours à 38,6 mA. Malgré la mise en veille de la carte, cette dernière consomme encore trop pour prévoir une alimentation sur pile.

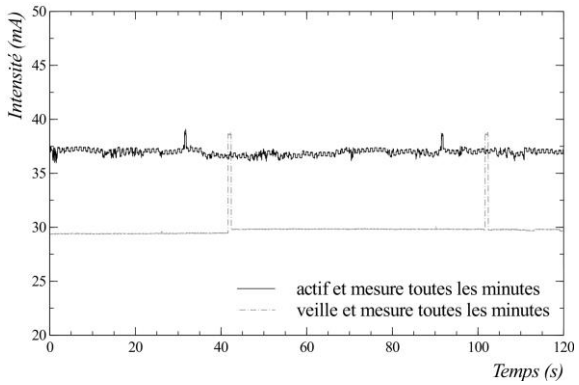


FIGURE C.5 : *Impact de la mise en veille de la carte Arduino Uno et de ses capteurs de l'auteur*

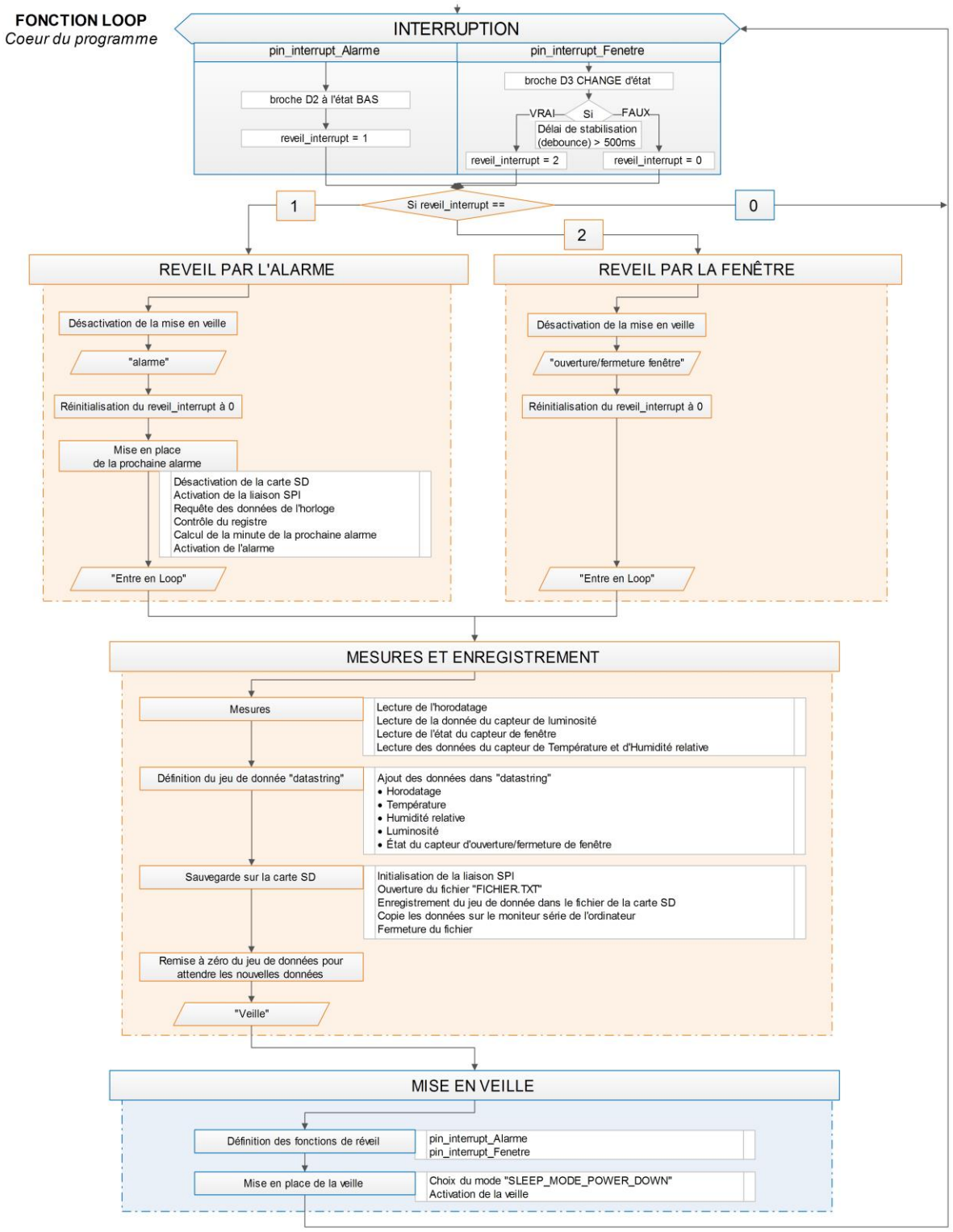


FIGURE C.6 : *Diagramme représentant le programme téléchargé dans la carte de l'auteur*

– Changement du type de carte

La carte Arduino Uno, embarque de nombreux éléments non nécessaires à notre instrumentation (interface U.S.B., D.E.L.,…). Deux cartes comprenant le même microcontrôleur, afin de conserver le programme réalisé précédemment, et moins consommatrices de courant ont

été testées. Le R.B.B.B. Pro, « Really Bare Bones Board » (*Figure C.7.a*) est une carte comprenant les composants minimums pour un fonctionnement autonome. La carte Arduino Pro Mini (*Figure C.7.b*) est une carte Arduino miniaturisée conçue pour être intégrée dans un projet fini. Le choix de ces cartes s'est fait grâce à *(HANSCR, 2013a ; HANSCR, 2013b)* qui explique comment faire fonctionner une carte Arduino sur piles AA, notre objectif.

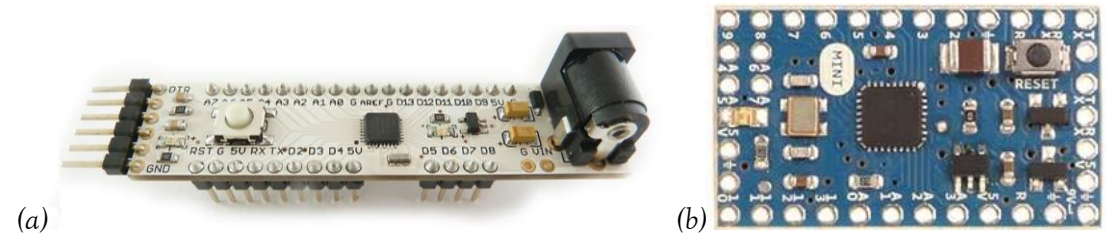


FIGURE C.7 : *Photographie des cartes (a) R.B.B.B. Pro et (b) Arduino Pro mini*
Moderndevice.com et Arduino.cc

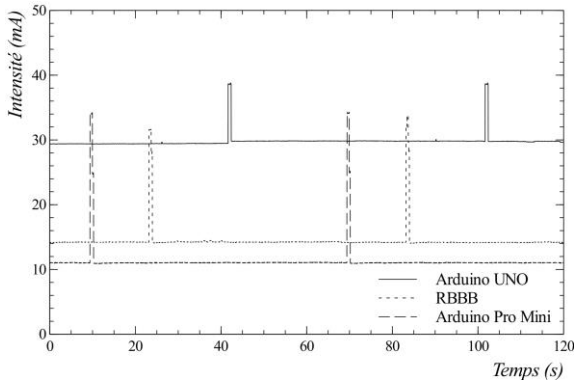


FIGURE C.8 : *Consommation de la carte Arduino UNO, du RBBB et de la carte Arduino Pro Mini lorsque les mesures sont effectuées toutes les minutes.*
de l'auteur

Le changement de carte (*Figure C.8*) nous permet de réduire les consommations pendant la veille mais également pendant la période de mesures. La carte Arduino Pro mini est celle qui permet le plus d'économies lors de la mise en veille et lors de la prise de mesures. Elle consomme 11,1 mA pendant la veille et 31,1 mA pendant la prise de mesure. Soit une réduction de 18,3 mA pendant la phase de veille. C'est celle qui est choisie pour la suite de l'étude.

– Désactiver l'alimentation des capteurs lors de la mise en veille

Même en veille, les capteurs consomment. Afin de réduire la consommation, nous les alimentons seulement lorsqu'on en a besoin. Pour cela on a branché les bornes VCC des capteurs de température et d'humidité ainsi que le capteur de luminosité sur la broche D6 que l'on a programmée en sortie. L'alimentation du lecteur de carte mémoire est connectée à la broche D7. L'horloge et le capteur d'ouverture de fenêtre doivent être tout le temps alimentés pour pouvoir détecter les interruptions, ils resteront donc connectés à la broche VCC comme lors de la première instrumentation. Le schéma de ce nouveau montage sur le principe du montage précédent est présenté au cours de la thèse (*Figure 2.54*). La programmation est également modifiée (*Figure 2.56*).

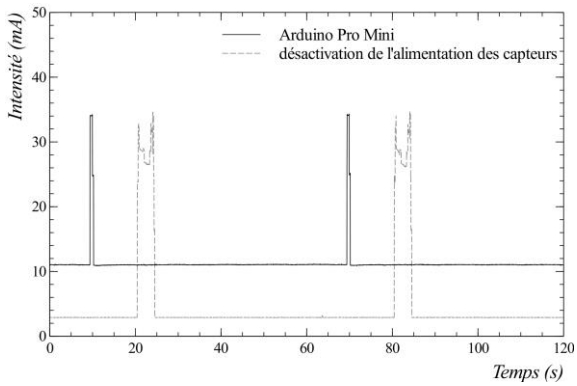


FIGURE C.9 : *Alimentation des capteurs et de la carte mémoire par des broches digitales de l'auteur*

Le capteur ne consomme plus que 2,90 mA lorsqu'il est en veille (*Figure C.9*), soit une économie de 8,2 mA, ce qui commence à devenir intéressant pour une alimentation sur piles AA. D'autres économies peuvent encore être réalisées. Afin d'alimenter correctement les capteurs, il nous a fallu ajouter des délais entre le moment où les capteurs sont allumés et le moment où ils doivent effectuer une mesure. Dans un premier temps nous avons mis 200 ms mais nous verrons par la suite que nous pouvons réduire cette durée. De ce fait, la prise de mesure dure quatre secondes avec une consommation moyenne de 28,08 mA.

– Désactivation de divers modules de la carte

Nous sommes déjà arrivés à une consommation très faible de notre capteur par rapport aux premiers essais. Les efforts suivants permettent, de gagner quelques microampères, afin de nous rapprocher au maximum d'une consommation de l'ordre de 1 mA.

Action effectuée	Intensité (mA) Arduino Uno
Désactivation de l'alimentation des capteurs	2,90
Désactivation du S.P.I.	2,16
Désactivation de l'I2C	1,82
Désactivation du B.O.D	1,81
Désactivation de l'A.D.C.	1,53
D.E.L. de la carte Arduino Mini Pro dessoudée	1,19

TABLEAU C.3 : *Consommation électrique due à la désactivation de différents modules du microcontrôleur et de la carte Arduino Pro mini.*
de l'auteur

La connexion S.P.I. est nécessaire lorsqu'on demande des informations à l'horloge ou au lecteur de carte mémoire. Sa mise hors service lors de la veille permet d'obtenir une consommation de 2,16 mA soit une économie de 0,74 mA. Elle est réactivée dès qu'une interruption apparaît.

Nous n'utilisons pas la connexion I2C. Lorsque l'I2C est désactivé, on obtient une consommation de 1,82 mA en veille, soit une économie de 0,34 mA.

Le B.O.D. (Brown-out Detect) sert à détecter les baisses de tension. Il permet de protéger le microcontrôleur et de lui éviter un fonctionnement anarchique. Sa désactivation nous fait gagner seulement 0,01 mA, ce qui est très faible. Au vu des économies réalisées et des impacts que peut avoir sa désactivation, nous avons décidé de le laisser actif pour protéger le microcontrôleur et obtenir des données cohérentes.

L'A.D.C. permet d'augmenter le nombre de broches numériques disponibles sur la carte Arduino. En effet, les broches analogiques sont la plupart du temps utilisées pour mesurer la tension de capteurs analogiques, mais dans des cas particuliers, on peut avoir besoin de plus de broches digitales. Ce convertisseur renvoie des résultats de mesure sous la forme d'entiers de 0 à 1023. Les broches ont alors les mêmes fonctionnalités que les autres broches numériques de la carte Arduino. La désactivation de l'A.D.C. nous permet d'avoir une consommation de 1,53 mA, soit une économie supplémentaire de 0,28 mA.

La carte Arduino Pro Mini possède une diode électro luminescente (D.E.L.) permettant de connaître si la carte est alimentée ou non. Les D.E.L. sont très consommatrices de courant. L'enlever, ou du moins enlever la résistance à laquelle elle est reliée, nous a permis de gagner quelques microampères supplémentaires. En effet, la consommation passe de 1,53 mA à 1,19 mA soit une économie de 0,34 mA, non négligeable.

Enfin, pour protéger les données et la carte nous avons programmé le microcontrôleur de manière à ce qu'il relève la tension fournie par les piles. Après plusieurs tests en laboratoire avec une alimentation variable nous avons pu identifier le seuil à partir duquel le microcontrôleur coupe l'acquisition des mesures. Ainsi nous avons programmé le boîtier de capteurs de manière à ce qu'il s'arrête si la tension était plus faible que le seuil précédemment déterminé.

– Autonomie

Les gains réalisés par les différentes actions sont résumés dans le tableau suivant. Au final, nous obtenons une consommation de 1,19 mA pendant les périodes de veille ce qui s'approche des 1 mA que l'on espérait pour pouvoir alimenter le capteur sur des piles AA.

Actions	Consommation (mA)	Gains (mA)
Carte Arduino UNO et ses capteurs	37,1	-
Mise en place d'une veille	29,4	7,7
Changement de carte pour Arduino Pro Mini	11,1	18,3
Changement d'alimentation des capteurs et de la carte mémoire	2,90	8,27
Désactivation du S.P.I.	2,16	0,74
Désactivation de l'I.2.C.	1,82	0,34
Désactivation du B.O.D.	1,81	0,01
Désactivation de l'A.D.C.	1,53	0,28
Suppression de la D.E.L.	1,19	0,34
Total des économies réalisées	-	*35,91*

TABLEAU C.4 : *Récapitulatif des consommations et des économies réalisées de l'auteur*

Nous avons vu que les temps d'attente entre les moments d'activation et de désactivation des alimentations des capteurs et de la carte mémoire n'étaient pas optimisés. Le code précédent a été modifié de manière à réduire les temps d'attente à 20 ms au lieu de 200 ms, ce qui reste suffisant pour que les capteurs fonctionnent. Cette intervention nous a permis d'obtenir une période de mesure de deux secondes au lieu de quatre secondes comme précédemment (*Figure C.10*). Le fait de diviser par deux la durée de la mesure permet d'augmenter légèrement la durée de vie du boîtier de capteurs. En effet, nous verrons par la suite que ce ne sont pas les périodes de mesures qui impactent sur la consommation.

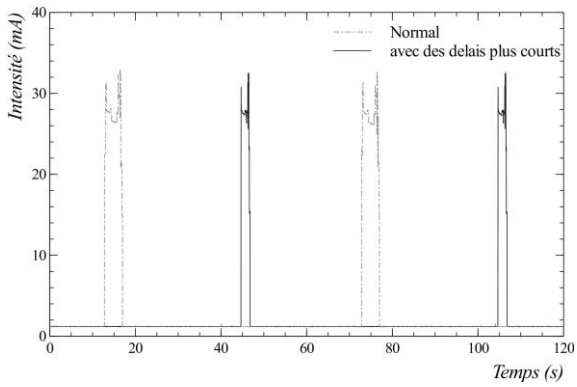


FIGURE C.10 : *Impact de la réduction des délais.*
de l'auteur

Pour calculer l'autonomie de notre capteur, nous avons fait une moyenne des intensités obtenues pendant la phase de mesure et une autre pendant la phase de veille. Afin d'estimer la consommation, nous avons pris comme hypothèse deux cycles d'ouverture/fermeture de la fenêtre par jour, soit quatre fois deux secondes de mesures. Les consommations et les durées sont synthétisées dans le *Tableau C.5*.

Phase	Veille	Mesure	Déclenchement Fenêtre
Consommation Marge de sécurité : 5 %	1,2 mA C_v = 1,26 mA	27 mA C_m = 28,35 mA	27 mA C_f = 28,35 mA
Durée de la mesure		2 s	2s
Intervalle		96 mesures/jour (4 mesure / heure)	4 mesures/jour
Durée sur une journée	T_v = 3600x24-T_m-T_f T_v = 86200 s	T_m = 2x96 T_m = 192 s	T_f = 2x4 T_f =8 s

TABLEAU C.5 : *Tableau récapitulatif de la consommation et de la durée des différentes phases du capteur*

D'après l'équation *[Éq. C.3]* et les données du tableau précédent, le boîtier des capteurs a une consommation moyenne de 1,32 mA. Quatre piles Alcaline AA permettent de fournir une tension de 6 V et ont une capacité de 2850 mAh (au lithium 3000 mAh). D'après l'équation *[Éq. C.2]*, la durée de vie de notre capteur est de 2159 heures, soit près de 90 jours. Les mesures toutes les quinze minutes utilisent 4,7 % de la consommation journalière. Celle due à l'ouverture et la fermeture de la fenêtre par contre représente seulement 0,2 %. La veille est donc responsable de près de 95 % de la consommation du capteur. D'où l'importance de réduire son impact comme nous venons de le faire.

$$C = \frac{\sum C_i * T_i}{\sum T_i} = \frac{C_v * T_v + C_m * T_m + C_f * T_f}{T_v + T_m + T_f} \qquad \text{[Éq. C.3]}$$

- *C* : *Consommation, mA*
- *T* : *Durée, s*
- *Indices :*
- *i* : *différentes phases du capteur*
- *v* : *phase de veille*
- *m* : *phase de mesures régulières*
- *f* : *phase de mesures ponctuelles*

L'ensemble des modifications au niveau du circuit (alimentations différenciées, D.E.L. dessoudée) ou du programme (mise en place des interruptions, désactivation des différents modules ; cf. Programme complet *Figure 2.56*) nous a permis d'obtenir un capteur présentant une autonomie de trois mois. Dans le cadre de notre étude, un contact tous les deux mois avec les locataires nous permettra de les interroger sur leur confort ressenti mais également de réduire le risque de perte de données. Lors de ces visites, nous pourrons également effectuer un suivi des consommations (gaz et électricité).

D. Caractéristiques techniques des éléments du boîtier de capteurs

– Capteur de température et d'humidité DHT22

Température ambiante	-40 °C à +80 °C, précision ±0,5 °C
Humidité relative	0 à 100 %, précision 2 à 5 %
Échantillonnage du capteur	0,5 Hz (donc une mesure toutes les deux secondes)
Alimentation	3 à 5 V
Consommation	2,5 mA max (lors des mesures)
Dimension	27 x 59 x 13,5 mm
Prix	15,00 €
Connexion	Broche 1 : Alimentation Vcc 5 V Broche 2 : data relié à la borne digitale D5 avec une résistance de 10 kΩ Broche 3 : - Broche 4 : GND

Source : Ladyada.net

– Capteur d'ouverture/fermeture de fenêtre

Alimentation	3 à 5 V
Consommation	0,5 à 3 mA
Dimension	23 x 14 x 7 mm
Prix	2,00 €
Connexion	Borne GND Borne alimentation (5 V) relié à une résistance de tirage de 220 kΩ à la borne digitale D3
Matériaux	Plastique P.V.C.

Source : Evola.fr

– Capteur de luminosité TSL2561

Prix	10,90 €
Alimentation	3 à 5 V
Consommation	
Dimension	23 x 14 x7 mm
Connecteur de raccordement Grove	oui
Plage de mesure	0,1 à 40 000 lux
Plage de température	-30 à 80 °C
Résolution	Haute : 16 bits (400 kHz, I2C)
Détection	2 modes (large spectre ou plage Infra-Rouge)
Interface	I2C
Connexion	Fil noir à la borne GND
	Fil rouge à la borne 5 V
	Fil blanc à la borne SDA soit la borne A4
	Fil jaune à la borne SCL soit la borne A5

Source : Evola.fr

– Capteur de luminosité GL5528

Prix	3,90 €
Alimentation	3 à 30 V
Consommation	0,5 à 3 mA
Dimension	23 x 14 x7 mm
Connecteur de raccordement Grove	Situé au dos du circuit imprimé
Plage de mesure	0-1024 (à étalonner)
Connexion	Fil noir à la borne GND
	Fil rouge à la borne 5 V
	Fil jaune à la borne A0
	Fil blanc : sans borne

Source : Evola.fr

Afin de comprendre à quoi correspondent les mesures réalisées avec le capteur de luminosité GL5528, nous avons fait varier la luminosité d'une pièce et l'avons mesuré d'une part avec deux de nos capteurs et d'autre part avec un luxmètre. Les résultats sont présentés dans la figure suivante. On observe que les mesures que nous avons faites ne sont pas proportionnelles à des valeurs en lux et qu'à partir de 200 lux, notre capteur est saturé. Cependant, cela est suffisant pour détecter la fermeture complète d'un volet.

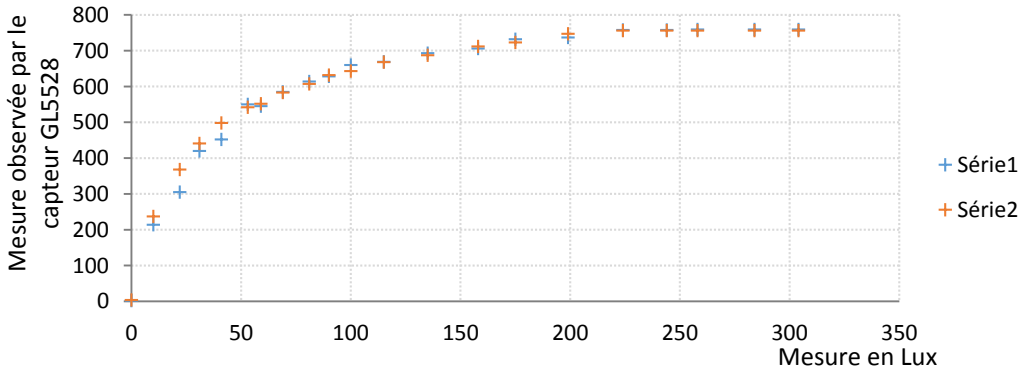


FIGURE D1 : *Mesure de deux de nos capteurs en fonction d'une mesure en lux. de l'auteur*

– Capteur du module lecteur de carte SD

Prix	12,60 €
Alimentation	5 V
Interface	SPI
Connexion	GND à la borne GND VCC à la borne 5 V CLK à la borne D13 MISO à la borne D12 MOSI à la borne D11 SS à la borne D9

Source : Roboshop.com

– Capteur de l'horloge temps réel DS3234

Prix	17,95 €
Alimentation	3 à 30 V
Consommation	faible
Interface	SPI
Alarmes	2
Précision	±2 ppm
Calendrier	Jusqu'en 2100
Sauvegarde de l'heure et la date	oui
Format	12/24h avec indicateur AM/PM
Connexion	GND à la borne GND VCC à la borne 5 V SQW à la borne D2 CLK à la borne D13 MISO à la borne D12 MOSI à la borne D11 SS à la borne D10

Source : Sparkfun.com

– Différents types de piles et leur capacité

Type de pile	Technologie	Tension [V]	Capacité [mAh]*
Pile bouton – CR2032	Lithium	3	225
Pile 6LR61	Alcaline	9	550
Pile AAA – LR3	Rechargeable NiMH	1,2	900
Pile AAA – LR3	Alcaline	1,5	1250
Pile bâton AAA 24 LF	Lithium	1,5	1250
Pile AA – LR6	Rechargeable NiMH	1,2	2400
Pile AA – LR6	**Alcaline**	**1,5**	**2850**
Pile bâton AA 15LF	Lithium	1,5	3000
Batterie	Li-Ion	11	4400
Pile C – LR14	Alcaline	1,5	8350
Pile D – LR20	Alcaline	1,5	20500

* Les capacités citées dépendent de la marque de la pile, il s'agit donc d'une estimation.

de l'auteur à partir de (GAMMON, 2012)

E. Programme du capteur fenêtre

```
/* Référence des codes utilisés et assemblés dans le programme
 dht :    DHT tester de la librairie DHT.h créée par Ladyada
 photocell :       http://learn.adafruit.com/photocells/using-a-photocell
 ds3234 : fourni par le fabriquant sparkfun electronic
       http://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/BreakoutBoards/DS3234_Example_Code.pde
 SD :http://www.mon-club-elec.fr/pmwiki_reference_arduino/pmwiki.php?n=Main.LibrairieSdFatLib
 alarm :  rtc_ds3234_alarm_every_5_m de la librairieds3234
 Mise en veille : http://www.gammon.com.au/forum/?id=11497
                  + Nombreuses info sur comment diminuer la consommation
*/
// Déclaration des librairies
          #include <SdFat.h> // librairie pour les cartes SD (créée par bill greiman :
https://code.google.com/p/sdfatlib/downloads/list)
          #include <DHT.h>   // librairie pour le capteur de température et d'humidité (créée
par ladyada : https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library)
          #include <ds3234.h>// librairie pour l'alarme (créée par rodan :
https://github.com/rodan/ds3234)
          #include <SPI.h>   // librairie pour la liaison SPI de l'horloge et de la carte SD
(pour cette dernière sdfat suffit a priori)
          #include <avr/sleep.h>       // librairie pour la mise en veille
          #include <avr/wdt.h>         // librairie pour la arrêter le watchdog
// Déclaration des broches utilisées
          int photocellPin= 0;         // déclaration de la broche A0 comme broche où est situé
le capteur de luminosité
          #define ALARME 2   // déclaration de la broche D2 comme broche où est situé l'alarme
          #define FENETRE 3  // déclaration de la broche D3 comme broche où est situé le
capteur d'ouverture de fenêtre
          #define DHTPIN 5   // déclaration de la broche D5 comme broche où est situé le
capteur d'humidité et de température
          #define ALIM_CAPTEURS 6//déclaration de la broche D6 comme broche alim. des capteurs
          #define ALIM_SD 7  // déclaration de la broche D7 comme broche alim. de la carte sd
          const int cs_sd = 9;         // chip select D9 pour la carte sd
          const int cs_h = 10;         // chip select D10 pour l'horloge DS3234
// Déclaration du capteur de température et d'humidité
          //#define DHTTYPE DHT11      // DHT 11
          #define DHTTYPE DHT22        // DHT 22 (AM2302)
          //#define DHTTYPE DHT21      // DHT 21 (AM2301)
          DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
// Déclaration des objets utiles pour la carte SD
          String datastring; //déclaration du jeu de données où seront stockées les mesures à
mettre sur le fichier de la carte SD
          Sd2Card card;      //création d'un objet Sd2Card
          SdVolume volume;   //création d'un objet SdVolume
          SdFile root;       //création d'un objet SdFile pour le répertoire racine
          SdFile file;       //création d'un objet SdFile pour le fichier utilisé
          int testSD;        //Variable pour tester la valeur renvoyée par la fonction SD Card
// Déclaration pour l'alarme
          #define BUFF_MAX 256
          uint8_t sleep_period = 15; // période en minutes entre 2 alarmes
// Déclaration pour le réveil
          int reveil_interrupt=0;
// Déclaration pour le capteur d'ouverture de fenêtre
          // Pour ignorer les interruptions si elles se trouvent dans le délai anti rebond
          volatile unsigned long button_time = 0;
          volatile unsigned long last_button_time = 0;
          int debounce = 500; // delai antirebond en ms
// Déclaration pour mesurer la tension sur une broche
// cf site de nick gammon
          const long InternalReferenceVoltage = 1062; // Valeur à ajuster avec le voltage
interne spécifique de la carte (internal BG voltage)
//_____________Fonction pour mesurer la tension_____________________ copié de nick gammon
                  // Code courtesy of "Coding Badly" and "Retrolefty" from the Arduino forum
                  // results are Vcc * 100, So for example, 5V would be 500.
          int getBandgap ()
  {
          // REFS0 : Selects AVcc external reference
          // MUX3 MUX2 MUX1 : Selects 1.1V (VBG)
          ADMUX = _BV (REFS0) | _BV (MUX3) | _BV (MUX2) | _BV (MUX1);
          ADCSRA |= _BV( ADSC ); // start conversion
          while (ADCSRA & _BV (ADSC))
             { } // wait for conversion to complete
```

```
          int results = (((InternalReferenceVoltage * 1024) / ADC) + 5) / 10;
          return results;
  }
//_____________VOID ALIMENTATION CARTE SD_____________________
void alim_sd_on(void)
  {
          pinMode(ALIM_SD,OUTPUT);
          digitalWrite(ALIM_SD,HIGH);
          delay (10);
  }
void alim_sd_off(void)
  {
          delay (20);
          digitalWrite(ALIM_SD,LOW);
          pinMode(ALIM_SD,INPUT);
  }
//_____________VOID ALIMENTATION CAPTEURS_____________________
void alim_capteurs_on(void)
  {
          pinMode(ALIM_CAPTEURS,OUTPUT);
          digitalWrite(ALIM_CAPTEURS,HIGH);
  }
void alim_capteurs_off(void)
  {
          delay(10);
          digitalWrite(ALIM_CAPTEURS,LOW);
          pinMode(ALIM_CAPTEURS,INPUT);
  }
//_____________HORLOGE_____________________
//====================================
int RTC_init()
  {
          // start the SPI library:
            SPI.begin();
            SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
            SPI.setDataMode(SPI_MODE3); // both mode 1 & 3 should work
          //set control register
            digitalWrite(cs_h, LOW);
            SPI.transfer(0x8E);
            SPI.transfer(B00000100);
            digitalWrite(cs_h, HIGH);
            delay(10);
            digitalWrite(cs_h, LOW);
            SPI.transfer(0x8F);
            SPI.transfer(B00110001);
            digitalWrite(cs_h, HIGH);
            delay(10);
  }
//====================================
String ReadTimeDate()
  {
            String time;
            int TimeDate [7]; //seconde,minute,heure,nul,jour,mois,année
            for(int i=0; i<=6;i++){
                    if(i==3)
                       i++;
     // activation du mode 3 du spi
            SPI.begin();
            SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
            SPI.setDataMode(SPI_MODE3); // modes 1 et 3 doivent fonctionner

                    digitalWrite(cs_h, LOW);
                    SPI.transfer(i+0x00);
                    unsigned int n = SPI.transfer(0x00);
                    digitalWrite(cs_h, HIGH);
                    int a=n & B00001111;
                    if(i==2)
                    {
                              int b=(n & B00110000)>>4; // mode 24 heures
                              if(b==B00000010)
                                        b=20;
                              else if(b==B00000001)
                                        b=10;
                              TimeDate[i]=a+b;
                    }
                    else if(i==4){
                              int b=(n & B00110000)>>4;
```

```
                        TimeDate[i]=a+b*10;
                }
                else if(i==5){
                        int b=(n & B00010000)>>4;
                        TimeDate[i]=a+b*10;
                }
                else if(i==6){
                        int b=(n & B11110000)>>4;
                        TimeDate[i]=a+b*10;
                }
                else{
                        int b=(n & B01110000)>>4;
                        TimeDate[i]=a+b*10;
                }
        }
        time.concat(TimeDate[4]);
        time.concat("/") ;
        time.concat(TimeDate[5]);
        time.concat("/") ;
        time.concat(TimeDate[6]);
        time.concat(";") ;
        time.concat(TimeDate[2]);
        time.concat(":") ;
        time.concat(TimeDate[1]);
        time.concat(":") ;
        time.concat(TimeDate[0]);
  return(time);
}
/*
//============================ a décommenter lorsqu'on veut régler l'heure
int SetTimeDate(int d, int mo, int y, int h, int mi, int s){
        int TimeDate [7]={s,mi,h,0,d,mo,y};
        for(int i=0; i<=6;i++){
                if(i==3)
                        i++;
                int b= TimeDate[i]/10;
                int a= TimeDate[i]-b*10;
                if(i==2){
                        if (b==2)
                                b=B00000010;
                        else if (b==1)
                                b=B00000001;
                }
                TimeDate[i]= a+(b<<4);
                digitalWrite(cs_h, LOW);
                SPI.transfer(i+0x80);
                SPI.transfer(TimeDate[i]);
                digitalWrite(cs_h, HIGH);
  }
}*/
//_____________ALARME_____________________
//=====================================
int alarm_init()
{
        delay(100);
        DS3234_init(cs_h, DS3234_INTCN);
        DS3234_clear_a2f(cs_h);
        set_next_alarm();
}
//======================VOID mise en place de la nouvelle alarme
void set_next_alarm(void)
  {
        // start the SPI library:
          SPI.begin();
          SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
          SPI.setDataMode(SPI_MODE3); // mode 1 & 3 doivent fonctionner
        // set control register
          digitalWrite(cs_h, LOW);
          struct ts t;
          unsigned char wakeup_min;
          DS3234_get(cs_h, &t);
        // calcul de la minute quand la prochaine alarme sonnera
          wakeup_min = (t.min / sleep_period + 1) * sleep_period;
          if (wakeup_min > 59)
          {
                  wakeup_min -= 60;
          }
```

```
                    // flags define what calendar component to be checked against the current
time in order
                    // to trigger the alarm
                    // A2M2 (minutes)  (0 to enable, 1 to disable)
                    // A2M3 (hour)     (0 to enable, 1 to disable)
                    // A2M4 (day)      (0 to enable, 1 to disable)
                    // DY/DT           (dayofweek == 1/dayofmonth == 0)
            boolean flags[4] = { 0, 1, 1, 1 };
          // set Alarm2. only the minute is set since we ignore the hour and day component
            DS3234_set_a2(cs_h, wakeup_min, 0, 0, flags);
          // activate Alarm2
            DS3234_set_creg(cs_h, DS3234_INTCN | DS3234_A2IE);
}
//_____________VOID mesures et enregistrement_____________________
void mesure_capteurs()
{
          Serial.println(getBandgap());
  // Donnees date et heure
          alim_sd_on();
          datastring+=ReadTimeDate();
          datastring+=';';
          alim_sd_off();
  // Si la tension est inférieure à 390 ((valeur d'après étalonnage après plusieurs mesures),
  // On arrête de faire les mesures et d'enregistrer les données
          if (getBandgap()>=390)
          {
          // Données tension à réactiver si besoin de la connaitre
                    //datastring+=getBandgap();
                    //datastring+=';';
          // Activation alimentation des capteurs
                    alim_capteurs_on() ;
          // delai mini pour ne pas avoir de read fail pour le dht
                    delay(1000);
          // Void loop pour intégrer les valeurs de luminosité
                    int photocellReading = analogRead(photocellPin);// déclaration d'une valeur
nommée photocellReading
          // Void loop pour intégrer la valeur du capteur d'ouverture de fenêtre
                    int capteurfenetre = digitalRead(FENETRE);// lit l'état de la broche 2 et
met le résultat dans la variable
          // Void loop pour le capteur de température et d'humidité (mettre les données avec
virgule dans une string)
                    float humidity = dht.readHumidity();  // défini la variable avec décimale :
humidity qui correspond à la donnée acquise par le capteur
                    char hum[4];                  // définition d'une chaine de caractère nommée
hum de 4 caractères
                    String humdansstring;                  // détermine un nom de String
                    dtostrf(humidity,1,1,hum);   // dtostrf(valeur que l'on veut mettre dans la
string, nombre minimum de caractère à mettre avant la virgule, nombre de caractère après le
virgule, nom de la variable ou mettre les caractères)
                    humdansstring = String (hum);          // permet d'avoir une variable avec
décimale dans une string
                    float temperature = dht.readTemperature();
                    char temp[4];
                    String tempdansstring;
                    dtostrf(temperature,1,1,temp);
                    tempdansstring = String (temp);
          // Désactivation de l'alimentation des capteurs
                    alim_capteurs_off() ;
          // Enregistrer les données dans les datastring pour les copier dans la carte SD
                    // Données d'humidité et température
                              datastring+=tempdansstring;
                              datastring+=';';
                              datastring+=humdansstring;
                              datastring+=';';
                    // Données luminosité
                              datastring+=String(photocellReading);
                              datastring+=';';
                    // Données capteur d'ouverture de fenêtre
                              datastring+=String(capteurfenetre, DEC);
                              datastring+=';';
          //activation de l'alimentation de la carte SD
                    alim_sd_on();
          // Void loop pour la carte SD
                    // Initialisation de la carte SD
                    testSD= card.init(SPI_HALF_SPEED,cs_sd); // initialise la carte SD à la
vitesse et avec la broche CS voulues
                    // Ouverture du répertoire racine
```

```
                    if (!root.isOpen()) // si racine pas ouvert
                      {
                    testSD=root.openRoot(&volume); // si racine pas ouvert, on l'ouvre
                    if (testSD==1) Serial.println ("Ouverture repertoire racine OK");
                    else ("Echec ouverture repertoire racine");
                      }
                    else Serial.println("Racine deja ouvert"); // si racine déjà ouvert
                    // Ouverture de fichier
                    char nomFichier[] = "11_FEN.TXT"; // nom du fichier court (8 caractères
maxi . 3 caractères maxi) (dit format DOS 8.3)
                    file.writeError = false; // réinitialise la variable writeError
                    // Ouverture / création fichier en écriture + position fin du fichier
                    testSD=file.open(&root, nomFichier, O_CREAT| O_APPEND | O_WRITE);
                        // O_CREAT - crée le fichier si il n'existe pas
                        // O_APPEND - se positionne à la fin du fichier avant chaque écriture
                        // O_WRITE - ouverture en mode écriture de donnée
                    if (testSD==1) Serial.print ("Ouverture fichier "),
Serial.print(nomFichier),Serial.println(" OK");
                    else Serial.println ("Echec ouverture fichier");
                    // Écriture dans le fichier et copie sur le moniteur série
                    file.println(datastring);
                    Serial.println(datastring);
                    Serial.flush();     // délai pour pouvoir pour écrire sur le moniteur série
                    // Vérification erreur écriture
                    // Lit la variable writeError - attention writeError n'est pas une fonction
                    if (file.writeError==1) Serial.println ("Une erreur est survenue lors de
l'ecriture"); else Serial.println("Ecriture reussie");
                    // Fermeture de fichier
                    testSD=file.close(); // fermeture fichier
                    if (testSD==1) Serial.println("Fermeture fichier réussie !");
                    // Désactivation de l'alimentation de la carte SD
                    alim_sd_off();
                    // Remise à zéro des datastring pour attendre la nouvelle valeur
                    datastring =0;
          // Début de la fonction de mise en veille
                    Serial.println("Veille");
                    Serial.flush();
                    enterSleep();
          }
          else // ne fait rien
          {
            while(1) ;
          }
  }
//_________________________VOID MISE EN VEILLE_____________________________________________
//============================Routine d'interruption pour l'alarme________
void pin_interrupt_Alarme(void)
{
          reveil_interrupt=1;
}
//============================Routine d'interruption pour la fenêtre______
void pin_interrupt_Fenetre(void)
{
          button_time = millis();
          if (button_time - last_button_time > debounce)
           {
                    reveil_interrupt=2;
                    last_button_time = button_time;
           }
          else
           {
                    reveil_interrupt=0;
           }
}
//============================Fonction pour arreter le watchdog___________ copié sur le datas
heet atmel 328p p52
void WDT_off(void)
  {
          noInterrupts();
          wdt_reset();
          /* Clear WDRF in MCUSR */
          MCUSR &= ~(1<<WDRF);
          /* Write logical one to WDCE and WDE */
          /* Keep old prescaler setting to prevent unintentional time-out */
          WDTCSR |= (1<<WDCE) | (1<<WDE);
          /* Turn off WDT */
          WDTCSR = 0x00;
```

```
          interrupts();
  }
//============================Fonction entre en veille____________________
void enterSleep() //setup lors du déclenchement sur la broche 2 et fonction attachée
  {
          attachInterrupt(INT1, pin_interrupt_Fenetre, CHANGE);     // interruption sur la
broche 3 dès qu'il y a un changement d'état
          attachInterrupt(INT0, pin_interrupt_Alarme, LOW);         // interruption sur la
broche 2 dès qu'il y a un état low
          delay(100);         // attente de 100 millisecondes
          // Désactiver le watchdog
           WDT_off();
          // desactiver ADC
          byte adcsra_save = ADCSRA; // sauvegarde de l'état initial du ADC
          ADCSRA = 0;         // mise à 0 des bits de l' ADC
          // Désactiver divers modules
                    // Bit 7 - PRTWI: Power Reduction TWI
                    // Bit 6 - PRTIM2: Power Reduction Timer/Counter2
                    // Bit 5 - PRTIM0: Power Reduction Timer/Counter0
                    // Bit 4 - Res: Reserved bit
                    // Bit 3 - PRTIM1: Power Reduction Timer/Counter1
                    // Bit 2 - PRSPI: Power Reduction Serial Peripheral Interface
                    // Bit 1 - PRUSART0: Power Reduction USART0
                    // Bit 0 - PRADC: Power Reduction ADC
          byte prr_save = PRR;
          PRR = B11111111;
          // Désactivation du SPI en mettant les sorties en entrée
          pinMode(13,INPUT);
          pinMode(11,INPUT);
          pinMode(cs_h,INPUT);
          pinMode(cs_sd,INPUT);
          digitalWrite(cs_h,HIGH);
          // Mise en place de la veille
          set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_DOWN);  // Choix du mode de veille
          sleep_enable();                       // Mise en place de la veille
          // turn off brown-out enable in software
          MCUCR = _BV (BODS) | _BV (BODSE);     // turn on brown-out enable select
          MCUCR = _BV (BODS);           // this must be done within 4 clock cycles of above
          sleep_cpu ();                 // sleep within 3 clock cycles of above
          // Après le réveil le code continue à partir de là.
                    if(reveil_interrupt==1||reveil_interrupt==2)
                      {
                              detachInterrupt(0);// Mise hors service de l'interruption sur la
broche 2 soit l'INT0
                              detachInterrupt(1);
                      }
                    sleep_disable();    // Mise hors service du mode veille lors du réveil
          // Activation des différents modules
                    PRR = prr_save;
          // Activation du ADC
                    ADCSRA = adcsra_save;
          // Activation des broches SPI en les remettant en sorties
                    digitalWrite(cs_h,LOW);
                    pinMode(13,OUTPUT);
                    pinMode(11,OUTPUT);
                    pinMode(cs_h,OUTPUT);
                    pinMode(cs_sd,OUTPUT);
  }
// ________________________VOID SETUP_____________________________________
void setup()
  {
          // Activation de l'alim. des capteurs pour pouvoir initialiser le capteur de
température par la suite
          alim_capteurs_on() ;
          // Setup de la liaison moniteur série
          Serial.begin(9600);
          //Déclaration des broches utilisées en entrées/sorties
          pinMode(photocellPin,INPUT);
          pinMode(FENETRE,INPUT);
          pinMode(ALARME,INPUT);
          pinMode(DHTPIN,INPUT);
          pinMode(cs_h,OUTPUT);
          pinMode(cs_sd,OUTPUT);
          // pinMode(ALIM_SD,OUTPUT);
          // pinMode(ALIM_CAPTEURS,OUTPUT);
          //Activation des pull-up des broches non utilisées
          pinMode(4,INPUT_PULLUP);
```

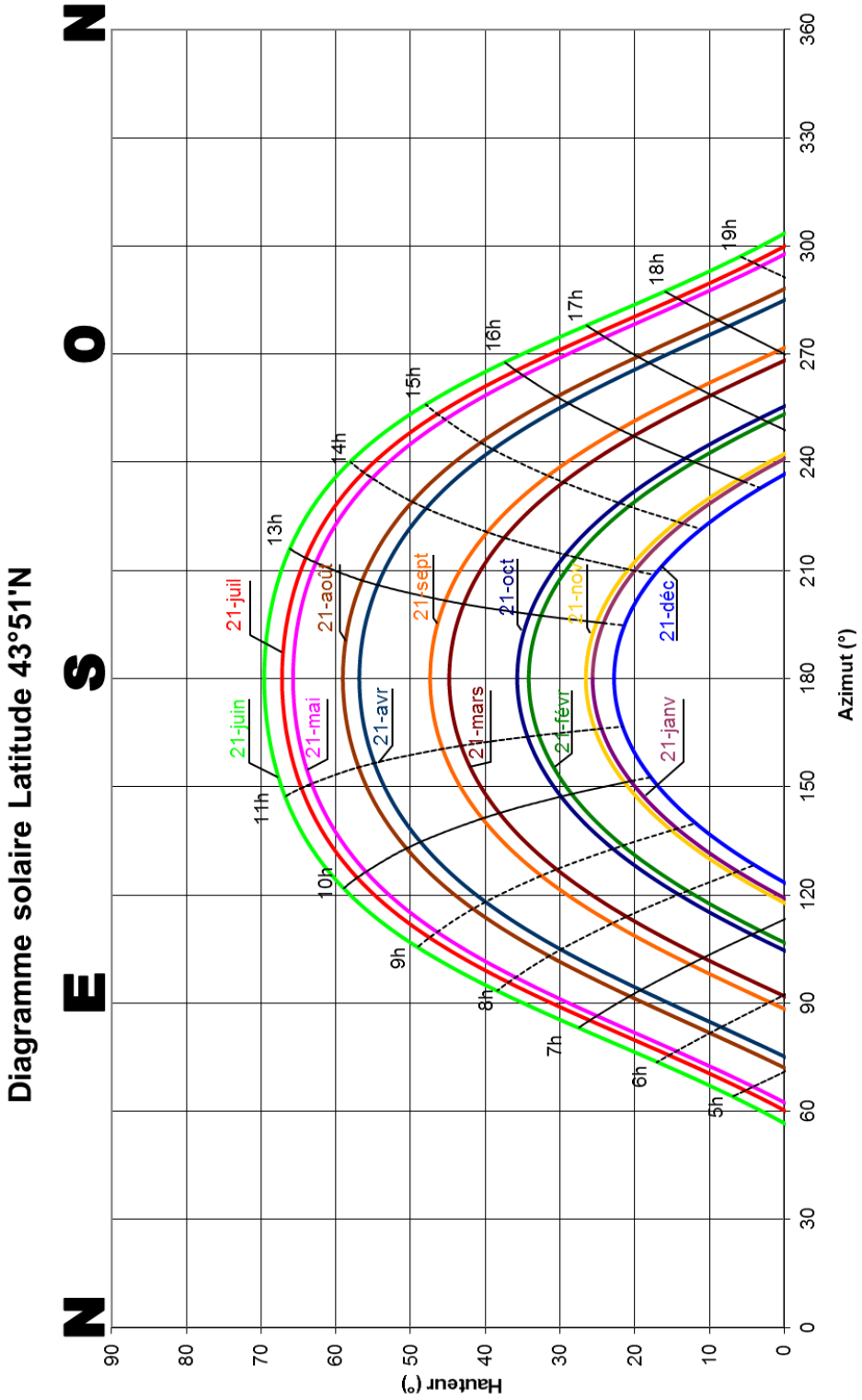
```
          pinMode(8,INPUT_PULLUP);
          pinMode(1,INPUT_PULLUP);
          pinMode(A1,INPUT_PULLUP);
          pinMode(A2,INPUT_PULLUP);
          pinMode(A3,INPUT_PULLUP);
          pinMode(A4,INPUT_PULLUP);
          pinMode(A5,INPUT_PULLUP);
          pinMode(A6,INPUT_PULLUP);
          pinMode(A7,INPUT_PULLUP);
          //Initialisation de certains modules du registre
          PRR = B11001000;
          // Setup de la carte SD
          // Activation de l'alimentation de la carte SD
          alim_sd_on();
                    // Activation du chip select
                    digitalWrite(cs_h, HIGH);    // désactive le circuit intégré de l'horloge
pour lire la sd
                    testSD= card.init(SPI_HALF_SPEED,cs_sd); // initialise la carte SD à la
vitesse et avec la broche CS voulues
                    if (testSD==1) Serial.println ("Initialisation SD card OK"); else ("Erreur
initialisation SD Card");
                    testSD=volume.init(&card);   // initialise le volume FAT de la carte SD
                    if (testSD==1) Serial.println ("Initialisation Volume FAT OK"); else
("Erreur initialisation Volume FAT");
                    testSD=root.openRoot(&volume);         // ouverture du répertoire racine
                    if (testSD==1) Serial.println ("Ouverture repertoire racine OK"); else
("Echec ouverture repertoire racine");
                    // Ouverture de fichier
                    char nomFichier[] = "11_FEN.TXT";      // nom du fichier court (8 caractères
maxi . 3 caractères maxi) (dit format DOS 8.3)
                    file.writeError = false;               // réinitialise la variable
writeError
                    // Ouverture / création fichier en écriture + position fin du fichier
                    testSD=file.open(&root, nomFichier, O_CREAT| O_APPEND | O_WRITE);
                       // O_CREAT - crée le fichier si il n'existe pas
                       // O_APPEND - se positionne à la fin du fichier avant chaque écriture
                       // O_WRITE - ouverture en mode écriture de donnée
                    if (testSD==1) Serial.println ("Ouverture fichier "),
Serial.print(nomFichier),Serial.println(" OK");
                    else Serial.println ("Echec ouverture fichier");
          // Écriture dans le fichier et copie sur le moniteur série
             file.println("Date;Heure;Temp.;Humidite Relative;Luminosite;Etat fenetre");
             Serial.println("Date;Heure;Temp.;Humidite Relative;Luminosite;Etat fenetre");
             Serial.flush();// délai pour inscrire les données sur le moniteur série
          // Vérification erreur écriture
                    // Lit la variable writeError - attention writeError n'est pas une fonction
                    if (file.writeError==1) Serial.println ("Une erreur est survenue lors de
l'ecriture"); else Serial.println("Ecriture reussie");
          // Fermeture de fichier
                    testSD=file.close(); // fermeture fichier
                    if (testSD==1) Serial.println("Fermeture fichier reussie !");
          // Setup pour l'horloge
                    RTC_init();//day(1-31), month(1-12), year(0-99), hour(0-23), minute(0-59),
second(0-59)
                    //SetTimeDate(28,8,13,17,15,0); // à remettre si l'heure n'est pas ok
          // Setup pour l'alarme
                    alarm_init();
          // Désactivation de l'alimentation de la carte sd
                    alim_sd_off();
          // Setup pour le capteur de température et d'humidité
                    //delay(2000); si alim capteur au début non nécessaire!
                    dht.begin();
          // Désactivation de l'alimentation des capteurs
                    alim_capteurs_off() ;
}
// ____________________VOID LOOP_____________________________________
void loop()
 {
          switch(reveil_interrupt)
          {
                    case 2 :// Void loop pour la fenetre
                        Serial.println(" ouverture/fermeture fenêtre");
                        Serial.flush();
                        reveil_interrupt=0;
                        attachInterrupt(1, pin_interrupt_Fenetre, CHANGE);//Re Attach interrupt
                        Serial.println("Entre en loop");
                    break;
```

```
                    case 1 :// Void loop pour l'alarme
                        Serial.println(" alarme");
                        Serial.flush();
                        reveil_interrupt=0;
                        alim_sd_on();
                        set_next_alarm();        // set next alarm
                        alim_sd_off();
                        DS3234_clear_a2f(cs_h);// clear a2 alarm flag and let INT go into hi-z
                        attachInterrupt(0,pin_interrupt_Alarme, LOW); //Attach interrupt again
                        Serial.println("Entre en loop");
                    break;
            }
            // Void loop pour mesurer
                    mesure_capteurs();
}
```

F. Diagramme des appartements sélectionnés



G. Diagramme solaire



Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen : d'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales

Résumé : La performance énergétique des bâtiments peut être estimée grâce à la réalisation de simulations de thermique dynamique qui prennent en compte différentes hypothèses conventionnelles telles que celles définies dans la réglementation thermique 2012 (météo, occupation, consignes de température, usages de la fenêtre et du volet par les occupants, etc.). Les retours d'expériences dans les bâtiments énergétiquement performants mettent en évidence des écarts importants de consommations énergétiques entre les prévisions et les mesures in situ ainsi que des surchauffes estivales. D'après la communauté scientifique, même s'il existe de multiples facteurs pouvant expliquer ces écarts, l'occupant semble être l'élément le plus impactant. En effet, son action sur la fenêtre et le volet modifie le renouvellement d'air et la gestion des apports solaires. L'usage mais aussi la typologie de la fenêtre et du volet affectent donc les consommations énergétiques et le confort. L'objectif de notre étude est l'analyse de l'évolution thermique d'appartements occupés afin d'établir un modèle comportemental de l'occupant réel permettant de quantifier l'impact des modifications architecturales sur le confort thermique et les performances énergétiques des bâtiments.

L'objet d'étude est un ensemble de deux résidences situées sur la commune de Vauvert (Gard, France) construites en 1969. De caractéristiques constructives identiques et suite à des rénovations similaires (V.M.C., chaudières, fenêtres), l'une d'entre elles a été récemment isolée thermiquement par l'extérieur. Une analyse sur une année des conditions thermiques réelles, du comportement individuel de l'occupant et des consommations d'énergie est menée sur la base d'enquêtes et par une instrumentation in situ dans les séjours de 13 appartements occupés. Elle nous permet de définir un modèle comportemental de l'occupant soit 32 combinaisons d'usage de la fenêtre et du volet qui peuvent être regroupées selon trois profils d'occupant (l'occupant « expert », l'occupant « actif » et l'occupant « contre-productif »). La modélisation fine des paramètres nécessaires pour les simulations de thermique dynamique réalisées avec Pléiades+COMFIE, aide à la compréhension de l'impact des stratégies architecturales sur le confort et les consommations énergétiques des bâtiments en milieu méditerranéen.

L'analyse thermique des deux résidences (isolée et non-isolée) montre, en hiver, des niveaux similaires de consommation pour un confort réduit dans la résidence non-isolée. Cependant, en été, lors de pics de température, des surchauffes apparaissent dans la résidence isolée. Le comportement de l'individu a ainsi un rôle essentiel dans la limitation de l'inconfort d'été. Les analyses des mesures in situ montrent que des stratégies permettant le rafraîchissement des appartements ne sont pas toujours mises en place par les occupants. Des solutions architecturales atténuant le comportement « contre-productif » de l'individu sont finalement évaluées.

Mots clés : confort thermique, comportement individuel, simulation de thermique dynamique, stratégies architecturales, consommations énergétiques, habitat social

Thermal comfort and energy in social housing in Mediterranean area: from a behavioral model of occupants to architectural strategies

Abstract: The current design of energy-efficient buildings used to be performed by dynamic thermal simulations using conventional hypotheses like those of the 2012 French thermal regulations (weather reports, occupancy, temperature set, operations of windows and shutters by occupants, etc...). However, feedback highlights a great difference in energy consumption between forecasts on the one hand and in situ measurements in winter as well as overheating in summer on the other hand. According to the scientific community, even if many factors can account for this gap, the inhabitants seem to play a major role in it as well. Indeed, by acting on their windows and shutters, they modify the renewal rate of fresh air and the management of solar contributions. As the matter of fact, the use and the type of windows and shutters affect the energy consumptions and the comfort. The aim of this study is to analyse the thermal evolution of occupied apartments in order to establish a behavioral model of the occupants. This will allow us to quantify the impact of architectural modifications on the thermal comfort and the energy performances of buildings.

Two residential buildings are investigated in Vauvert (a city in southern of France). Both of them were built in 1969 using the same constructive techniques and have lately been renovated in a similar way (CMV, boilers, windows). The only difference is that on the facade of one of them an external thermal insulation has recently been installed. The analysis of the real thermal conditions, of the actual human behavior and of the amount of energy consumed is built on surveys and on an extensive year-round in situ instrumentation in the living rooms of 13 apartments. It allows us to define a behavioral model of occupants based on 32 different combinations in the operations of windows and shutters. We can divide them into three occupants' profiles (the "expert" occupant, the "active" occupant and the "counterproductive" occupant). Digital Pléiades+COMFIE simulations are made in order to validate this model. The refined modeling of the dynamic thermal simulation parameters helps to understand the impact on the thermal comfort and the energy consumption of different architectural strategies in the Mediterranean area.

In winter the thermal analysis of the two residential buildings (insulated and non-insulated) shows similar levels of consumption, but a lower level of thermal comfort in the non-insulated case. However during temperature peaks in summer, overheating appears in the insulated dwellings, but human behavior is the key to limit occupants' discomfort. The analysis of in situ measurements shows that strategies to cool down the apartments are not always implemented by occupants. Architectural solutions mitigating "counterproductive" occupants' behavior are finally examined.

Key words: thermal comfort, human behavior, dynamic thermal simulation, architectural strategies, energy consumption, social housing