

Évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de
la température de consigne des thermostats en mode
chauffage à l'aide de données mesurées in situ
et de simulations

par

Paméla NOËL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 28 MAI 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Paméla Noël, 2018



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Danielle Monfet, directrice de mémoire
Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, président du jury
Département de Génie de la Construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Rousse, membre du jury
Département de Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 30 AVRIL 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier ma directrice de recherche, Danielle Monfet, pour ses conseils et commentaires tout au long de cette recherche. Je voudrais aussi remercier le LTE de m'avoir permis d'utiliser les données mesurées des MEEB.

Je tiens à remercier mes amis et ma famille, qui m'ont soutenu et qui m'ont changé les idées lorsque j'en avais besoin. Je remercie mon oncle Roch pour son aide linguistique. Je remercie particulièrement mes parents, Michel et Marie-Jeanne, mon amoureux et Lyla pour leurs soutiens et encouragements.

ÉVALUATION DU CONFORT THERMIQUE À LA SUITE D'ABAISSEMENTS DE LA TEMPÉRATURE DE CONSIGNE DES THERMOSTATS EN MODE CHAUFFAGE À L'AIDE DE DONNÉES MESURÉES IN SITU ET DE SIMULATIONS

Paméla NOËL

RÉSUMÉ

Les clients résidentiels vivant dans un climat froid ont souvent recours aux abaissements de la température de consigne des thermostats pour diminuer leur consommation d'énergie pendant la saison de chauffage. La plupart des études réalisées sur ces abaissements ont comme but premier de diminuer la consommation d'énergie. Cependant, le confort thermique des occupants, lors de la reprise de la température de consigne, est peu abordé. De plus, les études portant sur l'évaluation du confort thermique sont principalement réalisées en climat chaud.

Dans la présente étude, le confort thermique est évalué à la suite d'abaissements de la température selon la norme ASHRAE 55-2013 et le modèle de Fanger (1972) à l'aide de données mesurées in situ et de simulations. Les données in situ sont recueillies dans les maisons d'expérimentation en énergétique du bâtiment (MEEB) du Laboratoire des Technologies de l'Énergie (LTE) d'Hydro-Québec. Ensuite, les simulations sont effectuées avec le programme EnergyPlus à partir du modèle des MEEB.

Les résultats de la présente étude démontrent que le confort thermique des occupants n'est pas atteint à la suite des reprises de la température de consigne. Le temps de récupération a varié d'un étage à l'autre et selon l'orientation cardinale. Il faut prévoir, afin que le confort thermique ne soit pas affecté, au moins 1 h avant que les conditions intérieures deviennent stables. La comparaison des résultats calculés avec ceux simulés a démontré quelques différences dont des écarts moyens d'indice PMV (vote moyen prévisible) de 0,5 et moins.

La durée et l'amplitude choisies des abaissements de la température pourraient être modifiées pour répondre aux besoins thermiques des occupants.

Mots-clés : Abaissement de la température, confort thermique, temps de récupération, chauffage résidentiel, données mesurées in situ

EVALUATION OF THERMAL COMFORT FOLLOWING TEMPERATURE SETPOINT SETBACKS OF THERMOSTATS IN HEATING MODE USING IN SITU MEASURED DATA AND SIMULATIONS

Paméla NOËL

ABSTRACT

For residential customers living in cold climates, energy savings during the heating season are often achieved through thermostat setbacks. The first goal of most studies on thermostat setbacks is to quantify these savings. However, occupants' thermal comfort following the setbacks, during the set point temperature recovery, is less discussed. Furthermore, the studies on the evaluation of thermal comfort are mainly realized in hot climates.

In this study, thermal comfort is evaluated after a thermostat setback according to the ASHRAE 55-2013 standard and Fanger (1972) model using in-situ measurements and simulations. The in-situ measurements are collected at the maisons d'expérimentation en énergétique du bâtiment (MEEB) at the Laboratoire des Technologies de l'Énergie (LTE) of Hydro-Québec. Then the simulations are executed with the EnergyPlus program for the MEEB model.

The results of this study demonstrate that the thermal comfort is not reached after thermostat setback. The recovery time varied from one floor to another and from the cardinal orientation. At least 1h is required for the indoor conditions to reach steady state and not affect thermal comfort. The comparison between the calculated and simulated results demonstrated some variations of 0.5 or less in the average PMV (predicted mean vote).

The duration and amplitude of the thermostats setback could be modified to meet the thermal needs of occupants.

Keywords: Thermostat setback, thermal comfort, recovery time, residential heating, in-situ measurements

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Confort thermique	4
1.1.1 Critères d'évaluation du confort thermique	4
1.1.1.1 Facteurs en lien avec l'occupant	5
1.1.1.2 Facteurs en lien avec les conditions thermiques intérieures	7
1.1.1.3 Autres critères d'évaluation du confort.....	9
1.1.2 Confort thermique adaptatif.....	11
1.1.3 Modèle de Fanger	11
1.2 Évaluation du confort thermique	13
1.2.1 Climat chaud	13
1.2.2 Climat froid	16
1.3 Stratégies d'abaissement de la température	18
1.3.1 Consommation énergétique à la suite d'abaissements de la température	19
1.3.2 Gestion de la pointe de la demande d'énergie	23
1.3.3 Impact des abaissements de la température sur le bâtiment	25
1.3.3.1 Température de surface.....	25
1.3.3.2 Condensation.....	28
1.3.3.3 Stratification thermique de l'air	29
1.4 Synthèse	30
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DES MAISONS D'EXPÉRIMENTATION EN ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT (MEEB).....	33
2.1 Présentation des bancs d'essais.....	33
2.2 Données colligées	36
2.2.1 Données des maisons	36
2.2.2 Données des occupants	38
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	43
3.1 Préparation des données.....	43
3.2 Période d'analyse des résultats	43
3.3 Évaluation du confort thermique in situ.....	46
3.3.1 Critères de confort thermique calculés	46
3.3.2 Modèle de Fanger	49
3.4 Simulation énergétique et comparaison des résultats	50
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSES	53
4.1 Environnement extérieur.....	54
4.2 Évaluation du confort thermique avec les critères	60
4.2.1 Température opératoire	61

4.2.2	Variation de la température opératoire avec le temps.....	65
4.2.3	Différence verticale de la température de l'air	67
4.2.4	Température de surface du plancher	69
4.2.5	Température radiante asymétrique.....	74
4.2.5.1	Plafond plus chaud que le plancher	74
4.2.5.2	Mur plus froid que l'air	76
4.2.6	Courant d'air	78
4.3	Évaluation du confort thermique avec le modèle de Fanger.....	79
4.3.1	PMV-PPD	80
4.3.2	Temps de récupération.....	85
4.3.3	Consommation de chauffage.....	88
4.3.4	Condition intérieure	91
CHAPITRE 5	DISCUSSION	97
5.1	Évaluation du confort thermique avec des données mesurées <i>in situ</i>	98
5.1.1	Comparaison entre les fenêtres couvertes et dégagées	98
5.1.2	Effet de la stratification thermique	99
5.1.3	Température de surface.....	100
5.1.4	Abaissements répétitifs	102
5.1.5	Taux d'humidité	103
5.1.6	Vote des occupants par opposition au PMV	104
5.2	Évaluation du confort thermique avec des simulations	106
5.3	Recommandations.....	107
CONCLUSION	109	
ANNEXE I	ÉTUDE DE CAS : DESCRIPTION DES POINTS DE MESURES	111
ANNEXE II	MÉTHODOLOGIE : POINTS DE MESURES UTILISÉS PAR CRITÈRES DE CONFORT	115
ANNEXE III	RÉSULTATS : CRITÈRES DE CONFORT	117
ANNEXE IV	RÉSULTATS : MODÈLE DE FANGER	127
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	133	

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Taux métabolique par activité.....	5
Tableau 1.2	Variations maximums de la température opératoire avec le temps	16
Tableau 1.3	Scénario journalier d'abaissements de la température pour la maison à Hamilton	20
Tableau 1.4	Économies d'énergie des abaissements de la température de consigne de la maison test du CCTR	21
Tableau 1.5	Économies d'énergie des abaissements de la température de consigne de la maison test du LTE	22
Tableau 1.6	Température de surface minimum ($T_{surf, min}$) et l'orientation du mur extérieur des maisons du CCTR	26
Tableau 2.1	Abréviations des noms des pièces.....	34
Tableau 2.2	Composition des assemblages extérieurs avec les thermocouples	39
Tableau 2.3	Composition des assemblages intérieurs avec les thermocouples	41
Tableau 3.1	Période d'abaissement et d'analyse des résultats.....	44
Tableau 3.2	Résumé des cinq essais avec la période d'analyse.....	45
Tableau 3.3	Résumé des conditions de confort de l'occupant.....	47
Tableau 3.4	Résumé des critères du confort thermique.....	47
Tableau 3.5	Information de base sur le calcul du PMV.....	50
Tableau 4.1	Heure du lever et du coucher du soleil.....	54
Tableau 4.2	Température opératoire minimum et maximum	63
Tableau 4.3	Temps de récupération ($To = 20 ^\circ C$) des pièces par type d'abaissement.....	64
Tableau 4.4	Dépassemement des limites de la variation de la température opératoire avec le temps par pièces et par type d'abaissement.....	66

Tableau 4.5	Différence verticale maximum de la température de l'air (ΔTV) avec les fenêtres dégagées (essai 5.2)	69
Tableau 4.6	Température de surface de plancher (T_p) minimum et maximum	72
Tableau 4.7	Temps de récupération ($T_p = 19$ °C) par pièces par type d'abaissements	73
Tableau 4.8	Résumé du temps de récupération pour atteindre un $PMV \leq -1$ à la suite d'abaissements des essais expérimentaux	85
Tableau 4.9	Résumé du temps de récupération pour atteindre un $PMV \leq -1$ à la suite d'abaissements des essais simulés.....	86
Tableau 4.10	Résumé des écarts de temps des PMV minimums et maximums absous entre ceux calculés et simulés à la suite d'abaissements	88
Tableau 4.11	Pourcentage d'écart de la consommation de chauffage entre les essais 5.1 et 5.2 mesurés	89
Tableau 4.12	Pourcentage d'écart de la consommation de chauffage entre les essais 5.1 et 5.2 simulés	89
Tableau 5.1	Résumé de l'évaluation du confort thermique	105

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Répartition de la consommation d'électricité résidentielle par usage	3
Figure 1.2	Échanges thermiques du corps humain avec l'environnement.....	5
Figure 1.3	Isolation typique des vêtements selon la température extérieure à 6 h.....	6
Figure 1.4	Zone de confort en fonction de la température opératoire et de l'humidité.....	9
Figure 1.5	Variation de la température opératoire avec le temps.....	10
Figure 1.6	PPD en fonction du PMV	12
Figure 1.7	Votes des occupants pour les trois régions	18
Figure 1.8	Votes des occupants en comparaison avec PMV de l'Amérique du Nord	18
Figure 1.9	Effet de la température extérieure des jours précédents sur le mur de fondation	27
Figure 2.1	MEEB	33
Figure 2.2	Vue en plan avec les points de mesures — a) sous-sol, b) RDC et c) étage	35
Figure 2.3	Perche verticale.....	37
Figure 2.4	Occupants des MEEB	38
Figure 2.5	Mur extérieur avec les thermocouples	39
Figure 2.6	Plancher du sous-sol	39
Figure 2.7	Mur de fondation et du plancher du sous-sol (dalle de béton) avec les thermocouples	40
Figure 2.8	Plancher du RDC avec les thermocouples	41
Figure 2.9	Plancher de l'étage avec les thermocouples	41
Figure 2.10	Plafond de l'étage avec les thermocouples.....	41

Figure 3.1	Évaluation du confort en fonction des données	43
Figure 3.2	Modifications apportées au modèle des MEEB d'EnergyPlus pour le calcul du PMV-PPD avec des scénarios d'abaissements de la température aux thermostats	51
Figure 3.3	Orientation géographique du modèle original	52
Figure 3.4	Axe du nord de 130 ° par rapport au bâtiment	52
Figure 4.1	Facteurs sur le maintien du confort thermique	53
Figure 4.2	Positions du soleil le 8 février — a) 8 h b) 12 h et c) 16 h	55
Figure 4.3	Positions du soleil le 3 mars — a) 8 h b) 12 h et c) 16 h	55
Figure 4.4	Conditions extérieures et la température de consigne des thermostats lors des cinq essais	56
Figure 4.5	Comparaison de la consommation de chauffage (Wh) des pièces avec la température extérieure (°C) et le rayonnement solaire horizontal et vertical (Wh/m ²) (maison référence – essai 2).....	58
Figure 4.6	Comparaison de la consommation de chauffage au salon (maison référence – essai 2).....	58
Figure 4.7	Comparaison de la consommation de chauffage à la salle de bain (maison référence – essai 2).....	59
Figure 4.8	Température du côté extérieur du mur de brique et de vinyle (maison test – essai 3 : abaissements de jour)	59
Figure 4.9	Température de surface intérieure du mur de brique et de vinyle (maison test – essai 3 : abaissements de jour).....	59
Figure 4.10	Résumé de la température opératoire à la suite des différents types d'abaissements	62
Figure 4.11	Température opératoire au sous-sol 1 (essai 5.1 : abaissements combinés).....	63
Figure 4.12	Variations de temps étudiées en fonction du premier et deuxième pas de temps à la suite d'un abaissement de jour	65
Figure 4.13	Résumé de la différence verticale de la température de l'air à la suite des différents types d'abaissements	68

Figure 4.14	Résumé de la température de surface de plancher à la suite des différents types d'abaissements	71
Figure 4.15	Résumé de la différence de température entre le plafond et le plancher à la suite des différents types d'abaissements.....	75
Figure 4.16	Résumé de la différence de température entre le mur et l'air à la suite des différents types d'abaissements	77
Figure 4.17	Résumé du courant d'air à la suite des différents types d'abaissements ...	79
Figure 4.18	Résumé des PMV calculés par pièce à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit	81
Figure 4.19	Résumé des PMV simulés par pièce à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit	81
Figure 4.20	Schéma des PMV calculés et simulés pour une sensation froide et chaude	83
Figure 4.21	Écart des PMV moyens calculés et simulés par pièce à la suite d'abaissements	83
Figure 4.22	Comparaison des PMV calculés et simulés du salon avec le rayonnement solaire de l'essai 5.2	85
Figure 4.23	Pourcentage d'écart de la consommation de chauffage mesurée et simulée par pièce.....	91
Figure 4.24	PMV simulés en fonction de la température opératoire des pièces sous-sol 1, salon et chambre 3 à la suite d'abaissements combinés aux essais 5.1 et 5.2	93
Figure 4.25	Écart de la température de surface intérieure mesurée et simulée par pièce (2016-02-28 00:00 au 03-04 00:00)	95
Figure 4.26	Écart de la température moyenne de l'air mesurée et simulée par pièce (2016-02-28 00:00 au 03-04 00:00).....	96
Figure 5.1	Distribution de chaleur d'une plinthe électrique.....	101

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CCTR	Centre canadien des technologies résidentielles
CU	Cuisine
CVCA	Chauffage ventilation et conditionnement de l'air
C1	Chambre 1
C2	Chambre 2
C3	Chambre 3
DEL	Diode électroluminescente
HR	Humidité relative
ISO	Organisation internationale de normalisation
LTE	Laboratoire des Technologies de l'Énergie
MEEB	Maisons d'expérimentation en énergétique du bâtiment
PMV	Vote moyen prévisible
PPD	Pourcentage prévisible d'insatisfaits
RDC	Rez-de-chaussée
S	Écart type
SA	Salon
SB	Salle de bain
SM	Salle à manger
SS	Sous-sol
SS1	Sous-sol 1
SS2	Sous-sol 2

T_a	Température moyenne de l'air
T_g	Température de la sphère noire (radiante)
T_{int}	Température intérieure
T_o	Température opératoire
T_p	Température de surface du plancher
T_r	Température de rosée
\bar{T}_r	Température moyenne radiante
$T_{surf,min}$	Température de surface minimum
TSV	Thermal sensation vote
ΔT	Différence de température
ΔT_v	Différence verticale de la température de l'air
V_a	Vitesse de l'air moyenne
VAV	Débit d'air variable
VBA	Visual Basic for Applications
v_r	Vitesse relative de l'air
VRC	Ventilateur récupérateur de chaleur

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

D	diamètre d'une sphère
mm	millimètre
m	mètre
m^2	mètre carré (aire)

UNITÉS DE TEMPS

h	heure
min	minute

UNITÉS CALORIFIQUES

K	kelvin
$^{\circ}\text{C}$	degré Celsius

UNITÉS D'ÉNERGIE

Wh	wattheure
----	-----------

UNITÉS MÉCANIQUES

m/s	mètre par seconde (vitesse)
$^{\circ}$	degré (angle plan)

UNITÉS DE PUISSANCE

W	watt
kW	kilowatt

UNITÉS DE DENSITÉ SURFACIQUE DE PUISSANCE

W/m^2	watt par mètre carré
met	taux métabolique

UNITÉS DE RÉSISTANCE THERMIQUE DE SURFACE

$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$	mètre carré-kelvin par watt
clo	isolation des vêtements

INTRODUCTION

En 2013, au Québec, le secteur résidentiel comptait pour 19 % de la consommation d'énergie. Une proportion de 63,7 % de ce pourcentage était consacrée au chauffage résidentiel (Gouvernement du Québec, 2014). Cette part importante du chauffage résidentiel suscite un intérêt grandissant pour l'élaboration de stratégies d'économies d'énergie pour les clients résidentiels pendant la saison de chauffage dans un climat froid. L'un des moyens le plus courant et accessible consiste en des abaissements de la température de consigne aux thermostats. Ces abaissements sont programmés par les occupants pour s'activer soit pendant le jour quand ils sont absents, soit la nuit ou parfois les deux le même jour. La plupart des études réalisées sur les abaissements de la température de consigne traitent principalement des aspects liés à la diminution de la consommation d'énergie (Poehlman, Mesher et Meadowcroft, 1988); (Manning, Swinton et Ruest, 2005) et (Jacquet, Le Bel et Monfet, 2017). Les effets sur le maintien du confort thermique lors de la reprise, c'est-à-dire lorsque le thermostat tente d'atteindre sa température de consigne à la suite de ces abaissements, sont peu abordés et analysés.

Lors de scénario d'abaissements de la température, le confort thermique est principalement affecté par la durée et par l'amplitude de cet abaissement. Ces deux facteurs influent sur le temps de récupération. Celui-ci peut être plus long pour certains étages puisqu'il dépend du mouvement de la chaleur, qui se déplace du bas vers le haut. Étant donné que l'enveloppe du bâtiment est affectée par la diminution de la température des pièces; la température de surface intérieure prend plus de temps à augmenter comparativement à la température de l'air de la pièce. De plus, des abaissements répétitifs de la température de consigne risquent de perturber l'inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment et, par le fait même, de créer un inconfort thermique radiant ainsi que d'augmenter la consommation de chauffage.

Afin de permettre de mieux comprendre ces interactions, la présente étude a pour objectif d'évaluer et d'analyser le confort thermique à la suite d'abaissements de la température aux thermostats à l'aide de données mesurées *in situ*. Les objectifs spécifiques sont :

1. Évaluer le confort thermique à l'aide de données mesurées in situ selon deux approches :
(a) avec les critères de l'ASHRAE 55-2013 et (b) avec le modèle de Fanger (1972);
2. Comparer les résultats calculés avec ceux obtenus par des simulations en mode dynamique réalisées avec EnergyPlus afin de déterminer le potentiel de ce programme à assister le processus de conception de scénarios d'abaissements de la température.

Le présent mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre introduit les notions de confort thermique, les méthodes d'évaluation du confort et procède à une revue des études réalisées au Canada sur les abaissements de la température. Le deuxième chapitre décrit les bancs d'essais (les MEEB) qui ont servi pour l'expérimentation et la collecte de données mesurées in situ. Le troisième chapitre expose la méthodologie utilisée pour l'évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de la température à l'aide de données mesurées in situ et le modèle utilisé pour la simulation du bâtiment avec le programme EnergyPlus. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus du point de vue du confort thermique dans les MEEB à la suite d'abaissements de la température en comparaison avec les critères de l'ASHRAE 55-2013 et les résultats obtenus avec le modèle de Fanger (1972) en comparaison avec ceux de la simulation. Ces comparaisons vont permettre de vérifier s'il y a un inconfort thermique à la suite d'abaissements de la température. Le dernier chapitre discute les principales sources d'inconfort qui sont créées à la suite d'abaissements de la température en mode chauffage afin qu'elles soient prises en compte lors de l'élaboration des scénarios d'abaissements de la température.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Au Québec, dans le secteur résidentiel, 54 % de la consommation d'électricité est attribuée au chauffage et à la climatisation (Figure 1.1). Ce pourcentage élevé incite les usagers à tenter de minimiser leur consommation d'électricité. Une approche couramment utilisée consiste à diminuer la température de consigne des thermostats en mode chauffage durant le jour, lorsque les occupants ne sont pas présents, et durant la nuit. À la suite de ces abaissements, le confort thermique peut être diminué. Cependant, peu d'études ont investigué le confort thermique lorsque les conditions environnementales intérieures ne sont pas en équilibre thermique. Dans le présent chapitre, les conditions de confort normatif sont énoncées à la section 1.1, et les stratégies d'évaluation du confort thermique à la section 1.2. Ensuite, la section 1.3 présente les différentes stratégies d'abaissements de la température afin de montrer la manière dont elles sont instaurées et leurs effets sur la consommation d'énergie et sur le bâtiment.

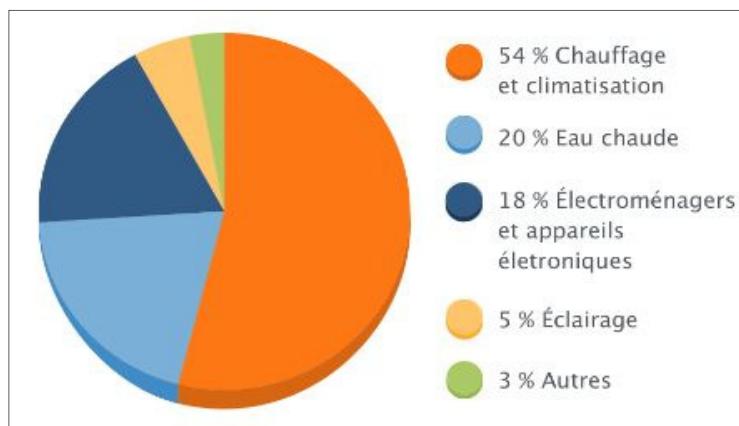


Figure 1.1 : Répartition de la consommation d'électricité résidentielle par usage
Tirée du site d'Hydro-Québec ([s.d.])

1.1 Confort thermique

De nombreux facteurs entrent en jeu dans le confort thermique. Peu importe l'endroit dans le monde, la température pour qu'une personne se sente à l'aise du point de vue thermique diffère très peu si les conditions d'habillement, d'activité, d'humidité et du mouvement d'air sont adaptées au climat (ASHRAE Fundamentals, 2013). Sont présentés, dans la présente section, les différents critères d'évaluation du confort thermique et le modèle d'évaluation du confort thermique de l'ASHRAE 55-2013. Ensuite, sont expliqués le concept de confort thermique adaptatif et le modèle d'évaluation de Fanger (1972).

1.1.1 Critères d'évaluation du confort thermique

La norme AINSI/ASHRAE Standard 55-2013 (*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*) évalue le confort thermique selon six facteurs. Les deux premiers facteurs sont en lien avec l'occupant et les quatre autres avec les conditions thermiques intérieures. Ces facteurs doivent être en état d'équilibre, mais ils peuvent varier dans le temps avec certaines restrictions. Les six facteurs qui influent sur le confort thermique sont : le taux métabolique, l'isolation des vêtements, la température de l'air, la température radiante, la vitesse de l'air et l'humidité. L'évaluation du confort thermique avec cette norme presuppose que tous les critères doivent être appliqués ensemble à cause de la complexité de l'interaction de ces facteurs dans un environnement intérieur.

Outre ces facteurs, il y a les échanges thermiques du corps humain avec l'environnement comme l'illustre à la Figure 1.2. Ces échanges sont : l'évaporation et la sudation qui comptent pour 24 %, la convection pour 35 %, le rayonnement pour 35 %, l'ingestion de nourriture pour 6 % et la conduction pour 1 %. Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation). De plus, les échanges par rayonnement avec les parois ne sont pas à négliger.



Figure 1.2 : Échanges thermiques du corps humain avec l'environnement

Tiré du site Guide Bâtiment Durable (2013)

1.1.1.1 Facteurs en lien avec l'occupant

Le taux métabolique varie selon l'activité de l'occupant. L'unité est le met (*Metabolic Equivalent of Task*), et il équivaut à 58,2 W/m². Le met représente l'énergie dissipée par unité de surface de la peau d'une personne. L'évaluation du confort thermique ne peut être réalisée sur un occupant qui dort. Le Tableau 1.1 fournit les taux métaboliques pour différentes activités.

Tableau 1.1 : Taux métabolique par activité
Tiré de l'ASHRAE 55 (2013, p. 5)

Activité	Taux métabolique (met)
Assis (silencieux)	1
Lire (assis)	1
Écrire	1
Dactylographier	1,1
Debout (détendu)	1,2
Marcher	1,7

L'isolation des vêtements correspond à la résistance au transfert de chaleur sensible d'un vêtement. L'unité est le clo (*cloths*), et il équivaut à $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$. En général, en hiver, l'isolation des vêtements portés à l'intérieure est de 1 clo et, en été, de 0,5 clo. Par exemple, une isolation des vêtements de 1 clo correspond au port combiné :

- 1) de sous-vêtements (0,04 clo),
- 2) de bas au mollet (0,03 clo),
- 3) de pantoufles (0,03 clo),
- 4) d'un pantalon épais (0,24 clo),
- 5) d'un chandail à manches courtes (0,08 clo),
- 6) d'une chemise à manches longues (0,25 clo),
- 7) et d'un chandail à manches longues (0,34 clo).

Plus précisément, la Figure 1.3 illustre la variation de l'isolation typique des vêtements des personnes selon la température extérieure prise à 6 h.

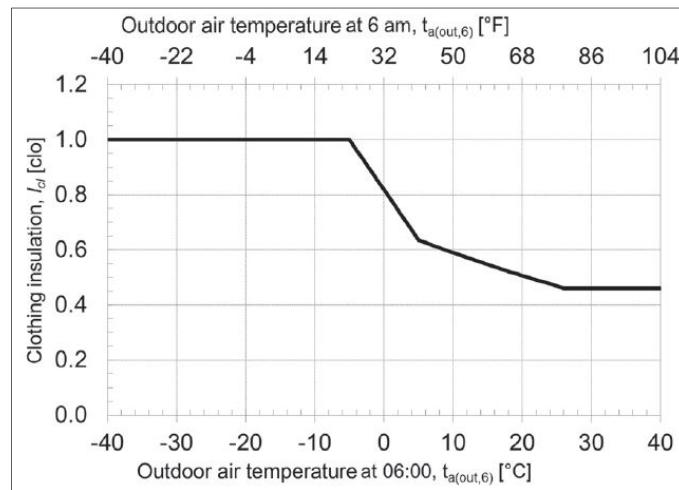


Figure 1.3 : Isolation typique des vêtements selon la température extérieure à 6 h
Tirée de l'ASHRAE 55 (2013, p. 8)

1.1.1.2 Facteurs en lien avec les conditions thermiques intérieures

La température de l'air et la température radiante peut être évaluée selon la température opératoire (T_o). Celle-ci correspond au maintien d'une température uniforme lors de l'échange de chaleur entre l'humain et son environnement (la chaleur qu'un humain perd dans son environnement par radiation et convection égale la chaleur qu'il en absorbe), comme le représente l'équation (1.1) (ASHRAE 55, 2013, p. 16).

$$T_o = A T_a + (1 - A) \bar{T}_r \quad (1.1)$$

Où,

$A = 0,5$ si la vitesse relative de l'air (v_r) est plus petite que 0,2 m/s

T_a = Température moyenne de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

\bar{T}_r = Température moyenne radiante ($^{\circ}\text{C}$) définie par l'équation (1.2)

La température moyenne radiante (\bar{T}_r) est définie comme étant le maintien d'une température uniforme lors de l'échange de chaleur entre l'humain et l'enceinte (la chaleur perdue par radiation égale la chaleur absorbée). Elle est calculée à partir des températures de surface des murs, du plancher et du plafond de la pièce en fonction du facteur d'angle selon la position de l'humain. Aussi, elle peut être calculée à l'aide d'une sphère noire comme le représente l'équation (1.2) (ASHRAE Fundamentals, 2013, chap. 36, p. 31). Cependant, dans ce cas, elle surestime l'influence du rayonnement de petite longueur d'onde tel que l'ensoleillement (ASHRAE Fundamentals, 2013). Dans une pièce, les températures des surfaces sont généralement différentes les unes des autres. La chaleur par radiation de l'enceinte est absorbée par l'humain lorsque la \bar{T}_r de l'enceinte est plus élevée que la température radiante de l'humain et elle est cédée par l'humain dans le cas contraire. La \bar{T}_r a, sur le confort thermique, un effet supérieur d'environ 40 % que celui de la température de l'air (Ching, Adams et Saint-Pierre (adapt.), 2001 c2003).

$$\bar{T}_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1,10 \times 10^8 V_a^{0,6}}{\varepsilon D^{0,4}} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273 \quad (1.2)$$

Où,

T_g = Température de la sphère noire ($^{\circ}\text{C}$)

V_a = Vitesse de l'air moyenne (m/s)

ε = Émissivité (0,95 pour une sphère noire)

D = Diamètre de la sphère noire (m)

La vitesse de l'air, lorsqu'elle est élevée, crée des courants d'air et par le fait même augmente la perte de chaleur par convection et par évaporation, ce qui peut causer un inconfort à l'occupant dans un climat froid. Un courant d'air est acceptable si la vitesse de l'air moyenne, lorsqu'elle n'est pas contrôlée par les occupants, est inférieure à 0,15 m/s pour une température opératoire de moins de $22,5\ ^{\circ}\text{C}$ (ASHRAE 55, 2013). Dans ce contexte, au maximum, 20 % des occupants sont incommodés par les courants d'air.

Le maintien du confort suppose un taux maximum acceptable d'humidité de 0,012 kg H₂O/kg air sec, ce qui correspond à une température de rosée de $16,8\ ^{\circ}\text{C}$ (voir Figure 1.4). Cependant, il n'y a pas de limite inférieure d'humidité. Par contre, il a été démontré qu'une température de rosée inférieure à $2\ ^{\circ}\text{C}$ crée, en raison de l'air sec, des inconforts tels que la sécheresse de la peau et des yeux, l'irritation des voies respiratoires et de l'électricité statique (ASHRAE Fundamentals, 2013), surtout si l'humidité relative (HR) est de moins de 20 % (Ching, Adams et Saint-Pierre (adapt.), 2001 c2003).

La zone de confort pour les occupants, selon ces critères, est illustrée par la zone hachurée sur un abaque psychrométrique dans l'ASHRAE 55-2013 (Figure 1.4). Elle est décrite en fonction de la température opératoire (équation (1.1)) et de l'humidité dans les conditions où le taux métabolique est entre 1 et 1,3 met ainsi que l'isolation des vêtements entre 0,5 et 1 clo. Cette zone de confort correspond à un pourcentage d'acceptabilité des occupants de 80 %. La principale différence entre les conditions estivales et hivernales est la plage de la température

opératoire selon l'isolation des vêtements. En résumé, en conditions hivernales, la température opératoire minimum acceptable est d'environ 21,5 °C avec une faible HR et d'environ 19,5 °C avec une HR d'environ 85 % (température de rosée de 16,8 °C). La température opératoire maximum acceptable est d'environ 26,5 °C avec une faible HR et d'environ 24 °C avec une HR d'environ 65 % (température de rosée de 16,8 °C).

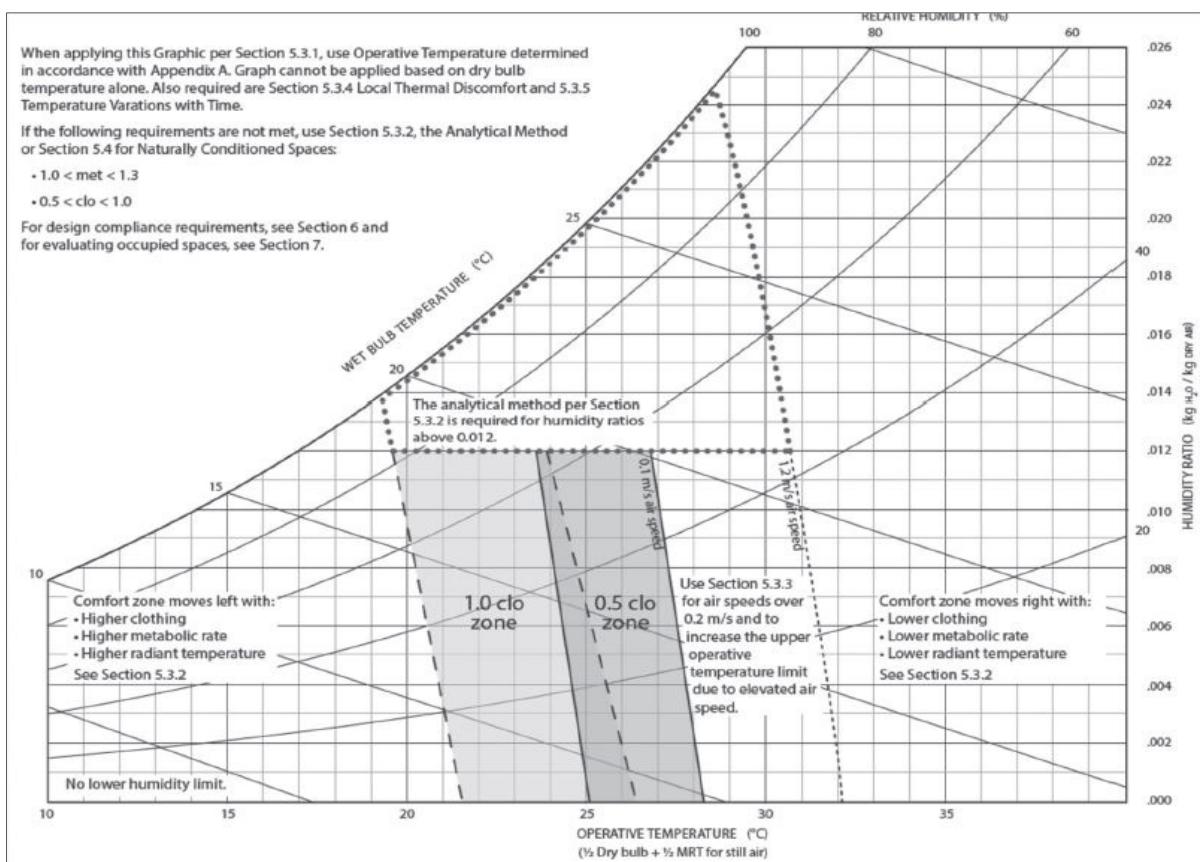


Figure 1.4 : Zone de confort en fonction de la température opératoire et de l'humidité
Tiré de l'ASHRAE 55 (2013, p. 9)

1.1.1.3 Autres critères d'évaluation du confort

Le confort thermique peut aussi être affecté par des fluctuations brusques de la température opératoire. Ces fluctuations se caractérisent soit par une dérive soit par une rampe de la température. Une dérive est un changement de la température passif tandis qu'une rampe est un changement de la température contrôlé. La variation de la température opératoire avec le

temps permise pour une dérive ou une rampe est présentée à la Figure 1.5. Ceci s'applique lorsque l'occupant n'a pas le contrôle sur la température de l'environnement intérieur.

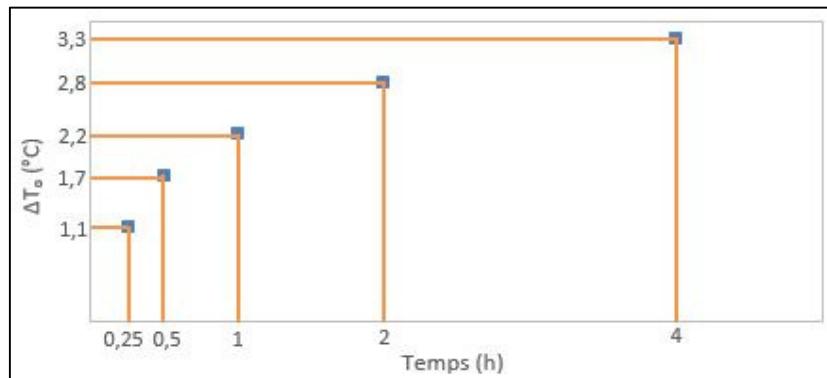


Figure 1.5 : Variation de la température opératoire avec le temps
Tiré de l'ASHRAE 55 (2013, p. 11)

La stratification thermique de l'air peut aussi créer un inconfort supplémentaire pour l'occupant, puisque la température au niveau de la tête est plus élevée qu'aux chevilles. Donc, la différence verticale de la température de l'air, qui est la différence de la température de l'air entre le niveau de la tête et des chevilles, ne doit pas dépasser $3\ ^{\circ}\text{C}$ (ASHRAE 55, 2013). Au maximum, 5 % des occupants sont incommodés par la différence verticale de la température de l'air.

Une surface de plancher trop chaude ou trop froide peut également nuire au confort de l'occupant. La température de surface de plancher pour des occupants assis dont les pieds chaussés sont en contact avec le plancher doit être entre 19 et $29\ ^{\circ}\text{C}$ (ASHRAE 55, 2013). Cependant, la température optimale est de $25\ ^{\circ}\text{C}$ pour des personnes sédentaires (ASHRAE Fundamentals, 2013). Au maximum, 10 % des occupants sont incommodés par la température de surface de plancher.

Un inconfort peut aussi survenir à cause des surfaces trop froides et trop chaudes, c'est-à-dire une asymétrie de la température radiante. Celle-ci peut être évaluée pour les cas suivants : (1) le plafond plus chaud que le plancher et (2) le mur plus froid que l'air de la pièce. Les différences doivent être de moins de $5\ ^{\circ}\text{C}$ et de $10\ ^{\circ}\text{C}$ pour les premier et deuxième cas

respectivement (ASHRAE 55, 2013). Au maximum, 5 % des occupants sont incommodés par une asymétrie de la température radiante. Par contre, dans le guide technique et pratique de la construction (Ching, Adams et Saint-Pierre (adapt.), 2001 c2003), il est mentionné que la différence de température entre la surface intérieure d'un mur extérieur froid et l'air de la pièce ne doit pas dépasser 2,5 °C.

1.1.2 Confort thermique adaptatif

Dans un bâtiment refroidi uniquement par la ventilation naturelle, la température intérieure dépend davantage des conditions météorologiques extérieures. Les critères de confort sont évalués selon un modèle de confort adaptatif. Ce modèle a été instauré dans l'ASHRAE 55 pour la première fois en 2004. Il est applicable lorsqu'il n'y a aucun système mécanique de refroidissement et que le système de chauffage n'est pas en fonction. Le taux métabolique de l'occupant doit être entre 1 et 1,3 met, et cet occupant doit s'adapter à son environnement en portant des vêtements ayant une isolation thermique entre 0,5 et 1 clo. La plage de la température moyenne extérieure applicable est entre 10 et 33,5 °C pour les espaces naturellement conditionnés contrôlés par les occupants.

Les adaptations des occupants peuvent être physiologiques, comportementales et psychologiques. En connaissant l'importance de chacune de ces adaptations, il est plus facile lors de la conception d'améliorer le confort thermique tout en diminuant la consommation énergétique.

1.1.3 Modèle de Fanger

L'utilisation du modèle de Fanger (1972) permet d'évaluer le confort thermique de façon plus holistique. Ce modèle consiste à prévoir le vote moyen (PMV) des occupants avec le pourcentage prévisible d'occupants insatisfaits (PPD) comme illustré sur la Figure 1.6. Ce modèle donne de meilleurs résultats en condition d'équilibre thermique. Les six facteurs sur le confort thermique mentionnés précédemment sont à considérer pour le calcul du PMV. Le PPD est calculé en fonction du PMV. Selon l'ASHRAE 55-2013, le taux métabolique doit se situer

entre 1 et 2 m² et l'isolation des vêtements est de 1,5 clo ou moins. De plus, les occupants votent à l'aide d'une échelle de sensation thermique de sept points définie ainsi : -3 *cold*, -2 *cool*, -1 *slightly cool*, 0 *neutral*, +1 *slightly warm*, +2 *warm* et +3 *hot*. La plage acceptable est d'un écart du PMV de $\pm 0,5$ avec un PPD de 10 %, qui représente un inconfort thermique pour tout le corps. Cependant, avec l'ajout d'un pourcentage de 10 % d'inconfort local, qui peut être ressenti sur une partie du corps, ceci donne un PPD de 20 % pour un écart du PMV de $\pm 0,5$. La zone de confort présentée à la Figure 1.4 correspond à un PMV de $\pm 0,5$.

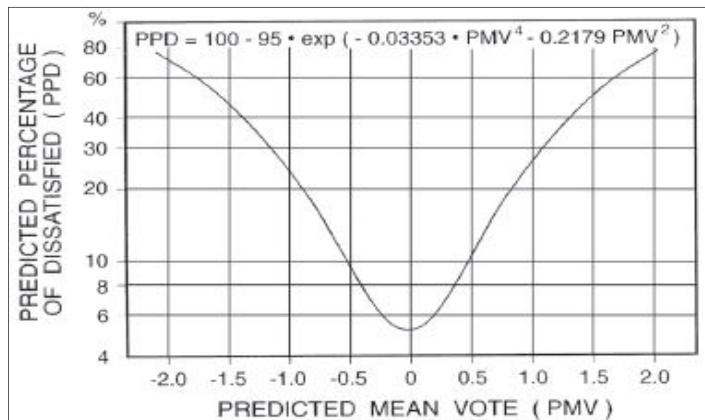


Figure 1.6 : PPD en fonction du PMV
Tirée de l'ASHRAE 55 (2013, p. 23)

Ce modèle de Fanger (1972) a été ajusté de façon à fournir de meilleurs résultats de PMV dans des bâtiments naturellement ventilés en climat chaud, c'est-à-dire dans un contexte de confort thermique adaptatif. Le PMV est souvent surestimé puisque les attentes des occupants sont moins élevées face aux conditions environnementales intérieures. Les occupants s'adaptent en effectuant des activités moins exigeantes physiquement, ce qui a pour effet que leur taux métabolique estimé est plus élevé qu'il ne l'est en réalité dans un climat chaud. Donc, un facteur d'espérance (*e*) est utilisé pour adapter le calcul du PMV. Ce facteur *e* varie entre 1 et 0,5 où 1 correspond à un bâtiment avec de l'air conditionné (Ole Fanger et Toftum, 2002). Cette approche a aussi été utilisée par Yang et al. (2011), où un modèle de type « boîte noire » a servi au calcul des votes moyens prévus dans le cas d'un confort thermique adaptatif (aPMV).

1.2 Évaluation du confort thermique

Dans la section 1.1, il a été constaté que plusieurs facteurs influent sur le confort thermique. De façon générale, souvent ces facteurs sont contrôlés par un système de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA). Advenant le cas où le système CVCA n'est plus en fonction ou que des fluctuations de la température de l'air sont programmées, il en découle que certains facteurs dépassent les limites acceptables. Pour y remédier, il est possible de compenser au moyen d'autres facteurs. De plus, les différents modes d'adaptation auxquels les occupants ont recours jouent un rôle important dans l'atteinte du confort thermique dans leur environnement. Afin de savoir le mode d'adaptation qui était le plus prépondérant entre une adaptation physiologique, une adaptation comportementale ou une adaptation psychologique, Liu, Yao et McCloy (2012) ont proposé de les quantifier au moyen d'une analyse hiérarchique des procédés. En analysant les votes d'occupants du Royaume-Uni et de la Chine, les résultats ont démontré que l'adaptation physiologique est la plus importante avec 50,61 % pour le Royaume-Uni et 41,54 % pour la Chine. Cette adaptation se caractérise par la réponse physiologique du corps humain dans un environnement thermique donné, une réponse, par exemple, au niveau de la tension artérielle, de la fréquence cardiaque, de la température de la peau, ou de la transpiration. Quelques exemples parmi la littérature sont présentés ci-après. Ils font ressortir les facteurs dominants et les adaptations des occupants dans différentes circonstances soit dans un climat chaud soit dans un climat froid.

1.2.1 Climat chaud

Durant la saison hivernale, un inconfort survient en raison du faible taux d'humidité. Tandis qu'en saison estivale, les occupants ressentent un inconfort attribuable au taux d'humidité élevé avec une température de l'air élevée. Toutefois, l'augmentation de la vitesse de l'air peut avoir un effet positif sur le confort thermique par l'évaporation de l'humidité de la peau dans un climat chaud. Aussi, des économies d'énergie peuvent être réalisées sur les systèmes d'air conditionné par l'augmentation de la température de consigne et de la vitesse de l'air. Par exemple, la limite de la vitesse de l'air acceptable par l'occupant était de 1,2 m/s avec une température de l'air neutre de 26,5 °C (Fong et al., 2010). Dans ces conditions, les économies

étaient de 12,9 % pour le système de débit d'air variable (VAV) et de 9,3 % pour le serpentin par comparaison avec un système d'air conditionné programmé à 24 °C pour la température de l'air.

Une autre étude expérimentale a évalué le comportement des occupants et leurs perceptions du confort thermique dans le climat chaud et humide du Japon (Rijal, Humphreys et Nicol, 2015). Les maisons étaient en mode ventilation naturelle ou refroidies à l'aide d'un air conditionné. En général, les occupants étaient à l'aise et s'étaient adaptés à leur environnement. La température moyenne intérieure de confort était d'environ 27 °C pour les deux modes étudiés. De plus, ils ont toléré une température intérieure plus chaude si l'humidité de la peau était évaporée à l'aide de courant d'air produit par l'ouverture des fenêtres ou l'activation d'un ventilateur. Le confort thermique des occupants a été évalué selon une échelle de sensation thermique à sept points. Les votes des occupants pour une sensation thermique neutre ont atteint 48,2 % pour le mode ventilation naturelle et 68 % pour l'air conditionné.

Des normes supérieures de techniques de construction sont employées afin de permettre un meilleur rendement énergétique des bâtiments. Ces techniques permettent de diminuer la demande de chauffage ou du refroidissement de l'air, par exemple, par l'augmentation de la résistance thermique de l'isolation, par l'amélioration de l'étanchéité et par l'utilisation de la masse thermique. Un risque de surchauffe peut survenir dans des bâtiments à faible consommation énergétique en été lorsqu'aucun système de refroidissement n'est en fonction. Cependant, ce risque dépend plus du comportement des occupants que du type de construction. Des études expérimentales avec des occupants ont été réalisées avec pour objectif de voir s'il y avait un risque de surchauffe en été dans un bâtiment en mode refroidissement naturel.

Trois maisons identiques au Royaume-Uni ont été évaluées avec un modèle adaptatif en fonction de la norme européenne sur le confort thermique (EN 15251 : 2010) (Jones, Goodhew et de Wilde, 2016). Deux de ces maisons ont été construites selon une norme à rendement énergétique supérieur, tandis que l'autre a été construite selon la conformité à la norme minimale de rendement énergétique. La maison à la conformité minimale a atteint des

températures plus basses que celles à rendement énergétique supérieur. Donc, des bâtiments construits selon des normes supérieures peuvent être une cause de l'augmentation de la température intérieure. Cependant, il y avait des variations concernant les températures moyennes intérieures et le confort thermique dans les deux maisons à rendement énergétique supérieur. Ces variations étaient attribuables aux comportements des occupants.

Le confort thermique des occupants a aussi été évalué avec un modèle adaptatif de la norme EN 15251 : 2007 dans un bâtiment à bureau *Passive House* de cinq étages en Roumanie (Ioana et al., 2016). Il était refroidi par ventilation géothermique le jour, et les fenêtres étaient ouvertes durant la nuit. Les occupants ont évalué leur sensation thermique à l'aide de l'échelle à sept points. La majorité des occupants ont voté avoir ressenti une sensation thermique neutre pour les quatre étages étudiés (RDC, 1^{er}, 2^e et 4^e). Toutefois, la sensation de froid à chaud a évolué au fur et à mesure que le niveau d'étage augmentait en raison de l'effet de la stratification thermique. Le premier étage a obtenu la meilleure évaluation de confort selon les votes des occupants. De plus, les valeurs moyennes des votes des occupants, en ce qui concerne leur sensation thermique, ont été comparées avec les prévisions de votes (PMV), et il y avait une bonne concordance entre les deux types de votes. Cependant, une petite différence a été rapportée au RDC avec 0,27 d'écart; le PMV ayant surestimé les votes de sensation thermique. Ioana et al. (2016) concluent que les occupants avaient un comportement adaptatif et qu'il n'y avait pas de risque de surchauffe dans ce bâtiment de construction *Passive House*.

Des cycles de température aident à diminuer les pointes de demandes d'énergie. Cependant, il est convenu que les facteurs qui caractérisent le confort thermique ne sont plus en état d'équilibre. Une étude expérimentale a évalué le confort thermique avec les votes d'occupants durant des cycles de température de l'air dans le climat chaud australien (Zhang, de Dear et Candido, 2016). Deux types d'expérimentations ont été effectués par le contrôle de la température de l'air et de l'humidité relative. Au total, huit essais différents ont été réalisés dont la moitié a été bien reçue par les occupants. Lors des cycles de température, les facteurs les plus importants étaient la température opératoire, la pression de vapeur et le taux de variation de température. Les variations de la température opératoire avec le temps

recommandées par l'ASHRAE 55-2013 sont conservatrices comme l'illustre le Tableau 1.2. Les variations maximums ont obtenu un taux de 80 % d'acceptabilité. Dans la deuxième expérimentation, les occupants ont toléré de moins grandes amplitudes puisque la température opératoire était plus chaude. Les résultats des votes des occupants, avec 20 % de votes insatisfaits, basés sur l'échelle de sensation thermique à sept points, ont varié de -0,97 à +0,85, tandis qu'ils variaient entre -1,5 et +1,2 avec la méthode des votes binaires. Par comparaison avec le modèle de Fanger (1972), la plage acceptable de PMV est de $\pm 0,85$ avec un PPD de 20 %. Le PMV a davantage sous-estimé les votes des occupants face au froid puisqu'ils ont toléré des températures plus froides que prévu.

Tableau 1.2 : Variations maximums de la température opératoire
avec le temps
Tiré de Zhang, de Dear et Candido (2016) (p.16)

Experiment	Adapting temperature, °C	Time period, h		
		0.2	0.25	0.5
1	23.2	1.8	2.2 (1.1)	3.3 (1.7)
2	24.9	1.7	—	—

Les données entre parenthèses représentent les limites de l'ASHRAE 55-2013 (voir Figure 1.5).

1.2.2 Climat froid

Les évaluations sur le confort thermique dans les études précédentes ont toutes été menées en climat chaud. En effet, le confort thermique a été très peu évalué en climat froid. Cependant, l'étude expérimentale sur le confort thermique de Zhang et al. (2017) avait pour but de comparer les conditions environnementales intérieures, l'isolation des vêtements et la sensation thermique des occupants de trois régions différentes pendant la saison hivernale. Les régions choisies étaient l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie, toutes situées en latitude nord sous un climat tempéré. Les conditions environnementales intérieures ont varié d'une région à l'autre. Les résultats sont donnés pour les villes de l'Amérique du Nord seulement. L'humidité

relative moyenne intérieure était inférieure à 40 %. La plage de la température opératoire la plus fréquente était entre 22 et 26 °C. Elle variait peu et ne dépendait pas de la température extérieure. L'isolation des vêtements moyenne, minimum et maximum était de 0,23, 0,79 et 1,80 clo respectivement.

La plage de confort acceptable des votes d'occupants était de ± 1 pour une échelle de sensation thermique à sept points et la température opératoire se situait entre 20,3 et 25 °C (Figure 1.7), tandis que la température opératoire neutre était de 22,7 °C. Les votes des occupants sur la sensation thermique (*thermal sensation vote (TSV)*) étaient à l'opposé de ceux prévus (PMV) comme l'illustre la Figure 1.8. C'est-à-dire que dans un environnement froid les occupants ont ressenti un inconfort plus froid que les prévisions. De même, dans un environnement au-dessus de la température opératoire neutre les occupants ont ressenti un inconfort plus chaud que les prévisions. Ces résultats démontrent la sensibilité thermique des occupants face au froid ou au chaud. La région qui concordait mieux avec les normes sur le confort thermique était l'Amérique du Nord avec plus de 90 %. Ensuite, le pourcentage d'acceptabilité octroyé par les occupants y a été de 85,7 %. Tandis que l'Asie a obtenu les pourcentages de respect des normes les plus faibles (p. ex. 26,5 % pour l'AHRAE 55-2013) et le plus grand pourcentage d'acceptabilité octroyé par les occupants soit 87,4 %. Il est à mentionner que, dans cette région, l'isolation des vêtements y était la plus élevée, et les températures opératoires y étaient les plus froides. Donc, il est possible d'avoir un bon taux d'acceptabilité des occupants par l'adaptation aux conditions intérieures même si elles se situent à l'extérieur des normes.

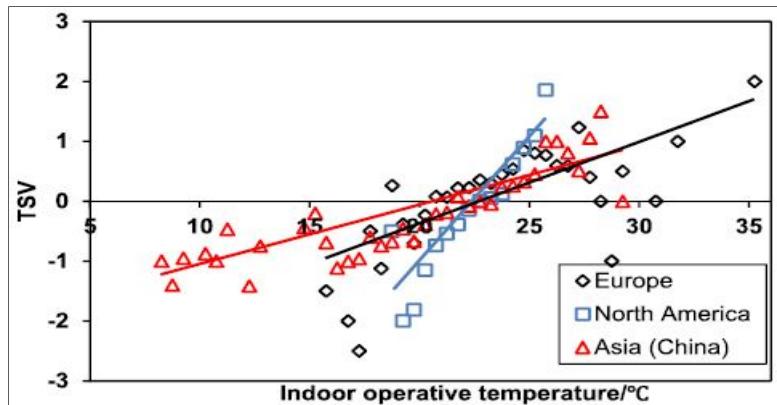


Figure 1.7 : Votes des occupants pour les trois régions
Tirée de Zhang et al. (2017) (p. 214)

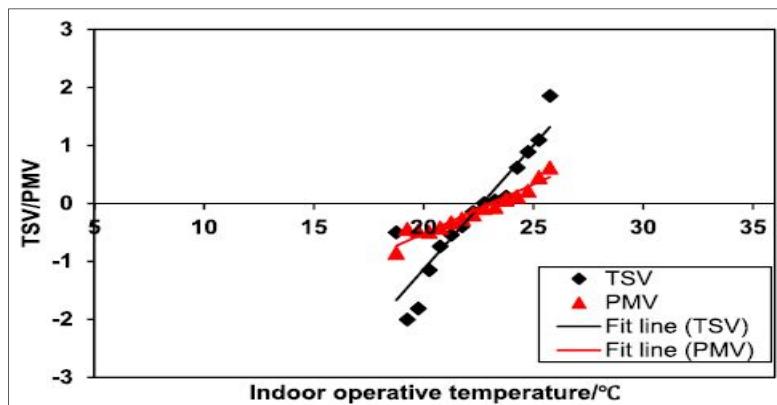


Figure 1.8 : Votes des occupants en comparaison avec PMV
de l'Amérique du Nord
Tirée de Zhang et al. (2017) (p. 215)

1.3 Stratégies d'abaissement de la température

Le chauffage occupe une grande partie de la consommation d'électricité dans le secteur résidentiel (Figure 1.1), d'où l'intérêt de réduire celle-ci le plus possible. Quelques études expérimentales ont été réalisées par le recours aux abaissements de la température, l'attention étant centrée sur la consommation d'énergie. Cependant, très peu de recherches ont quantifié l'effet que ces abaissements avaient sur le confort thermique des occupants dans un climat froid en fonction de normes écrites telles qu'ISO 7730 et ASHRAE 55. Toutefois, les différentes études sur les stratégies d'abaissements de la température sont regroupées dans cette section afin de relever leurs effets sur le confort.

Il existe deux principales stratégies d’abaissement de la température. La première a pour but de diminuer la consommation d’énergie par le chauffage, et la deuxième est plutôt centrée sur une réduction de la demande d’énergie instantanée durant les heures de pointe. Ces stratégies peuvent être basées sur des analyses expérimentales ou numériques/simulations.

1.3.1 Consommation énergétique à la suite d’abaissements de la température

Au Canada, trois études principales ont analysé des abaissements de la température de consigne de thermostats en mode chauffage sur des bâtiments résidentiels. Leur objectif était de quantifier la diminution de la consommation d’énergie à l’aide de données mesurées in situ. La première maison est à Hamilton en Ontario. Ensuite, il y a les maisons jumelles à Ottawa, en Ontario, au Centre canadien des technologies résidentielles (CCTR). Enfin, il y a les maisons jumelles, les maisons d’expérimentation en énergétique du bâtiment (MEEB), à Shawinigan, au Québec, au Laboratoire des Technologies de l’Énergie (LTE).

La maison à Hamilton est certifiée R-2000. Elle n’a pas de sous-sol et est équipée d’une chaudière électrique. Cette maison n’a pas seulement servi de banc d’essai in situ, elle était occupée, contrairement aux maisons du CCTR et du LTE. La chaudière a dû être remplacée par une plus performante qui était en mesure de réchauffer l’air de la maison lors de la reprise de la température de consigne. La température de consigne de référence était de 21 °C (Poehlman, Mesher et Meadowcroft, 1988). Le Tableau 1.3 présente le scénario journalier d’abaissements de la température pour la saison d’hiver en vue de la quantification des économies d’énergie. Les essais d’abaissements ont été réalisés durant les saisons de chauffage de 1984 à 1985 et de 1985 à 1986.

Tableau 1.3 : Scénario journalier d'abaissements de la température pour la maison à Hamilton
 Tiré de Poehlman, Mesher et Meadowcroft (1988) (p. 227)

Température d'abaissement (°C)	Heures d'abaissement (h)
19	23:00 à 6:00
17	8:00 à 17:00

Les économies d'énergie obtenues par ces abaissements de la température de consigne ont été négligeables. Les deux pointes de consommation à 6 h et à 17 h ont occasionné une consommation de 26,2 kWh comparativement à une consommation estimée de 27,8 kWh si la maison avait été maintenue à une température constante de 21 °C. Pendant l'abaissement de jour, l'apport des gains solaires a diminué le temps de fonctionnement de la chaudière. Cependant, le système de chauffage était nécessaire pour combler les pertes de chaleur à travers les fenêtres durant la nuit. Une amplitude journalière de la variation de la température intérieure de 5 °C était possible en raison des gains solaires le jour et des pertes de chaleur à travers les fenêtres la nuit. À la suite de l'abaissement de la température de la nuit, le temps de récupération moyen était d'un peu moins de 2 h et, à la suite de celui du jour, d'environ 2 h 30 dans les pires conditions. Il était plus long après l'abaissement du jour puisque la température pour cette période a été programmée à 17 °C, soit 2 °C plus bas que la température programmée pour la nuit.

Les maisons jumelles du CCTR, à Ottawa, ont aussi été utilisées pour des expériences d'abaissements de la température de consigne de chauffage. L'une des maisons a servi de référence aux fins de comparaison des résultats. Les maisons du CCTR sont certifiées R-2000. Elles comportent deux étages, un sous-sol et un garage isolé attenant. Elles sont équipées d'un système de chauffage au gaz central contrôlé par un thermostat situé au rez-de-chaussée. La température de consigne de référence était de 22 °C, et les données mesurées in situ étaient recueillies toutes les 5 minutes (Manning et al., 2007). Les fenêtres étaient recouvertes durant les essais pour limiter les gains solaires dans les maisons. Les scénarios d'abaissements de la température et les résultats d'économies d'énergie en fonction de la maison référence sont

présentés dans le Tableau 1.4 pour les périodes d'hiver de fin novembre à début février de 2002 et de 2003.

Tableau 1.4 : Économies d'énergie des abaissements de la température de consigne de la maison test du CCTR
Tiré de Manning et al. (2007) (p. 5)

Température d'abaissement (°C)	Heure d'abaissement (h)	Économie d'énergie moyenne (%)	Économie d'énergie jour froid (%)
18	23:00 à 6:00	7,3	15,1
18	23:00 à 6:00 et 9:00 à 16:00	11,9	23,7
16	23:00 à 6:00 et 9:00 à 16:00	15,3	29,4

Durant une journée froide, les économies d'énergie moyennes étaient respectivement de 23,7 % et de 15,1 % pour un abaissement de la température combiné et de nuit avec une amplitude de variation de la température de 4 °C. Le temps d'arrêt de l'équipement de chauffage a été diminué de 3 h 48 pour la maison test du CCTR. Les économies étaient plus grandes lors des journées nuageuses et très froides. De plus, quand la température extérieure était au-dessus de 0 °C, les économies étaient moindres puisque des maisons avec un haut rendement énergétique n'ont pas le temps de se refroidir durant les abaissements de la température. Le temps de récupération, c'est-à-dire lorsque le thermostat tente d'atteindre sa température de consigne, a été de 2 h 15 maximum lors d'un abaissement de nuit à 16 °C, et la température du thermostat a atteint 14 °C. En général, le temps de récupération était moins de 1 h.

Les MEEB du LTE opèrent similairement aux maisons du CCTR : l'une des maisons est utilisée pour les abaissements de la température et l'autre comme référence aux fins de comparaison des résultats. Elles comportent deux étages, un sous-sol et un garage isolé attenant. Les pièces sont équipées de plinthes électriques contrôlées localement par un

thermostat électronique. La température de consigne de référence était de 21 °C, et les données mesurées in situ étaient recueillies toutes les 15 minutes (Jacquet, Le Bel et Monfet, 2017). Les fenêtres étaient recouvertes pour limiter l'infiltration des gains solaires. Les scénarios d'abaissements de la température et les résultats d'économies d'énergie en fonction de la maison référence sont présentés dans le Tableau 1.5 pour les périodes d'hiver de février à début mars de 2012, de 2014 et de 2015.

Tableau 1.5 : Économies d'énergie des abaissements de la température de consigne de la maison test du LTE
Tiré de Jacquet, Le Bel et Monfet (2017) (p. 543)

Température d'abaissement (°C)	Heure d'abaissement (h)	Marge d'économie d'énergie (%)	Économie moyenne d'énergie (%)
17	8:00 à 16:00	5,4 à 6,5	
17	22:00 à 6:00	3,1 à 26,3	$10 \pm 5,9$
17	8:00 à 16:00 et 22:00 à 6:00	16,6 à 38	$23,8 \pm 10$

Une économie d'énergie moyenne de 23,8 % et de 10 %, respectivement pour un abaissement de la température combiné et de nuit, a été possible pour une amplitude de variation de la température de 4 °C. En général, les économies étaient meilleures avec des abaissements combinés et de nuit. De plus, elles étaient meilleures pour la première journée de l'essai. Quelquefois la consommation d'énergie avait augmenté au RDC par comparaison avec la maison référence. Le temps d'arrêt des plinthes électriques a été diminué durant 4 à 8 h pour le sous-sol; 1 à 4 h au RDC; et 2 à 6 h 30 à l'étage. Cependant, il est à mentionner que lors de la reprise de la température de consigne la capacité des plinthes électriques fonctionnait en moyenne à 90 %. Le sous-sol avait de plus grandes économies, car il avait peu d'ouvertures et il était moins influencé par les conditions extérieures en raison des températures stables du sol. La température extérieure en fonction des économies d'énergie se situait entre -20 et -6 °C au sous-sol; au-dessus de -12 °C au RDC; et les économies étaient constantes à l'étage, peu importe la température extérieure. Quant aux temps de récupération, le plus long a été de

2 h 45. Ils étaient généralement plus longs au sous-sol et ceux de l'étage étaient de moins de 30 min. Tandis qu'au RDC, ils étaient un peu plus longs que ceux de l'étage.

Les résultats obtenus au CCTR et au LTE ont démontré que des économies d'énergie ont été possibles même avec des maisons très étanches et bien isolées puisque leurs pertes de chaleur sont inférieures aux vieilles maisons. Ensuite, les résultats de la maison à Hamilton et du LTE ont démontré que des abaissements de la température peuvent nécessiter des équipements de chauffage de plus grande capacité en raison de la demande élevée d'énergie lors de la reprise. Il est à mentionner que le système de chauffage utilisé dans les maisons du CCTR a été surdimensionné.

Il existe d'autres approches pour atteindre des économies d'énergie dans un bâtiment résidentiel, par exemple les approches présentées par Newsham et Donnelly (2013). Ces derniers ont comparé l'économie d'énergie réalisée en changeant des ampoules par des moins énergivores avec l'économie réalisée en effectuant des abaissements de la température de consigne du chauffage en hiver. Le fait de changer une ampoule incandescente pour une ampoule fluorescente compacte ou pour une ampoule à diode électroluminescente (DEL) a diminué la consommation de 20 kWh/année. Tandis qu'une diminution de la consommation d'énergie d'environ 200 kWh/°C a été possible par l'abaissement de la température de consigne. Par exemple, changer 20 ampoules fluorescentes compactes a créé une économie semblable à celle d'un abaissement de la température de consigne de 2 °C durant la nuit. Cependant, changer 20 ampoules demande un investissement supplémentaire.

1.3.2 Gestion de la pointe de la demande d'énergie

Quelques études ont été réalisées sur l'impact de pointe de la demande d'énergie sur le réseau de distribution en hiver aux heures de pointe, soit entre 6 h et 9 h et entre 16 h et 20 h. L'étude expérimentale de Handfiel, Nesreddine et Le Bel (2006) a évalué l'effet d'abaissements de la température de consigne avec des thermostats programmables sur le réseau de distribution d'énergie. Lors de la reprise de la température de consigne, la demande d'énergie augmente si

plusieurs maisons ont programmé leurs thermostats à la même heure. Deux cents maisons automatisées et deux cents maisons de référence ont été analysées en fonction de la demande d'énergie horaire, de la consommation d'électricité pour le chauffage et de la température des pièces. Les résultats ont révélé que les utilisateurs avaient plus tendance à programmer un abaissement de la température durant la nuit que des abaissements combinés. Cet abaissement massif de la température durant la nuit a entraîné une grande demande d'énergie vers 6 h 30 lorsque la température du thermostat augmente et accentue la pointe de la demande du matin. Ainsi, l'abaissement généralisé de la température durant la nuit entre en conflit avec l'objectif d'abaisser la pointe de la demande du matin. Une amplitude de la variation de la température de 4 °C durant un abaissement a pris un temps de récupération de plus de 2 h avec une température extérieure en dessous de -20 °C. Il n'est pas recommandé d'effectuer une variation de la température de plus de 3 °C puisque les économies d'énergie en ont été affectées et, par le fait même, le confort des occupants. La demande instantanée d'énergie pour le chauffage a été en dessous de 40 % de sa capacité lorsque la reprise de la température a été programmée plus tôt le matin. De plus, une économie d'énergie d'environ 4 % a été réalisée. Ceci amène à recommander à l'utilisateur d'effectuer une rampe non linéaire de 2 h et de programmer les thermostats avec des délais pouvant aller jusqu'à 30 minutes entre eux. Ces recommandations vont contribuer à la diminution de la pointe de la demande sur le réseau de distribution ainsi qu'à l'augmentation du confort des occupants.

Des études ont été réalisées sur les pointes de la demande d'énergie à l'aide de simulations énergétiques TRNSYS (Leduc, Daoud et Le Bel, 2011) et (Fournier et Leduc, 2014). Le modèle de la maison utilisée pour les simulations est basé sur les MEEB du LTE. Différentes stratégies ont été évaluées afin de réduire la demande d'énergie durant les heures de pointe. Les résultats à la suite de ces stratégies ont démontré que les réductions de la pointe de demande étaient généralement plus grandes pour la période du matin.

Dans la première étude, le confort thermique a été évalué selon la norme ISO 7730 lors d'abaissements de la température. Les résultats qui en découlent ont démontré que le confort des occupants n'était pas idéal. Par exemple, lors de la stratégie du préchauffement des pièces,

du fait de l'atteinte d'une température élevée, les occupants dans leurs vêtements chauds peuvent sentir un inconfort. En conséquence, Leduc, Daoud et Le Bel (2011) ont adapté les valeurs de PPD pour leur étude puisque la sensation d'inconfort ne dure que pour un bref moment. Donc, durant les périodes de pointe de demande d'énergie, un PPD inférieur à 50 % était considéré comme bon, entre 50 et 75 % comme acceptable et plus élevé que 75 % comme inacceptable. En général, le confort thermique était meilleur le matin.

Tandis que dans la deuxième étude, pour assurer un confort thermique aux occupants, il est préférable d'avoir une température de consigne de 21 °C durant les heures de pointe (Fournier et Leduc, 2014). La stratégie qui assurait un confort était celle avec une température de 21°C maintenue toute la journée. C'était aussi celle qui a obtenu la plus grande consommation journalière, mais tout de même acceptable.

1.3.3 Impact des abaissements de la température sur le bâtiment

Quelques observations ont été portées sur le bâtiment soumis aux abaissements de la température pour les trois bancs d'essais expérimentaux au Canada. Ces abaissements affectent le bâtiment et par le fait même le confort thermique. Des répercussions ont été constatées, entre autres, sur les températures de surface, la condensation et la stratification thermique de l'air.

1.3.3.1 Température de surface

La diminution de la consommation d'énergie et l'augmentation du confort thermique sont possibles par le stockage de l'énergie solaire dans les murs et les planchers comme cela est pratiqué dans les bâtiments solaires passifs. Pour ce faire, des matériaux ayant une bonne densité volumique de masse sont utilisés puisqu'ils sont en mesure d'absorber une grande quantité d'énergie provenant de la radiation solaire et de la diffuser lentement ultérieurement. Ce phénomène se nomme l'inertie thermique.

Les thermocouples qui enregistrent la température de l'air ne prennent pas en compte la température plus froide des matériaux du bâtiment. Dans le cas de la maison à Hamilton,

Poehlman, Mesher et Meadowcroft (1988) ont observé que l'effet de la masse va prolonger la durée de réchauffement de l'air ambiant des pièces. Cet effet de la masse a aussi été constaté dans le cas de la maison test du CCTR (Manning et al., 2005) et a été considéré comme un facteur pouvant augmenter le temps de récupération. De plus, ce même effet peut faire passer le système de chauffage du mode arrêt au mode fonctionnement en peu de temps à cause de la différence entre la température de l'air intérieur et la température de surface intérieure du mur extérieur. Au CCTR, les températures de surface de la maison test ont varié par rapport à la température de l'air intérieur d'environ 2 °C en moins sauf pour les murs au sud durant les journées ensoleillées. Les températures minimums ont généralement été enregistrées les matins et les maximums durant les jours ensoleillés avec 25 °C et plus au deuxième étage. Le Tableau 1.6 présente les températures de surface minimum et l'orientation du mur extérieur des maisons du CCTR.

Tableau 1.6 : Température de surface minimum ($T_{surf,min}$) et l'orientation du mur extérieur des maisons du CCTR
 Tiré de Manning et al. (2005) (p. 27)

Température de consigne (°C)	$T_{surf,min}$ maison test (°C)	Orientation mur extérieur	$T_{surf,min}$ maison référence (°C)	Orientation mur extérieur
22	18,31	Ouest	18,08	Sud
18	14,88	Est	17,83	Ouest
16	12,74	Est	17,80	Sud

Les murs de fondation sont principalement affectés par la température extérieure. Dans le cas de la maison référence du CCTR, les températures du mur de fondation ont été analysées par Armstrong (2011). Les températures à la surface du béton intérieur ont varié en fonction de la température extérieure, mais avec un décalage dans le temps de trois jours au niveau du sol et de soixante-neuf jours à la base du mur (Figure 1.9). Durant les journées ensoleillées du printemps, les étages au-dessus du sous-sol sont assez chauds pour permettre d'atteindre la température de consigne du thermostat central tandis que les températures des surfaces des

murs du sous-sol peuvent atteindre leur température la plus froide de l'année. Les occupants peuvent se sentir mal à l'aise au sous-sol dans ces conditions. L'isolant aide à atténuer la sensation du froid sur la surface intérieure. Les températures à la base du mur peuvent être plus froides en raison du contact avec la dalle de plancher non isolé. Aussi, du fait de la stratification de l'air, les températures du mur vers le plafond sont plus élevées.

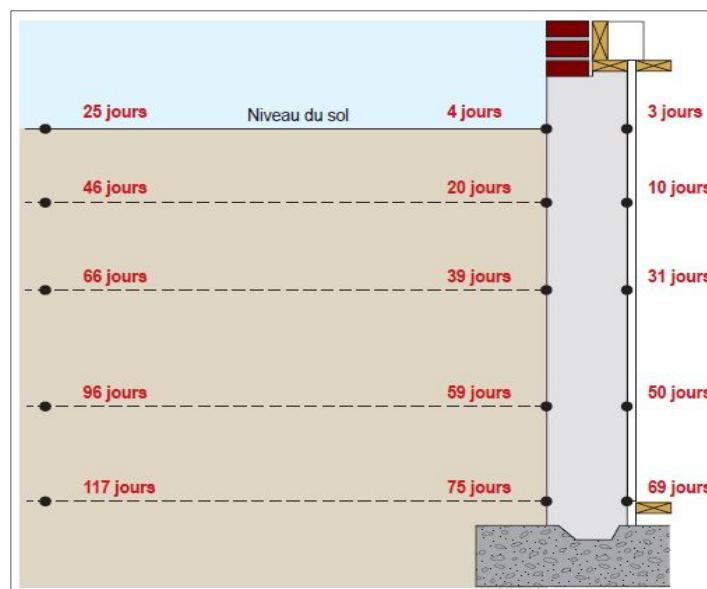


Figure 1.9 : Effet de la température extérieure des jours précédents sur le mur de fondation
Tiré de Armstrong (2011) (p. 1)

De même, dans le cas de la maison test du LTE, lors de la reprise, Jacquet, Le Bel et Monfet (2017) ont observé que le sous-sol avait une période de pointe de consommation d'environ 1 h 30, qui s'avérait être de cinq à sept fois plus longue que celle des autres étages. Ceci s'explique par le fait que les murs des fondations ont une masse thermique élevée. Durant les abaissements de la température, la chaleur emmagasinée dans le béton se dégage en raison de la différence de température avec l'air. Donc, lors de la reprise, un surplus d'énergie a été nécessaire du fait que la chaleur a migré dans cette masse thermique. De plus, la température de surface de la dalle de béton a diminué après des abaissements consécutifs.

1.3.3.2 Condensation

La vapeur d'eau dans l'air, communément appelée humidité, se condense lorsque l'air qui la contient devient saturé. C'est dans cet état dit saturé que l'air atteint son point de rosée. La vapeur d'eau se déplace d'une zone à haute pression vers une zone à basse pression. Pour un bâtiment dans un climat froid, l'humidité est plus élevée à l'intérieur donc, elle se déplace de l'intérieur vers l'extérieur à travers les matériaux de l'enveloppe. La vapeur d'eau se condense lorsqu'elle atteint un matériau froid qui a une température de surface égale ou inférieure à la température de rosée de l'air. Cette condensation diminue l'efficacité de l'isolant et détériore les matériaux qui ont des coefficients de transmission de vapeur d'eau élevés. Une accumulation d'humidité peut créer de la moisissure. L'humidité est fonction de la température. Le simple fait d'abaisser la température augmente le niveau d'humidité relative. Ce phénomène se voit bien à l'aide d'un abaque psychrométrique.

Concernant l'étude sur la maison à Hamilton de Poehlman, Mesher et Meadowcroft (1988), il a été mentionné que le fait d'abaisser la température de consigne rendait plus compliqué le contrôle de l'humidité comparativement à une maison qui est construite de façon moins étanche. L'humidité relative était augmentée d'environ 10 % lorsque la température de l'air intérieur avait diminué de 5 °C. De plus, de la condensation a été observée sur les fenêtres à double vitrage, et de la moisissure est apparue sur les rebords en bois des fenêtres. Il est à mentionner que cette maison était occupée par des humains, ce qui peut faire augmenter le taux d'humidité. Dans le cas de la maison du CCTR (Manning et al., 2005), de la condensation risque de se produire sur le dormant de la fenêtre. En effet, la température minimum intérieure a atteint sur le dormant -7,81 °C avec un abaissement de la température à 16 °C. Dans cette condition, de la condensation se produit avec une humidité relative au-dessus de 13 % avec une température de l'air à 22 °C, ou de 19 % à 16 °C. De même, dans la maison référence, de la condensation est possible avec une humidité relative au-dessus de 22 %. Sans habitant, le taux d'humidité relative était environ de 10 % dans les maisons. Le risque de condensation a aussi été étudié sur les murs des fondations de la maison référence du CCTR puisqu'il n'y a pas de pare-vapeur et que les températures de surface intérieure du béton étaient peu élevées

(Armstrong, 2011). En hiver, aucune condensation n'a été rapportée à cause du faible taux d'humidité. Cependant, un taux d'humidité légèrement plus élevé ainsi que l'absence de pare-vapeur peuvent créer de la condensation sur la surface froide du béton. L'étude d'Armstrong (2011) démontre qu'il est nécessaire d'installer un pare-vapeur de façon continue sur la face intérieure de l'isolant pour diminuer le risque de condensation. Ainsi, la vapeur d'eau présente dans l'air intérieur ne pénétrera pas dans le mur pour atteindre la surface froide du béton.

1.3.3.3 Stratification thermique de l'air

Le déplacement de la chaleur du bas vers le haut constitue la stratification thermique de l'air. Ce déplacement est dû à une différence de la densité de l'air appelée effet de cheminée. La densité de l'air dépend de la pression barométrique locale, de la température et du taux d'humidité. De plus, la chaleur se déplace du chaud au froid.

En général, la température ambiante au RDC était plus élevée qu'au deuxième étage dans les maisons du CCTR (Manning et al., 2005). À l'exception des journées ensoleillées où la température de l'air était plus élevée à l'étage. Ceci peut provenir du fait que le thermostat central est situé au RDC. Donc, les autres étages sont en quelque sorte dépendants du RDC. Cependant, les différences entre les températures minimums de l'air des deux maisons (référence et test) se sont avérées plus petites à l'étage qu'au RDC pendant les abaissements de la température. Pour ce qui est du sous-sol, les températures ambiantes étaient plus basses que celles des autres étages. Ces observations concernant le sous-sol et l'étage concordent avec l'effet de stratification thermique. Dans la maison test du LTE, l'effet de la stratification thermique a prolongé le temps d'arrêt des plinthes électriques et a diminué le temps de récupération au deuxième étage (Jacquet, Le Bel et Monfet, 2017). Par comparaison avec le RDC, les résultats étaient moins bons puisque la chaleur a migré vers l'étage supérieur. De même au sous-sol, le temps de récupération était plus élevé. Au sous-sol et au RDC, les occupants peuvent ressentir de l'inconfort.

Les simulations énergétiques des bâtiments sont souvent modélisées avec des zones thermiques uniques. Ainsi, le flux de chaleur interzonal est négligé. Dans leur étude, Fournier et Leduc (2014) ont analysé, à l'aide des données in situ, le transfert de chaleur entre des pièces ayant différentes températures de consigne des thermostats. Au deuxième étage des MEEB du LTE, deux pièces avaient la même température de consigne constante de 21 °C. Ensuite, les deux autres étaient programmées à 18 °C durant les heures de pointe (6 h à 9 h et 16 h à 20 h). Les portes des quatre pièces à l'étage de la maison 1 étaient fermées tandis que celles de la maison 2 étaient ouvertes. Il a été démontré que le transfert de chaleur était présent entre les pièces avec différentes températures de consigne. Malgré cela, les économies d'énergie ont été négligeables avec des températures extérieures basses puisqu'il y a toujours des pertes de chaleur à travers l'enveloppe. Ce qui implique qu'il n'est pas nécessaire, dans les simulations énergétiques, d'inclure le transfert de chaleur des flux d'air entre les zones. Cependant, le confort thermique pourrait être diminué puisque le transfert de chaleur crée des asymétries de la température de l'air. Donc, pour une analyse du confort thermique avec des simulations, il est requis d'utiliser un modèle avec un flux de chaleur interzonal.

1.4 Synthèse

La revue de la littérature a révélé que peu d'études ont été réalisées sur l'impact, en climat froid, des abaissements de la température sur le confort thermique. De plus, elles se sont surtout intéressées aux économies d'énergie et à la diminution de la pointe de la demande en mode chauffage. Cependant, le confort thermique n'a pas été évalué en sachant qu'il peut très bien être affecté par ces abaissements. Selon le modèle d'évaluation de l'ASHRAE 55-2013, les six facteurs de confort doivent être en équilibre thermique. Cependant, lors de la reprise de la température de consigne à la suite d'abaissements, ces facteurs ne sont plus en équilibre thermique. L'évaluation du confort thermique lors des scénarios d'abaissement n'est pas normalisée. De plus, l'évaluation du confort avec le modèle de Fanger (1972) a démontré que les occupants ont accepté des intervalles de confort plus grands que ceux prévus (PMV-PPD). Aussi, les plages acceptables des indices PMV et PDD sont agrandies afin de s'adapter aux conditions intérieures et des occupants (Leduc, Daoud et Le Bel, 2011) et (Zhang et al., 2017).

Cela laisse place à un questionnement sur les méthodes utilisées pour l'évaluation du confort thermique à savoir si elles représentent réellement ce qu'un occupant attend d'un environnement thermique acceptable.

La majorité des études sur l'évaluation du confort thermique ont été réalisées en climat chaud. L'objectif de diminuer la consommation d'énergie est aussi de mise comme le refroidissement par la ventilation naturelle, l'ajout de cycles de la température, etc. Somme toute, il existe peu de comparatifs permettant d'évaluer le confort thermique en climat froid, notamment lorsque sont instaurées des scénarios d'abaissement de la température de consigne.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DES MAISONS D'EXPÉRIMENTATION EN ÉNERGÉTIQUE DU BÂTIMENT (MEEB)

2.1 Présentation des bancs d'essais

Les données mesurées ont été colligées dans les maisons d'expérimentation en énergétique du bâtiment (MEEB) du Laboratoire des Technologies de l'Énergie (LTE) d'Hydro-Québec. Les maisons jumelles (Figure 2.1), toutes à l'électricité, sont situées à Shawinigan, au Québec, Canada. Le climat de cette ville est de type tempéré froid avec un nombre de degrés-jours de chauffage de 5000 basé sur 18 °C.



Figure 2.1 : MEEB
Tiré du site des MEEB ([s.d.])

Les maisons sont de construction à ossature légère en bois et isolées avec de la laine minérale avec des résistances thermiques de 3,52 m² K/W et de 5,28 m² K/W pour les murs et le toit respectivement. Les dimensions des maisons sont de 7,62 m sur 7,92 m. Deux types de revêtements extérieurs sont installés, soit du déclin de vinyle et de la brique. Chaque maison comporte deux étages, un sous-sol (SS) habitable (comprenant deux pièces) et un garage isolé (attenant à la maison). Les pièces au rez-de-chaussée (RDC) sont : la cuisine, la salle à manger,

le salon et la salle d'eau; à l'étage, il y a une salle de bain et trois chambres à coucher. Le Tableau 2.1 présente les abréviations des pièces de la maison.

Tableau 2.1 : Abréviations des noms des pièces

Étage	Abréviation	Pièce	Numéro figure
Sous-sol	SS2	Sous-sol 2 (côté chauffe-eau), mur longitudinal situé à côté du garage.	Figure 2.2 a)
	SS1	Sous-sol 1 (côté VRC), mur longitudinal donnant sur l'extérieur.	
	CU	Cuisine	
RDC	SM	Salle à manger	Figure 2.2 b)
	SA	Salon	
	SE	Salle d'eau	
	SB	Salle de bain	
Étage	C1	Chambre 1	Figure 2.2 c)
	C2	Chambre 2	
	C3	Chambre 3	

Les pièces sont chauffées par des plinthes électriques, contrôlées localement par des thermostats électroniques. Les portes sont fermées, ce qui permet de limiter les infiltrations d'air ou les interactions entre les zones. Les fenêtres sont munies de stores, tenus fermés, permettant ainsi de limiter les gains solaires dans les maisons. De plus, les fenêtres au sud sont dotées d'une feuille d'aluminium.

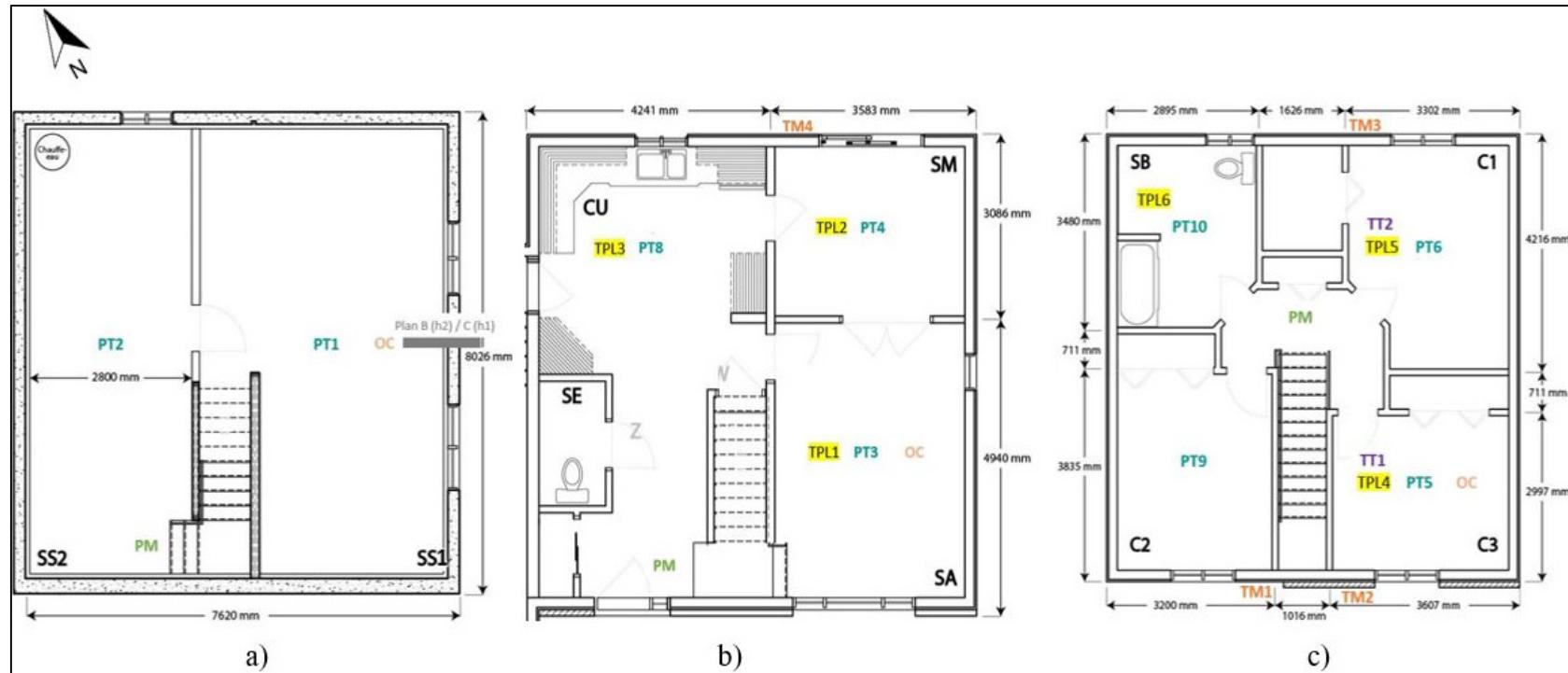


Figure 2.2 : Vue en plan avec les points de mesures — a) sous-sol, b) RDC et c) étage

2.2 Données colligées

Chaque maison est équipée d'environ 500 points de mesures enregistrées toutes les 15 minutes.

La Figure 2.2 présente l'emplacement, dans chaque pièce au sous-sol, au RDC et à l'étage, des principaux points de mesures utilisés pour l'analyse du confort thermique. En outre, ces emplacements sont décrits en ANNEXE I dans le Tableau-A I-1. Dans le nom des points de mesures, les maisons sont identifiées par « h » (*house*). Les points de mesures dans la fondation au sous-sol sont identifiés par « P » (plan). Les thermocouples identifiés par PTx (température de l'air ambiant) sont installés sur une perche verticale placée au centre des pièces (voir Figure 2.3). Les données sélectionnées pour l'analyse sont prises sur les maisons et sur des imitations d'occupants.

2.2.1 Données des maisons

Les Tableau 2.2 et Tableau 2.3 présentent la composition des assemblages extérieurs et intérieurs de l'enveloppe avec les thermocouples appropriés. Aussi, les caractéristiques des assemblages sont données. Au sous-sol, les températures de surface ont été collectées sur le mur de fondation, le plancher et le plafond. Ensuite, au RDC et à l'étage, les assemblages observés pour l'analyse des températures sont les murs extérieurs, les planchers et les plafonds.

Les mesures qui ont été prises sur les maisons et qui ont servi à l'analyse sont les suivantes :

- La température de l'air a été mesurée au centre des pièces en cinq points de mesures à des hauteurs différentes. Les thermocouples sont installés sur une perche verticale;
- La température radiative a été mesurée à l'intérieur d'une sphère noire. Elle est située au centre de la perche verticale;
- La température de surface intérieure du mur extérieur a été mesurée dans quatre pièces (trois à l'étage et une au RDC). Le thermocouple est installé sur la surface intérieure de la plaque de plâtre;
- La température de surface intérieure du mur de fondation a été mesurée dans une pièce du sous-sol en cinq points de mesures à des hauteurs différentes. Les thermocouples sont installés sur la surface intérieure de la plaque de plâtre;

- La température de surface du plancher a été mesurée dans six pièces (trois à l'étage et trois au RDC). Le thermocouple est installé sur la surface du plancher, qui est partout en contreplaqué, sauf dans la salle de bain et la cuisine où la surface du plancher est en céramique;
- La température de surface de la dalle (plancher sous-sol) a été mesurée dans une pièce du sous-sol en trois points de mesures différents. Les thermocouples sont installés sur la surface du plancher en béton;
- La température de surface du plafond a été mesurée dans six pièces (deux à l'étage, trois au RDC et une au sous-sol). Le thermocouple est installé sur la surface intérieure de la plaque de plâtre (sauf au sous-sol où il est installé sur le contreplaqué du plancher du RDC);
- L'humidité de l'air a été mesurée sur chaque étage. La sonde est installée sur la perche mobile qui est située devant les cages d'escalier;
- La vitesse de l'air a été mesurée sur chaque étage. La sonde est installée sur la perche mobile qui est située devant les cages d'escalier.

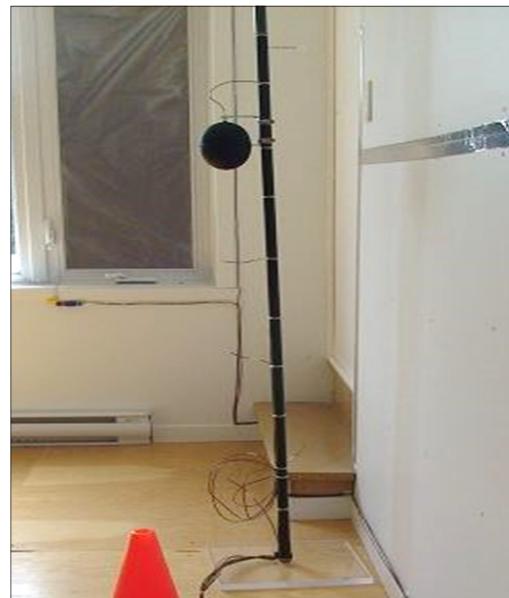


Figure 2.3 : Perche verticale
Tiré du site des MEEB ([s.d.])

2.2.2 Données des occupants

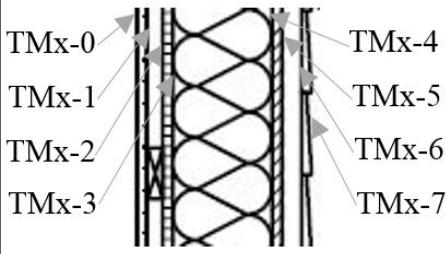
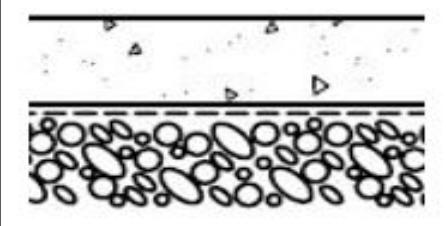
Dans chacune des maisons, trois occupants sont installés, un à chaque étage, dans les pièces SS1, SA et C3 (identifiés par OC à la Figure 2.2). L'occupant est représenté par une chaise comme montré à la Figure 2.4. Les mesures ont été prises à trois endroits sur l'occupant soit au niveau des chevilles (0,1 m), du torse (0,6 m) et de la tête (1,1 m). Les mesures qui ont été prises sur les occupants et qui ont servi à l'analyse sont les suivantes :

- La température de l'air a été mesurée aux trois niveaux de l'occupant;
- La température radiative a été mesurée à l'intérieur d'une sphère noire (il y en a une à chaque niveau de l'occupant);
- La vitesse de l'air a été mesurée au niveau de la tête de l'occupant.



Figure 2.4 : Occupants des MEEB
Tiré du site des MEEB ([s.d.])

Tableau 2.2 : Composition des assemblages extérieurs avec les thermocouples

Assemblage	Figure	Description matériau	RSI totale (m ² K/W)
Mur de fondation	Voir Figure 2.7	<ul style="list-style-type: none"> • Plaque de plâtre • Lame d'air intérieure • Film de polyéthylène • Panneau isolant • Béton • Crépi (au-dessus du sol) • Enduit bitumineux • Panneau de drainage • Remblai 	2,28 (au-dessus sol) 2,37 (sol) 0,57 (sol non isolé)
Mur extérieur	 Figure 2.5 : Mur extérieur avec les thermocouples	<ul style="list-style-type: none"> • Plaque de plâtre • Lame d'air intérieure • Film de polyéthylène • Panneau isolant • Laine minérale • Panneau de carton fibre • Pare-air • Lame d'air extérieure • Vinyle/brique 	4,91 (Vinyle) 4,86 (Brique)
Plancher sous-sol	 Figure 2.6 : Plancher du sous-sol	<ul style="list-style-type: none"> • Dalle de béton • Membrane d'imperméabilisation • Pierre concassée • Membrane géotextile • Sol non remanié 	0,09

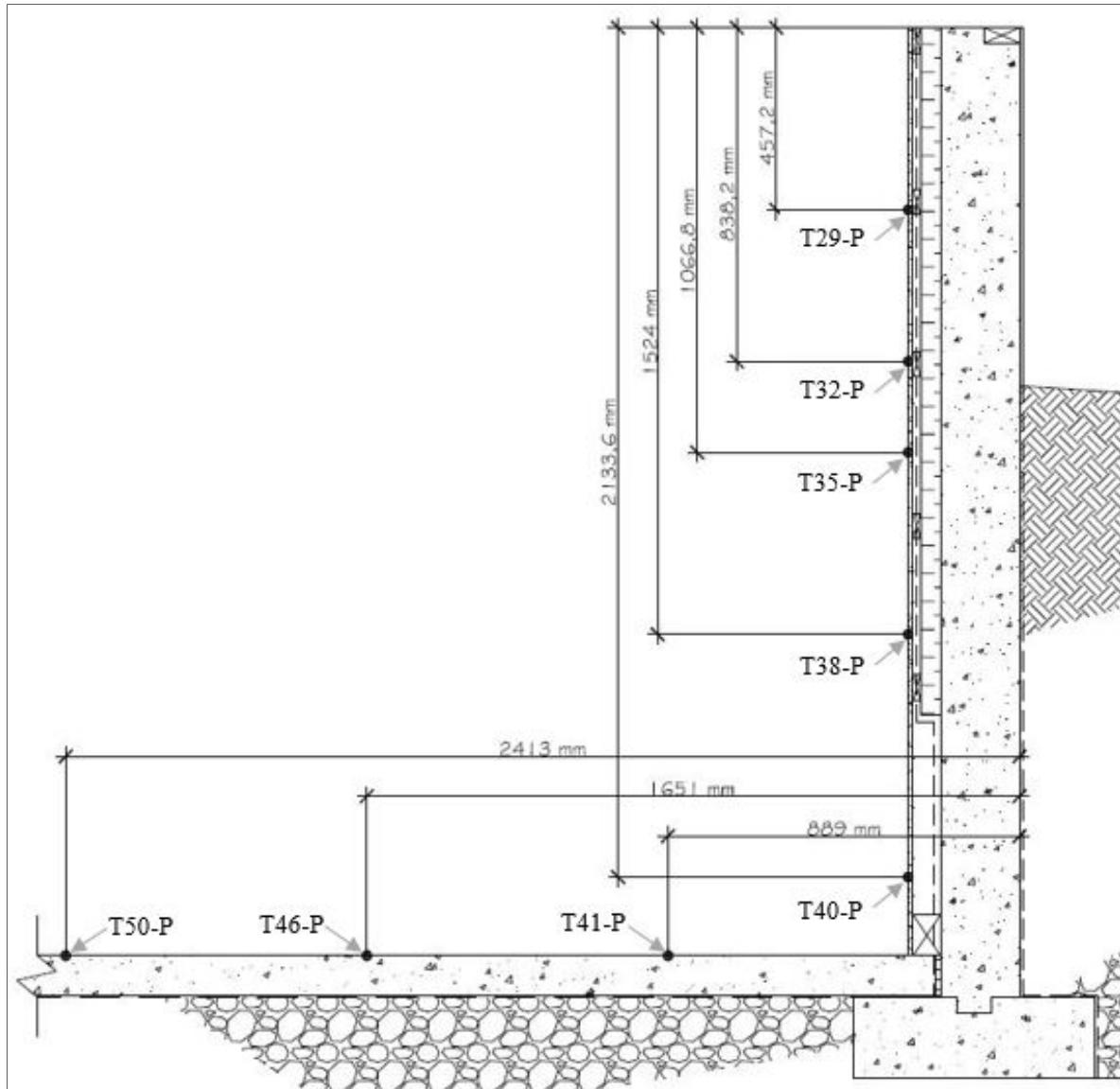
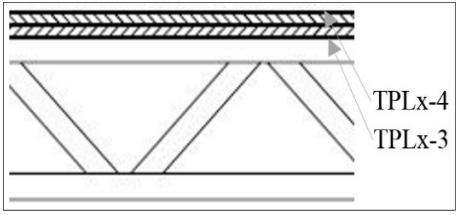
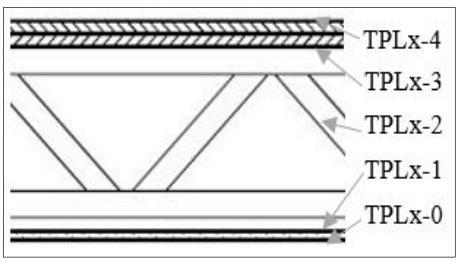
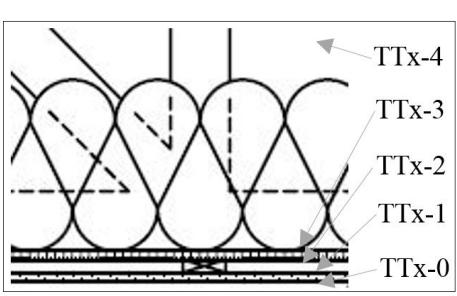


Figure 2.7 : Mur de fondation et du plancher du sous-sol (dalle de béton) avec les thermocouples

Tableau 2.3 : Composition des assemblages intérieurs avec les thermocouples

Assemblage	Figure	Description matériau	RSI totale (m ² K/W)
Plancher RDC	 Figure 2.8 : Plancher du RDC avec les thermocouples	<ul style="list-style-type: none"> Solives ajourées (air) Contreplaqué Contreplaqué verni ou câble chauffant et ciment (CU) Céramique (CU) 	0,34 0,28 (CU)
Plancher étage	 Figure 2.9 : Plancher de l'étage avec les thermocouples	<ul style="list-style-type: none"> Plaque de plâtre Lame d'air Solives ajourées (air) Contreplaqué Contreplaqué verni ou câble chauffant et ciment (SB) Céramique (SB) 	0,419 0,36 (SB)
Plafond étage (toit)	 Figure 2.10 : Plafond de l'étage avec les thermocouples	<ul style="list-style-type: none"> Plaque de plâtre Lame d'air intérieure Film de polyéthylène Panneau isolant Laine minérale Fermes de toit (air) Contreplaqué Papier-feutre Bardeau d'asphalte 	6,39

Ces maisons jumelles expérimentales sont utilisées comme bancs d'essais dans le cadre de la présente étude, car ils permettent d'avoir une vue d'ensemble de l'effet d'abaissements de la température aux thermostats en mode chauffage sur le confort thermique des occupants.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Dans la présente étude, le confort thermique a été évalué à la suite d'abaissements de la température aux thermostats en fonction des critères de confort et du modèle de Fanger (1972), c'est-à-dire les indices PMV (vote moyen prévisible) et PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits). Deux types de données sont utilisées soit celles mesurées in situ dans les maisons d'expérimentation en énergétique du bâtiment (MEEB) et celles obtenues par des simulations en mode dynamique réalisées avec le programme EnergyPlus. La Figure 3.1 présente les données utilisées par méthode d'évaluation.

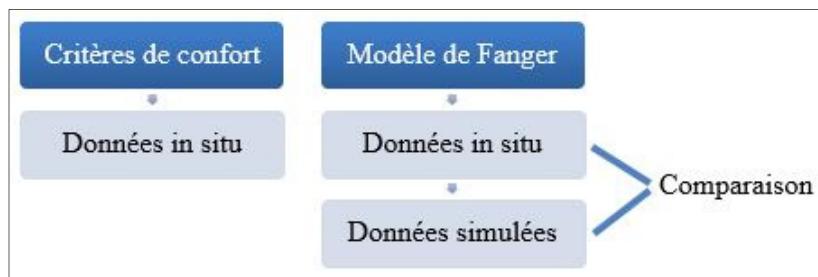


Figure 3.1 : Évaluation du confort en fonction des données

3.1 Préparation des données

Les données mesurées des MEEB ont été manipulées à l'aide du chiffrier Excel et de VBA (*Visual Basic for Applications*) qui ont aussi été utilisés pour effectuer les calculs à partir des données mesurées. Les données ont été regroupées par critères d'évaluation. En outre, le logiciel Statgraphics, outil d'analyse statistique et graphique, a été utilisé pour observer des tendances et des liaisons entre différentes données.

3.2 Période d'analyse des résultats

Les scénarios d'abaissements de la température de consigne aux thermostats sont soit de nuit entre 22 h et 6 h, soit de jour entre 8 h et 16 h et, soit combinés entre 22 h et 6 h et entre 8 h et

16 h. La température de consigne est de 21 °C alors que la température d'abaissement est de 17 °C. Les résultats ont été colligés, lors de la reprise de la température de consigne de 21 °C, entre 6 h et 22 h après un abaissement de nuit, entre 16 h et 8 h après un abaissement de jour, ainsi qu'entre 16 h et 22 h et entre 6 h et 8 h après un abaissement combiné. Le Tableau 3.1 résume les périodes d'abaissement ainsi que les périodes d'analyses.

Tableau 3.1 : Période d'abaissement et d'analyse des résultats

Type d'abaissement	Période d'abaissement	Période d'analyse
Nuit	22:00 à 6:00	6:00 à 22:00
Jour	8:00 à 16:00	16:00 à 8:00
Combiné	22:00 à 6:00 et 8:00 à 16:00	6:00 à 8:00 et 16:00 à 22:00

Cinq essais avec des abaissements de la température ont été retenus pour l'analyse. Les scénarios d'abaissements sont réalisés dans une maison, nommée la maison test, pendant que l'autre maison, nommée la maison référence, est maintenue à une température constante de 21 °C. Cependant, pour le cinquième essai, les deux maisons ont eu des abaissements en même temps. Dans ce cas, aucune des deux maisons ne peut être considérée comme la maison référence ou test, mais elles peuvent toutefois être comparées. L'une avait les fenêtres couvertes pour limiter les gains solaires à l'intérieur (maison 1) et est nommée essai 5.1. Tandis que l'autre avait les fenêtres dégagées (maison 2) et est considérée comme l'essai 5.2. Le Tableau 3.2 résume les cinq essais et les informations suivantes y sont données : le numéro de l'essai, la plage d'étude, le numéro de la maison test, la date et l'heure de la période d'analyse ainsi que le type d'abaissement qui l'a précédée.

Tableau 3.2 : Résumé des cinq essais avec la période d'analyse

Numéro essai	Plage d'étude	Maison test	Type abaissement	Date et heure d'analyse
1	2014-02-08 au 12	2	Nuit	2014-02-09 6:00 à 22:00
			Nuit	2014-02-10 6:00 à 22:00
			Nuit	2014-02-11 6:00 à 22:00
			Nuit	2014-02-12 6:00 à 12:00
2	2014-02-13 au 17	1	Nuit	2014-02-14 6:00 à 22:00
			Nuit	2014-02-15 6:00 à 22:00
			Nuit	2014-02-16 6:00 à 22:00
			Nuit	2014-02-17 6:00 à 22:00
3	2015-02-15 au 18	1	Jour	2015-02-15 16:00 à 16 8:00
			Jour	2015-02-16 16:00 à 17 8:00
			Jour	2015-02-17 16:00 à 18 8:00
4	2015-02-20 au 23	1	Combiné	Jour 2015-02-20 16:00 à 22:00
			Combiné	Nuit 2015-02-21 6:00 à 8:00
			Combiné	Jour 2015-02-21 16:00 à 22:00
			Combiné	Nuit 2015-02-22 6:00 à 8:00
			Combiné	Jour 2015-02-22 16:00 à 22:00
			Combiné	Nuit 2015-02-23 6:00 à 8:00
5.1 et 5.2	2016-02-28 au 03-03	1 et 2	Combiné	Jour 2016-02-28 16:00 à 22:00
			Combiné	Nuit 2016-02-29 6:00 à 8:00
			Combiné	Jour 2016-02-29 16:00 à 22:00
			Combiné	Nuit 2016-03-01 6:00 à 8:00
			Combiné	Jour 2016-03-01 16:00 à 22:00
			Combiné	Nuit 2016-03-02 6:00 à 8:00
			Combiné	Jour 2016-03-02 16:00 à 22:00
			Combiné	Nuit 2016-03-03 6:00 à 8:00

3.3 Évaluation du confort thermique in situ

L'évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements s'est faite selon deux approches. La première était basée sur les critères de confort thermique et la deuxième sur le modèle de Fanger. Toutes les journées avec des abaissements ont été analysées individuellement. Ensuite, pour chaque journée avec les mêmes types d'abaissements, (de nuit, de jour, combinés de nuit et combinés de jour) une moyenne a été faite pour les résultats minimums, moyens et maximums. Cela a permis d'établir une tendance générale des résultats à la suite d'un même type d'abaissement. De plus, d'autres facteurs ayant une influence sur le confort thermique ont été analysés, lesquels sont :

- 1) le temps de récupération,
- 2) les conditions extérieures,
- 3) l'orientation cardinale des pièces,
- 4) la stratification thermique entre les étages,
- 5) les propriétés des matériaux.

3.3.1 Critères de confort thermique calculés

Les données mesurées in situ obtenues lors des essais (Tableau 3.2) ont été évaluées en fonction des critères de confort thermique de l'ASHRAE 55-2013. De plus, des critères de l'ASHRAE Fundamentals (2013) et de Ching, Adams et Saint-Pierre (adapt.) (2001 c2003) ont été retenus et sont présentés dans la section 1.1. Le Tableau 3.3 et le Tableau 3.4 résume les critères de confort concernant les conditions de l'occupant et les conditions thermiques intérieures. Les données mesurées ont été colligées sur les trois occupants (Figure 2.4). Aussi, des pièces supplémentaires ont été utilisées aux fins de vérification des critères de confort relatifs aux températures de surface des planchers et aux températures radiantes asymétriques.

Les points de mesures des pièces utilisées par critères de confort sont présentés à l'ANNEXE II, Tableau-A II-1.

Tableau 3.3 : Résumé des conditions de confort de l'occupant

Condition de l'occupant	Valeur
Taux métabolique	1 met
Isolation des vêtements	1 clo (voir note a))

Note :

- a) En général, les occupants portent moins de 1 clo en hiver. Selon l'article 5.3.4.1.a. de l'ASHRAE 55-2013, l'évaluation du confort thermique s'applique pour moins de 0,7 clo, mais il est possible d'avoir une valeur supérieure (annexe H).

Tableau 3.4 : Résumé des critères du confort thermique

Critère de confort	Zone de confort	Note
Température opératoire (T_o) (voir équation (1.1))	min $\approx 21,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $T_r \geq 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ max $\approx 26,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $T_r \geq 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ min $\approx 19,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $T_r \leq 16,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ max $\approx 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\leq T_r 16,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	a), b), c) et d)
Variation de la température opératoire (T_o) avec le temps	Rampe ou dérive de T_o 0,25 h : 1,1 °C 2 h : 2,8 °C pour une période plus grande que 15 min 0,5 h : 1,7 °C 4 h : 3,3 °C 1 h : 2,2 °C	
Différence verticale de la température de l'air (ΔT_v)	ΔT entre la tête (1,1 m) et les chevilles (0,1 m) $< 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Température de surface du plancher (T_p)	Occupant assis 19 °C à 29 °C	
	Température optimale pour personne sédentaire 25 °C	
Température radiante asymétrique	Plafond plus chaud que le plancher $< 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	e)
	Mur plus froid que l'air $< 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $\leq 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
Courant d'air	$T_o < 22,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $< 0,15 \text{ m/s}$	d)

Notes :

- a) La température moyenne de l'air (T_a) a été calculée à l'aide de l'équation (1.1) avec la moyenne des mesures prises aux trois niveaux sur l'occupant.
- b) En ce qui concerne le calcul de la température moyenne radiante (\bar{T}_r), le diamètre de la sphère noire est de 0,0635 m. La température de la sphère noire (T_g) a été calculée à l'aide de l'équation (1.2) avec la moyenne des mesures prises aux trois niveaux sur l'occupant.
- c) La température de rosée (T_r) a été calculée en fonction de l'humidité relative, la température intérieure et les paramètres de Magnus (C_2 et C_3) comme les définit l'équation suivante :

$$T_r = \frac{C_3 \left(\ln \left(\frac{HR}{100} \right) + \frac{C_2 T_{int}}{C_3 + T_{int}} \right)}{C_2 - \ln \left(\frac{HR}{100} \right) - \frac{C_2 T_{int}}{C_3 + T_{int}}} \quad (3.1)$$

Où,

T_{int} = température intérieure entre -45 °C et 60 °C (°C)

HR = humidité relative (%)

$C_2 = 17,62$

$C_3 = 243,12$ °C

La T_{int} a été mesurée au niveau du torse (0,6 m) d'un occupant.

- d) Le courant d'air et la vitesse moyenne de l'air ont été mesurés au niveau de la tête (1,1 m) puisque c'est la seule mesure de vitesse de l'air disponible sur l'occupant.
- e) Dans le cas d'une asymétrie de la température entre le mur et l'air, celle de l'air est mesurée au centre de la pièce au niveau du torse (0,6 m) d'un occupant.

3.3.2 Modèle de Fanger

Les données mesurées ont été évaluées selon le modèle de Fanger (1972) pour le cinquième essai seulement (Tableau 3.2) puisqu'une des maisons avait les fenêtres dégagées. Toutes les pièces des MEEB ont été analysées individuellement. Cet essai a été sélectionné, car il permet d'observer l'effet du gain solaire sur le confort thermique en termes de PMV et de PPD. Le but était aussi d'évaluer si le calcul du rayonnement solaire en mode simulation dynamique est bien représenté ainsi que son influence sur les calculs de confort thermique. Les démarches pour obtenir le PMV et le PDD avec les données mesurées ainsi qu'à l'aide du programme EnergyPlus sont présentées ci-dessous.

Le PMV et le PPD ont été calculés avec les données mesurées à l'aide d'un programme informatique donné à l'annexe B de l'ASHRAE 55-2013, et il a été adapté pour fonctionner en VBA pour Excel.

Les informations de base nécessaires au calcul du PMV sont données dans le Tableau 3.5 (en lien avec les six facteurs sur le confort thermique). Certaines informations ont une valeur constante (occupant) tandis que d'autres ont varié dans le temps (condition intérieure). Les conditions intérieures représentent les données mesurées des pièces. Ensuite, le PPD est déterminé selon la courbe de la Figure 1.6, c'est-à-dire en fonction de la valeur du PMV.

Tableau 3.5 : Information de base sur le calcul du PMV

Information de base	Donnée mesurée
Isolation des vêtements	Valeur constante : 1 clo
Taux métabolique	Valeur constante : 1 met
Travail externe	Valeur constante : 0 met
Température de l'air (T_a)	Moyenne de la température de l'air à trois niveaux différents prise sur la perche verticale près du plancher (chevilles); à 0,6 m (torse) et à 1,2 m (tête).
Température moyenne radiante (\bar{T}_r)	Calculée avec l'équation (1.2) à l'aide des sphères noires. Pièce : prise sur la perche verticale à 1,2 m. Si non disponible, calculée avec ceux de l'occupant du même étage. Occupant : moyenne des mesures prises à trois niveaux soit à 0,1 m; à 0,6 m et à 1,1 m.
Vitesse relative de l'air	Prise sur la perche mobile du même étage à 2,1 m.
Humidité relative	Prise sur la perche mobile du même étage.

3.4 Simulation énergétique et comparaison des résultats

Dans cette étude, les résultats in situ ont été comparés avec ceux simulés aux fins de l'évaluation du potentiel de ce programme à assister le processus de conception de scénarios d'abaissements de température au niveau du confort thermique. Le modèle des MEEB d'EnergyPlus est téléchargeable sur le site suivant : <https://meeb.ca/>. Le fichier de données météo horaires a été téléchargé sur le site internet SIMEB pour la ville de Trois-Rivières. Ensuite, quelques modifications ont été apportées au modèle permettant d'ajouter les scénarios d'abaissements de la température aux thermostats et de calculer le PMV-PPD à l'aide du modèle de Fanger (1972). La Figure 3.2 présente les modifications apportées selon les catégories et les sous-catégories d'EnergyPlus.

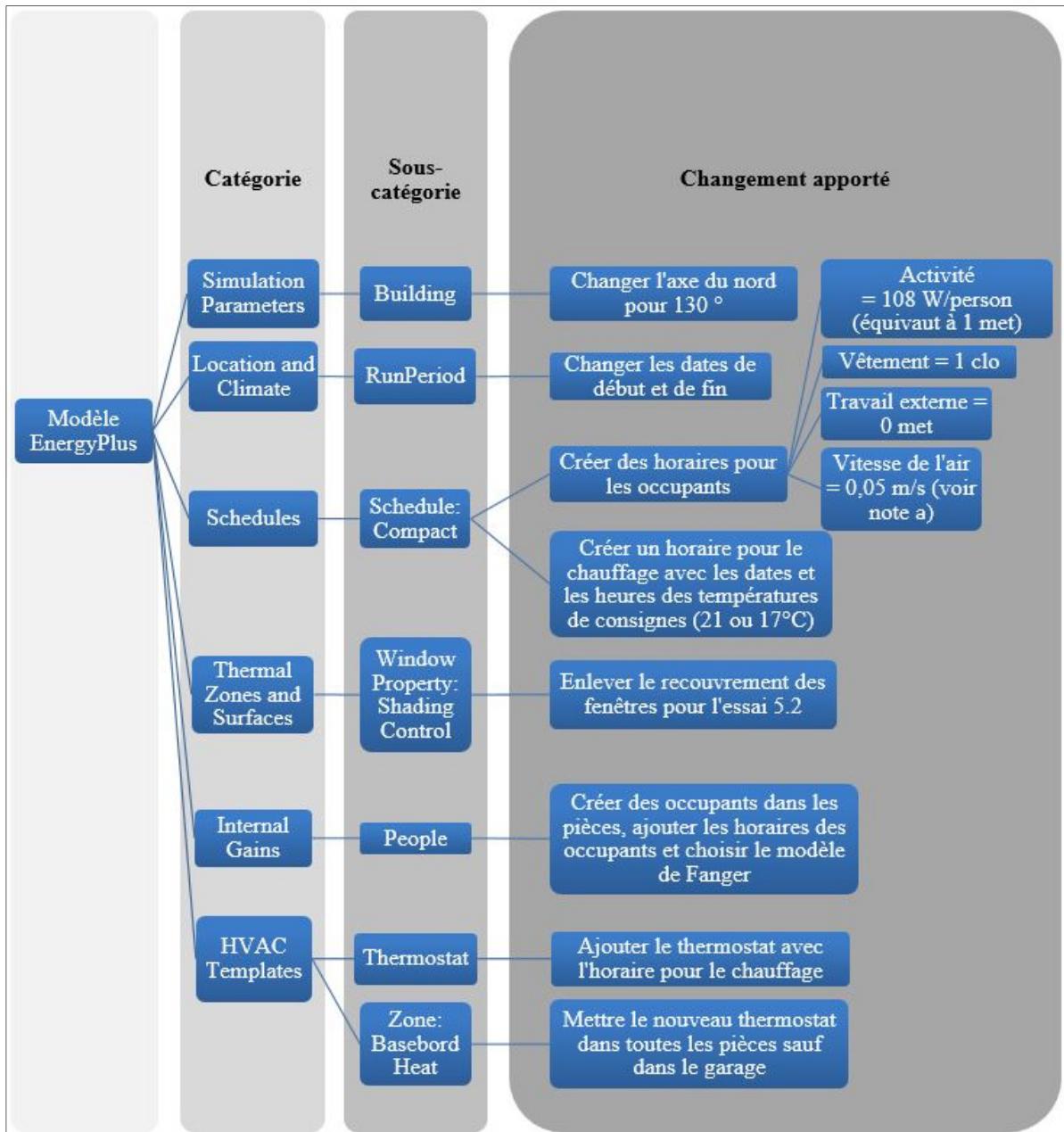


Figure 3.2 : Modifications apportées au modèle des MEEB d'EnergyPlus pour le calcul du PMV-PPD avec des scénarios d'abaissements de la température aux thermostats

Note :

- Une valeur constante a été choisie puisque la vitesse de l'air dans les MEEB est basse et n'affecte pas le confort thermique.

Il a été constaté que l'orientation géographique du bâtiment modélisé par rapport au nord n'était pas bien positionnée. Dans la Figure 3.3, il est possible de voir l'orientation du modèle original en comparaison avec une image prise sur Google maps des MEEB. La ligne jaune représente l'axe du nord qui fait par rapport au bâtiment modélisé un angle de 20 ° qui a été entré dans EnergyPlus. L'axe vert indique le nord sur Google maps qui fait un angle d'environ 130 ° par rapport aux bâtiments. Dans la Figure 3.4, un axe du nord de 130 ° a été entré dans EnergyPlus. Dans le cadre de cette étude, l'axe du nord choisi par rapport aux bâtiments a été de 130 °.¹



Figure 3.3 : Orientation géographique du modèle original

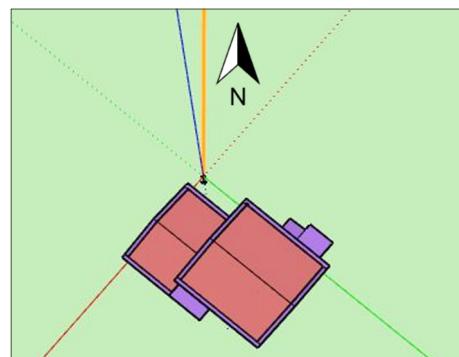


Figure 3.4 : Axe du nord de 130 ° par rapport au bâtiment

Les comparaisons entre les résultats calculés et simulés portent sur les paramètres suivants :

- 1) les indices PMV et PPD,
- 2) le temps de récupération,
- 3) la consommation de chauffage,
- 4) les températures de surface intérieure,
- 5) la température de l'air intérieur.

¹Cette hypothèse n'est peut-être pas la solution au problème puisque le modèle n'est pas calibré. Comme mentionné sur le site internet des MEEB, quelques améliorations sont nécessaires comme :

[le] calcul du rayonnement solaire direct normal et diffus horizontal, [la] définition des zones, [l']ajustements des propriétés des matériaux, des infiltrations ou de l'interaction entre zones voisines ouvertes, améliorer l'évaluation du transfert de chaleur par les murs de fondation et la dalle, explorer les réglages de la simulation. (<https://meeb.ca/fr/models-fr/>)

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET ANALYSES

Plusieurs facteurs peuvent entrer en jeu dans le maintien du confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment. Pour être en mesure d'optimiser le confort thermique, il est nécessaire de savoir comment l'enveloppe du bâtiment réagit à l'environnement qui l'entoure. De façon plus globale, les conditions extérieures affectent en premier lieu l'enveloppe du bâtiment, viennent ensuite les conditions intérieures. La Figure 4.1 présente ces facteurs.

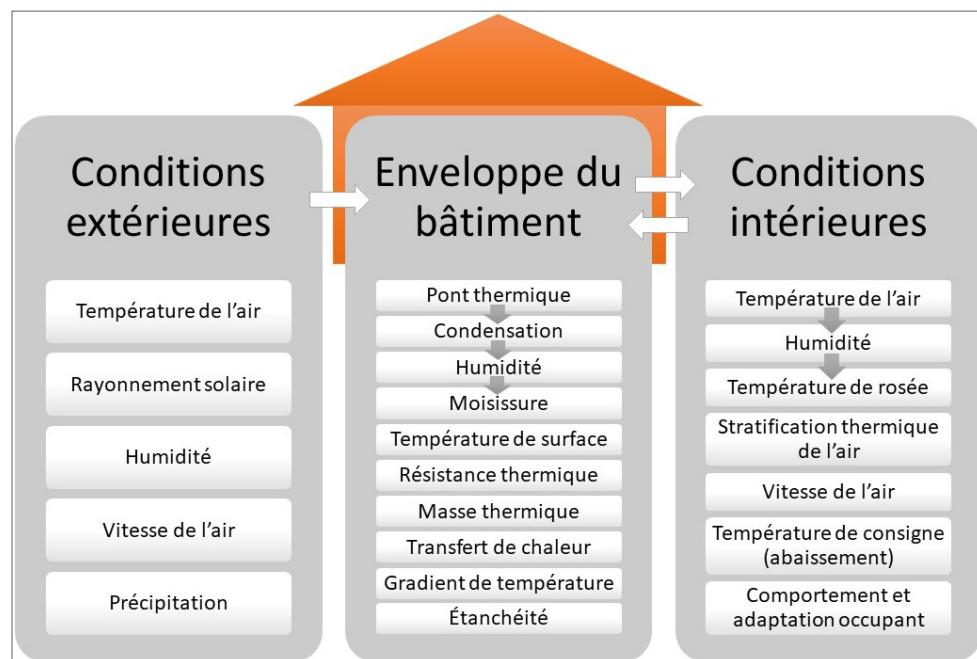


Figure 4.1 : Facteurs sur le maintien du confort thermique

Premièrement, est abordé l'effet de l'environnement extérieur sur les maisons d'expérimentation en énergétique du bâtiment (MMEB). Deuxièmement, le confort thermique est évalué selon les critères basés sur les conditions environnementales intérieures à l'aide des données mesurées in situ. Troisièmement, le confort thermique est aussi évalué en fonction du modèle de Fanger (1972) avec les données mesurées in situ et simulées de l'essai 5. Enfin, les

résultats obtenus avec ce modèle sont comparés aux fins de la quantification des différences entre ces deux types de données.

4.1 Environnement extérieur

L'environnement extérieur a une importante influence sur l'environnement intérieur. Une mise en contexte des MEEB par rapport à leur environnement extérieur permet de mieux interpréter les résultats sur le confort thermique à l'intérieur des maisons. Trois facteurs environnementaux qui affectent le confort thermique, sont discutés ci-dessous : la localisation géographique, la température extérieure et le rayonnement solaire.

La localisation géographique des MEEB a permis de connaître la trajectoire du soleil quotidien et les pièces qui en bénéficient. Les dates étudiées (Tableau 3.2) couvrent la période du 8 février au 3 mars des années 2014 à 2016. Dans le Tableau 4.1, les heures du lever et du coucher du soleil à Shawinigan sont données approximativement pour la date de début et la date de fin de cette période. En observant les Figure 4.2 et Figure 4.3, il est possible d'identifier que les pièces SS2 (sous-sol 2), CU (cuisine), SM (salle à manger), SB (salle de bain) et C1 (chambre 1) reçoivent un gain solaire tôt le matin seulement à travers les fenêtres. Tandis que les pièces SS1 (sous-sol 1), hall d'entrée-CU, SA (salon), C2 (chambre 2) et C3 (chambre 3) en reçoivent une bonne partie de la journée.

Tableau 4.1 : Heure du lever et du coucher du soleil

Date	Lever	Coucher
8 février	7:10	17:00
3 mars	6:30	17:35

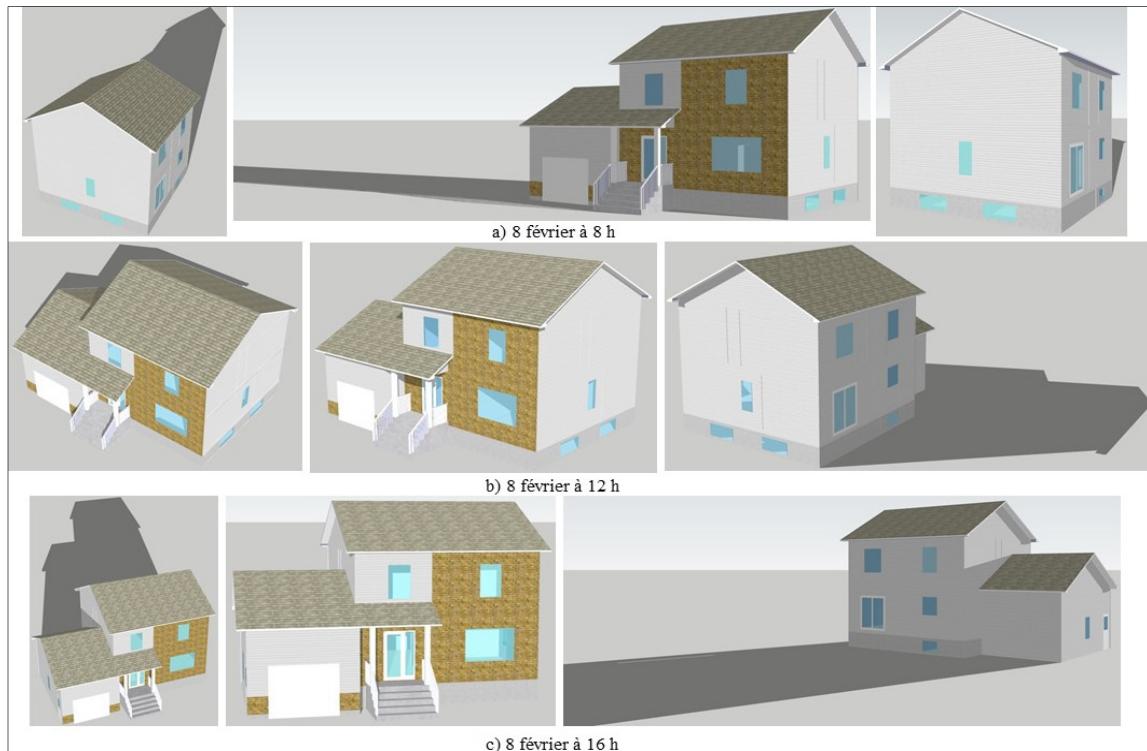


Figure 4.2 : Positions du soleil le 8 février — a) 8 h b) 12 h et c) 16 h



Figure 4.3 : Positions du soleil le 3 mars — a) 8 h b) 12 h et c) 16 h

La Figure 4.4 présente la température extérieure (M-TSEC), le rayonnement solaire horizontal (M-RS-THOR) et vertical (M-RS-TVER) ainsi que la température de consigne (Tconsigne) programmée des thermostats de la maison test pour les cinq essais étudiés (Tableau 3.2).

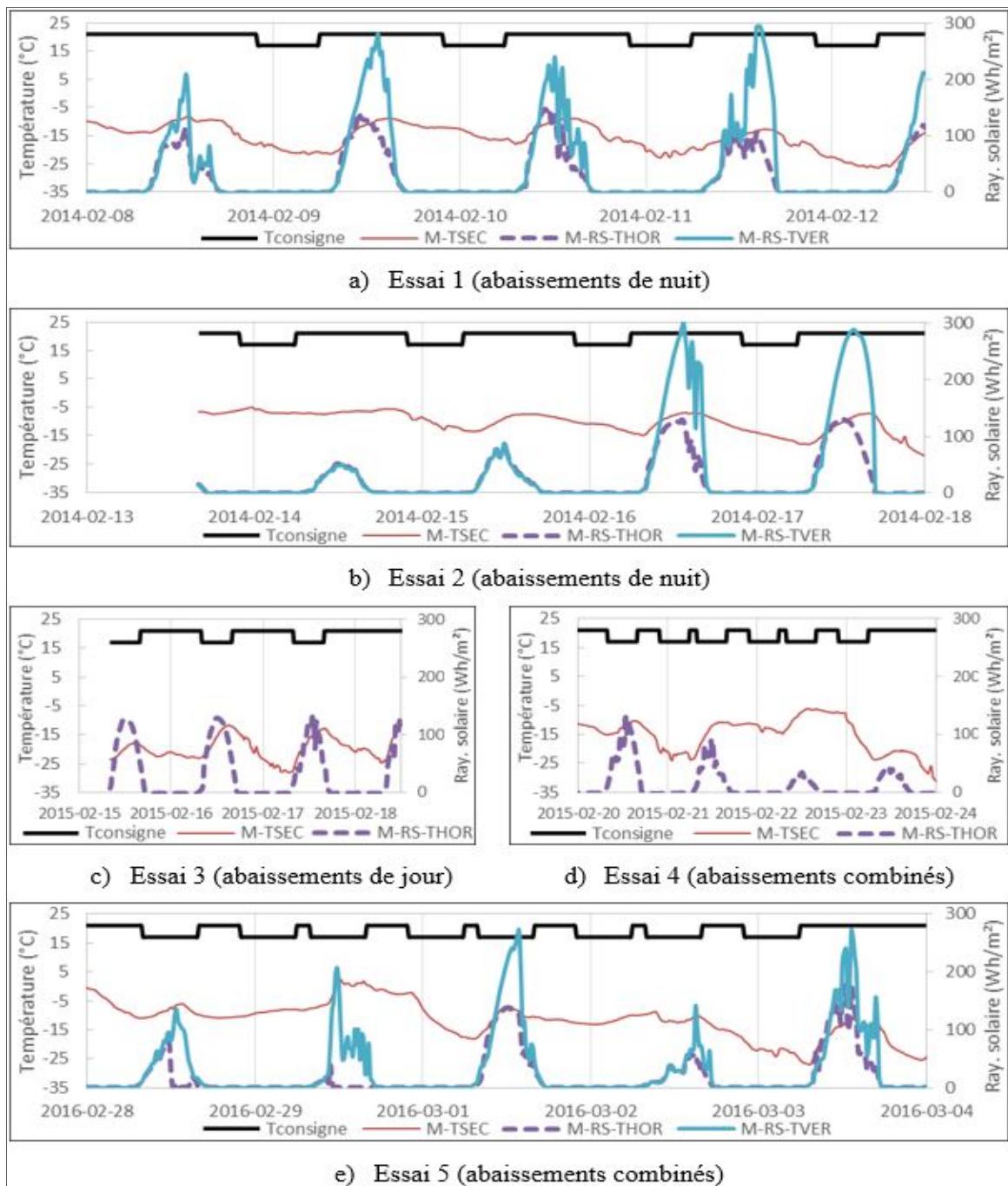


Figure 4.4 : Conditions extérieures et la température de consigne des thermostats lors des cinq essais

La température extérieure, le rayonnement solaire et l'orientation géographique ont influé sur la consommation de chauffage et le gradient de température dans l'enveloppe du bâtiment. Les pièces au sud et à l'ouest sont plus affectées par le rayonnement solaire; celles au nord et à l'est par la température extérieure. Il est possible de le constater avec la matrice de nuages de points illustrée à la Figure 4.5 qui compare la consommation de chauffage de chaque pièce avec la température extérieure et le rayonnement solaire pour la maison référence de l'essai 2.² L'encadré du haut représente la consommation de chauffage des pièces situées au nord et à l'est; dans l'encadré du bas, celle des pièces situées au sud et à l'ouest. Il est possible de voir que les tendances étaient similaires dans l'encadré du haut comparativement à celui du bas. La consommation de chauffage était plus constante dans ces pièces, car elles n'ont pas de surplus de gain de chaleur provenant du rayonnement solaire. À titre d'exemple, les Figure 4.6 et Figure 4.7 illustrent la consommation de chauffage du SA (sud) et de la SB (nord) en comparaison avec a) le rayonnement solaire et b) la température extérieure.

En ce qui concerne le gradient de température dans l'enveloppe du bâtiment, la façade est composée de deux revêtements extérieurs ayant des propriétés thermiques différentes, soit de la brique et du vinyle. La brique a une capacité thermique plus élevée (masse volumique de 2 474 kg/m³). Elle emmagasine la chaleur provenant du rayonnement solaire pour ainsi la diffuser lorsque la température diminue. Par exemple, pour l'essai 3 (Figure 4.8), il est possible de voir que la température du mur de brique du côté extérieur a atteint des températures plus élevées que le mur de vinyle. Celui-ci a réagi instantanément aux variations du rayonnement solaire le jour et de la température extérieure la nuit. De plus, la quantité de chaleur absorbée par la brique dépendait de la quantité du flux et de la constance du rayonnement solaire. Cette chaleur emmagasinée s'est propagée du côté intérieur du mur avec un délai d'environ 3 h avec un abaissement de jour (voir Figure 4.9). Les pièces qui ont un revêtement extérieur en brique sont le hall d'entrée, le SA et la C3.

² Les données de la maison référence sont présentées, car les relations entre la consommation de chauffage des pièces et les conditions extérieures y sont plus prononcées que celles de la maison test à cause des périodes d'abaissements.

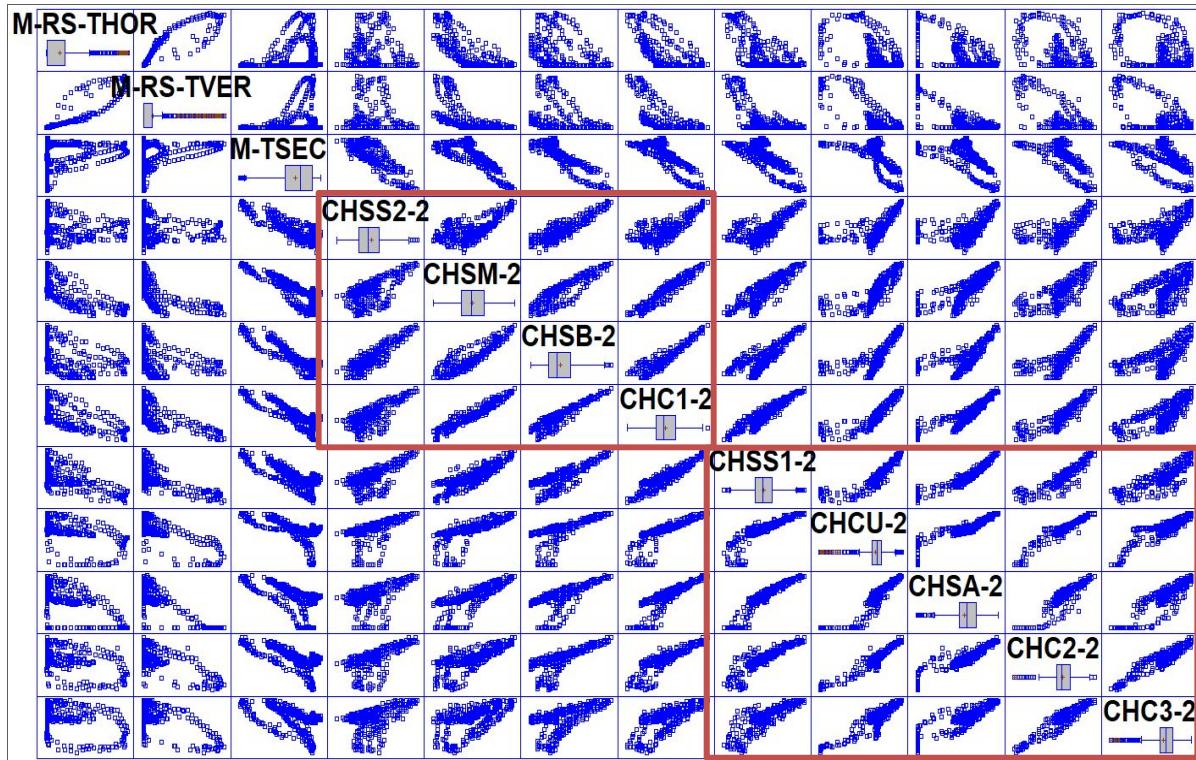


Figure 4.5 : Comparaison de la consommation de chauffage (Wh) des pièces avec la température extérieure ($^{\circ}\text{C}$) et le rayonnement solaire horizontal et vertical (Wh/m^2)³
(maison référence – essai 2)

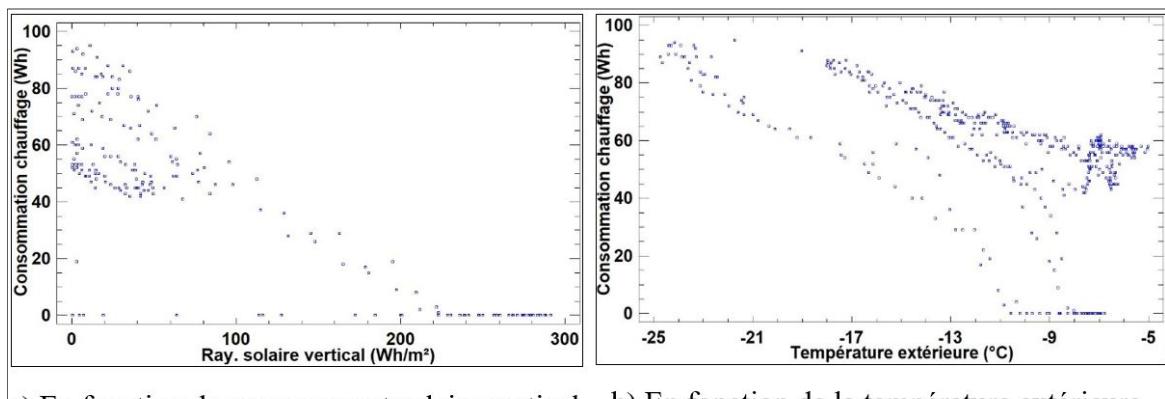


Figure 4.6 : Comparaison de la consommation de chauffage au salon
(maison référence – essai 2)

³ M-RS-THOR : rayonnement solaire horizontal, M-RS-TVER : rayonnement solaire vertical, M-TSEC : température extérieure et CHX-2 : consommation de chauffage des plinthes électriques

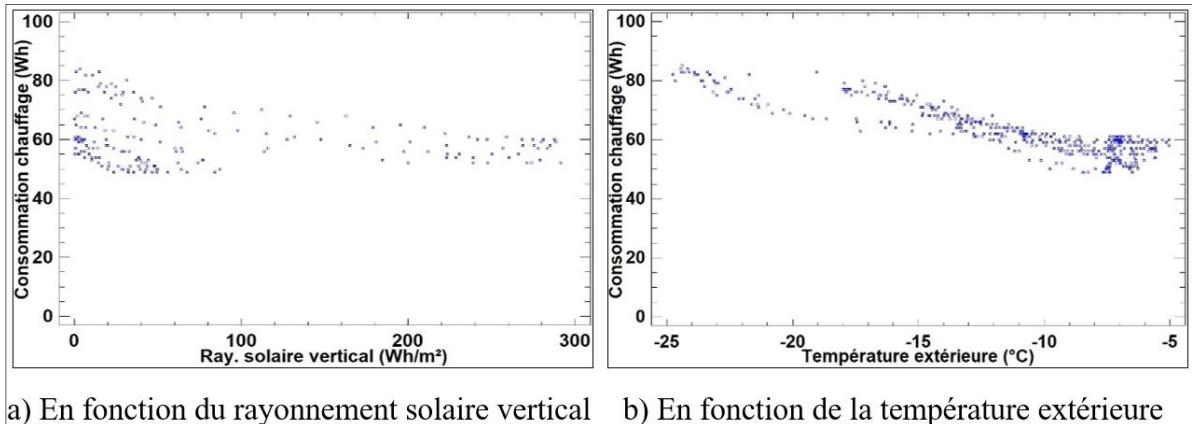


Figure 4.7 : Comparaison de la consommation de chauffage à la salle de bain
(maison référence – essai 2)

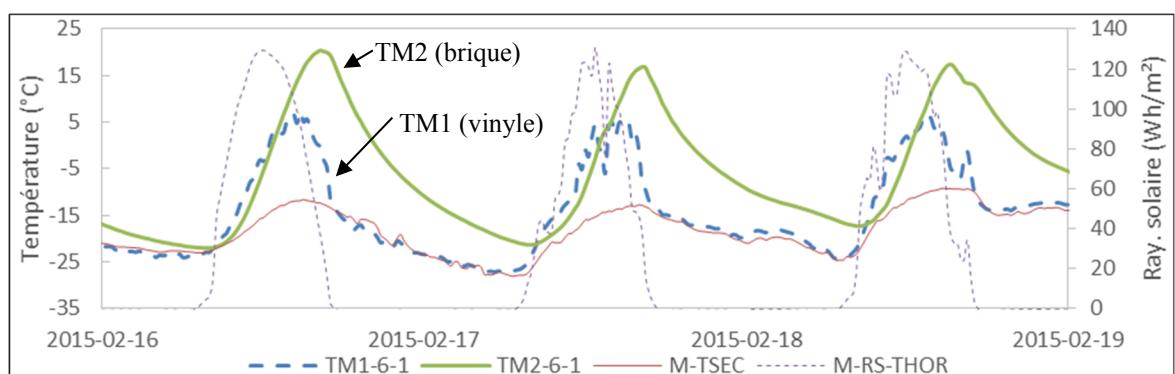


Figure 4.8 : Température du côté extérieur du mur de brique et de vinyle
(maison test – essai 3 : abaissements de jour)

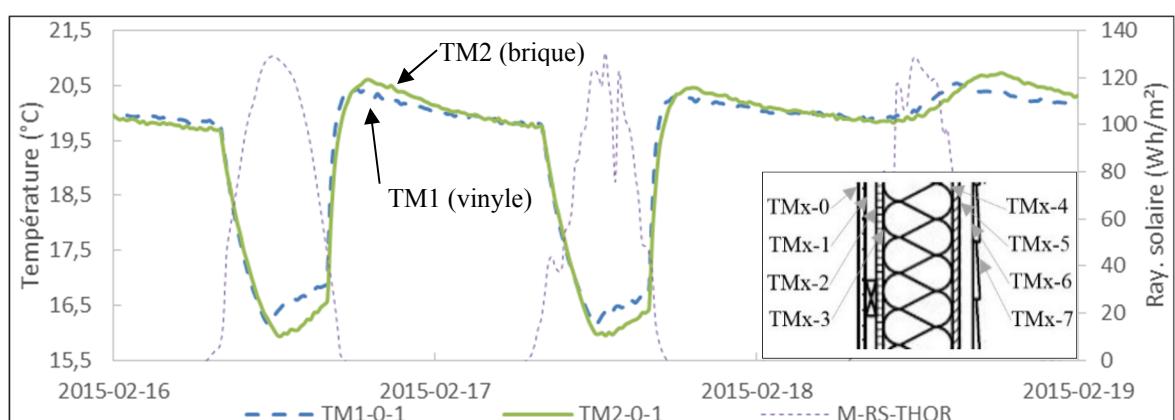


Figure 4.9 : Température de surface intérieure du mur de brique et de vinyle
(maison test – essai 3 : abaissements de jour)

4.2 Évaluation du confort thermique avec les critères

Dans cette section, les données mesurées ont été utilisées pour l'évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de la température pour les cinq essais tels que présentés dans le Tableau 3.2 et la Figure 4.4. Afin de faire ressortir les tendances, les résultats minimums, moyens et maximums sont regroupés selon les pièces des cinq essais ainsi que par type d'abaissement soient :

- a) de nuit (essais 1 et 2),
- b) de jour (essai 3),
- c) combiné de nuit (essais 4 et 5.1),
- d) combiné de jour (essais 4 et 5.1),
- e) combiné de nuit (essai 5.2),
- f) combiné de jour (essai 5.2).

L'essai avec les fenêtres dégagées (essai 5.2) est observé séparément afin de voir l'effet du gain solaire sur le confort thermique.

Les résultats sont regroupés selon les critères de confort présentés au Tableau 3.4, à savoir :

- 1) la température opératoire,
- 2) la variation de la température avec le temps,
- 3) la différence verticale de la température de l'air,
- 4) la température de surface du plancher,
- 5) la température radiante asymétrique,
- 6) le courant d'air.

4.2.1 Température opératoire

Les températures opératoires (T_o) sont présentées à la Figure 4.10 ainsi que la limite permise de 21,5 °C de l'ASHRAE 55-2013, qui correspondait à la température de rosée (T_r) la plus basse soit ≥ 2 °C. En matière d'humidité relative, elle se situait entre 15 et 20 %. Cependant, avec les fenêtres dégagées (essai 5.2), elle se situait entre 20 et 25 %. Aussi, durant les abaissements, le pourcentage d'humidité de l'air augmentait. Les résultats ont été pris sur l'occupant du SS1, du SA et de la C3. Les T_r obtenues étaient toutes inférieures à la limite, à la suite d'abaissements, de même pour la maison référence. En général, les T_o obtenues étaient d'un peu moins de 21 °C dans la maison référence. Dans la maison test au SS1, elle tendait à diminuer à chaque reprise d'abaissements répétitifs. La Figure 4.11 illustre la T_o de cette pièce de l'essai 5.1 et, à titre indicatif, elle est donnée une heure après chaque reprise. Ceci peut s'expliquer par l'inertie thermique du matériau utilisé : le béton. Celui-ci n'était plus en équilibre thermique avec l'application des scénarios d'abaissements, ce qui fait que les températures de surface étaient plus froides pour le mur de fondation et le plancher en béton. En conséquence, la T_o a aussi diminuée en raison de la différence de température entre l'air plus chaud et les surfaces froides.

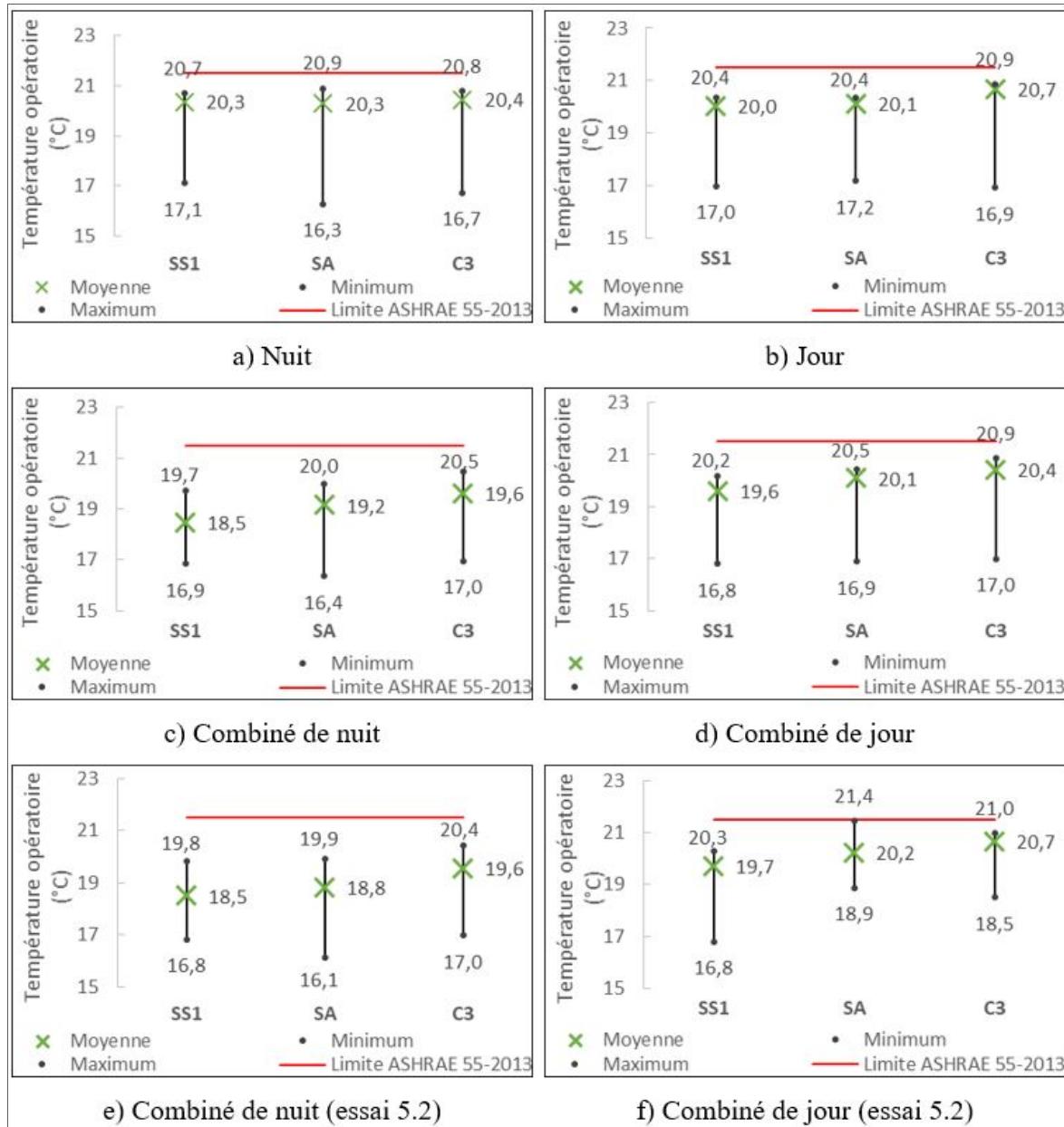


Figure 4.10 : Résumé de la température opératoire à la suite des différents types d'abaissements

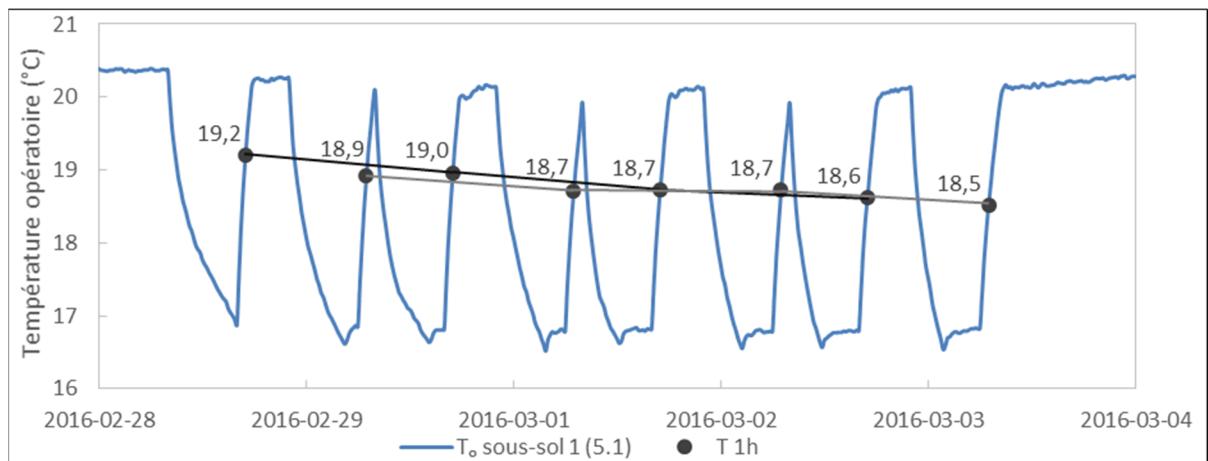


Figure 4.11 : Température opératoire au sous-sol 1 (essai 5.1 : abaissements combinés)

Le Tableau 4.2 présente les T_o minimums et maximums pour tous les essais, fenêtres couvertes et dégagées. Avec les fenêtres dégagées, il pouvait y avoir une augmentation de la T_o allant jusqu'à 5 °C au SA et jusqu'à 3 °C à la C3 à la suite d'abaissements combinés de jour. Ces différences étaient plus notables durant la première heure après la reprise au SA et à la C3. À la suite d'abaissements combinés de nuit, il pouvait y avoir une diminution allant jusqu'à 1 °C au SA avec les fenêtres dégagées au début de la reprise. À part ces exceptions, les T_o obtenues avec les fenêtres couvertes ressemblaient à celles obtenues avec les fenêtres dégagées à la suite d'abaissements de l'essai 5.

Tableau 4.2 : Température opératoire minimum et maximum

	Essais 1 à 5.1		Essai 5.2	
	T_o min	T_o max	T_o min	T_o max
Type abaissement (numéro essai)	Nuit (1)	Nuit (2)	Combiné de nuit (5.2)	Combiné de jour (5.2)
Date et heure	2014-02-12 6:00	2014-02-17 16:00	2016-03-03 6:00	2016-02-29 16:15
Pièce	SA	SA	SA	SA
Température (°C)	16,1	21,4	15,9	22,2

Le Tableau 4.3 présente le temps de récupération pour atteindre une T_o de 20 °C dans les trois pièces étudiées pour chaque type d'abaissements. Cette température a été choisie puisqu'elle était plus souvent atteinte que celle de la limite de l'ASHRAE 55-2013 de 21,5 °C. Après des abaissements combinés de nuit, il est arrivé qu'une T_o de 20 °C ne soit pas atteinte avant que l'abaissement combiné de jour commence (en l'espace de 2 h), et cela a été le cas au SS1 et au SA. Avec les fenêtres dégagées, le temps de récupération était plus long au SA après un abaissement combiné de nuit. Tandis que dans les deux autres pièces, il n'y avait pas de changement. Ceci démontre que le RDC était plus affecté par les conditions extérieures et par l'effet de la stratification thermique. Par contre, le temps de récupération était généralement plus court avec les fenêtres dégagées pour les trois pièces étudiées après un abaissement combiné de jour. Ce raccourcissement du temps de récupération était plus prononcé lors des journées avec un rayonnement solaire élevé (29 février et 1^{er} mars 2016). Aussi, quelquefois la T_o était déjà à 20 °C et plus au moment de la reprise au SA et à la C3.

Tableau 4.3 : Temps de récupération ($T_o = 20$ °C) des pièces par type d'abaissement

Type abaissement	Temps de récupération $T_o = 20$ °C (heure)		
	SS1	SA	C3
Nuit	1:30 à 2:00	1:15 à 3:00	1:00 à 1:30
Combiné de nuit	2:00 à non atteinte	1:30 à non atteinte	1:00 à 1:15
Combiné de nuit (essai 5.2)	2:00 à non atteinte	non atteinte	
Jour	2:15 à 2:30	0:45 à 1:15	01:00
Combiné de jour	1:45 à 2:30	0:45 à 1:45	0:45 à 1:00
Combiné de jour (essai 5.2)	1:45 à 2:15	0:00 à 1:15	0:00 à 0:45

4.2.2 Variation de la température opératoire avec le temps

La norme ASHRAE 55-2013 permet cinq limites de variation de la T_o avec le temps : 1,1 °C en 15 min; 1,7 °C en 30 min; 2,2 °C en 1 h; 2,8 °C en 2 h; et 3,3 °C en 4 h (Figure 1.5). Les résultats sont présentés pour les deux premiers pas de temps qui respectent l'intervalle de 15 min entre chaque donnée enregistrée. Le premier pas de temps a débuté au moment de la reprise de la température de consigne, et le deuxième pas de temps a été pris 15 min plus tard (voir Figure 4.12). Les limites ont rarement été dépassées après les deux premiers pas de temps. Les résultats ont été pris sur l'occupant du SS1, du SA et de la C3. En général, il y avait des rampes de la température et rarement des dérives. Le Tableau 4.4 présente les limites de l'ASHRAE 55-2013 qui ont été dépassées pour les trois pièces étudiées à la suite d'abaissements. Les résultats détaillés sont présentés en ANNEXE III, Tableau-A III-1 à Tableau-A III-6.

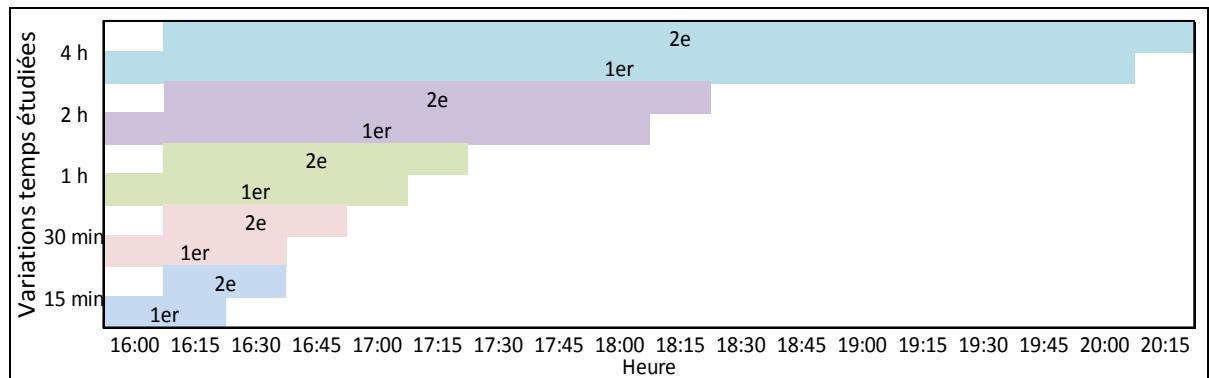


Figure 4.12 : Variations de temps étudiées en fonction du premier et deuxième pas de temps à la suite d'un abaissement de jour

Tableau 4.4 : Dépassemement des limites de la variation de la température opératoire avec le temps par pièces et par type d'abaissement

Type abaissement	Pièce	15 min		30 min		1 h		2 h		4 h	
		1er	2e	1er	2e	1er	2e	1er	2e	1er	2e
Nuit	SS1					✓*		✓	✓*	✓	
	SA	✓	✓	✓		✓		✓		✓	
	C3	✓		✓		✓		✓		✓	
Combiné de nuit	SS1							✓			
	SA	✓	✓	✓		✓		✓		ND	
	C3	✓		✓		✓		✓			
Combiné de nuit (essai 5.2)	SS1							✓			
	SA	✓	✓	✓	✓	✓	✓*	✓		ND	
	C3	✓		✓		✓		✓			
Jour	SS1							✓*			
	SA	✓		✓		✓		✓		✓*	
	C3	✓		✓		✓		✓		✓	
Combiné de jour	SS1					✓*		✓	✓*	✓	
	SA	✓		✓		✓		✓		✓	
	C3	✓		✓		✓		✓		✓	
Combiné de jour (essai 5.2)	SS1					✓		✓		✓	
	SA	✓	✓*	✓*		✓*					
	C3	✓		✓		✓		✓*			

✓ La limite a été dépassée.

* La limite a été dépassée une fois seulement.

ND Non disponible, période d'abaissement combiné de jour.

Dans la maison référence, les variations avec le temps étaient inférieures aux limites puisque la T_o était constante. Dans la maison test, au SS1, les limites n'ont jamais été dépassées au premier et deuxième pas de temps pour des intervalles de 15 min et de 30 min. De plus, les limites au deuxième pas de temps ont été dépassées après 2 h seulement. À la C3, les limites n'ont jamais été dépassées au deuxième pas de temps. Au SA, les variations étaient moins constantes par type d'abaissement. Ceci démontre l'effet de la stratification thermique; la T_o prend plus de temps à augmenter au sous-sol tandis qu'à l'étage, elle augmente rapidement à partir de la reprise.

L'essai avec les fenêtres dégagées a engendré quelques divergences. Notamment au SA et à la C3 où il y avait moins de dépassement des limites, voire aucun, lorsque le rayonnement solaire était élevé, puisque la T_o était déjà élevée au moment de la reprise. Par contre, il y avait plus de dépassements des limites après un abaissement combiné de nuit, lorsque la température extérieure était plus froide. Par exemple, les variations de la T_o ont dépassé les limites de 30 min à 4 h des premiers et deuxièmes pas de temps à la dernière journée de l'essai 5.2 (3 mars 2016). Ceci s'explique par le fait que la température extérieure était plus froide que les journées précédentes, et il s'ensuit que la T_o à 6 h était plus basse aussi. Donc, avec l'énergie fournie par le chauffage, la température a augmenté rapidement, ainsi de plus grands écarts de la T_o ont été constatés. Après des abaissements combinés de jour avec les fenêtres dégagées, des dérives de la température se sont produites au SA et à la C3. Des gains solaires abondants durant le jour ont fait augmenter la T_o ; ensuite, elle a diminué lorsque le soleil se couchait. Par exemple, au SA, une dérive a dépassé la limite après 15 min avec une T_o de 22,2 °C à 16 h 15, et de 20,7 °C à 16 h 30, soit une différence absolue de 1,5 °C le 29 février 2016. De plus, au SA, la limite a été atteinte au troisième pas de temps après 30 min le 2 mars 2016.

4.2.3 Différence verticale de la température de l'air

Les différences verticales de la température de l'air sont présentées à la Figure 4.13 ainsi que la limite permise de 3 °C de l'ASHRAE 55-2013. Les résultats ont été pris sur l'occupant du SS1, du SA et de la C3. Les différences verticales ont respecté la limite dans la maison référence. Dans la maison test, les différences verticales ont souvent dépassé la limite au SA et à la C3. Avec les fenêtres dégagées, les différences verticales étaient plus élevées, lorsque le rayonnement solaire était faible ou absent comme durant la nuit. Ceci peut s'expliquer par des pertes de chaleur à travers les fenêtres dégagées. Le Tableau 4.5 présente les différences verticales maximums de la température de l'air obtenues avec les fenêtres dégagées.

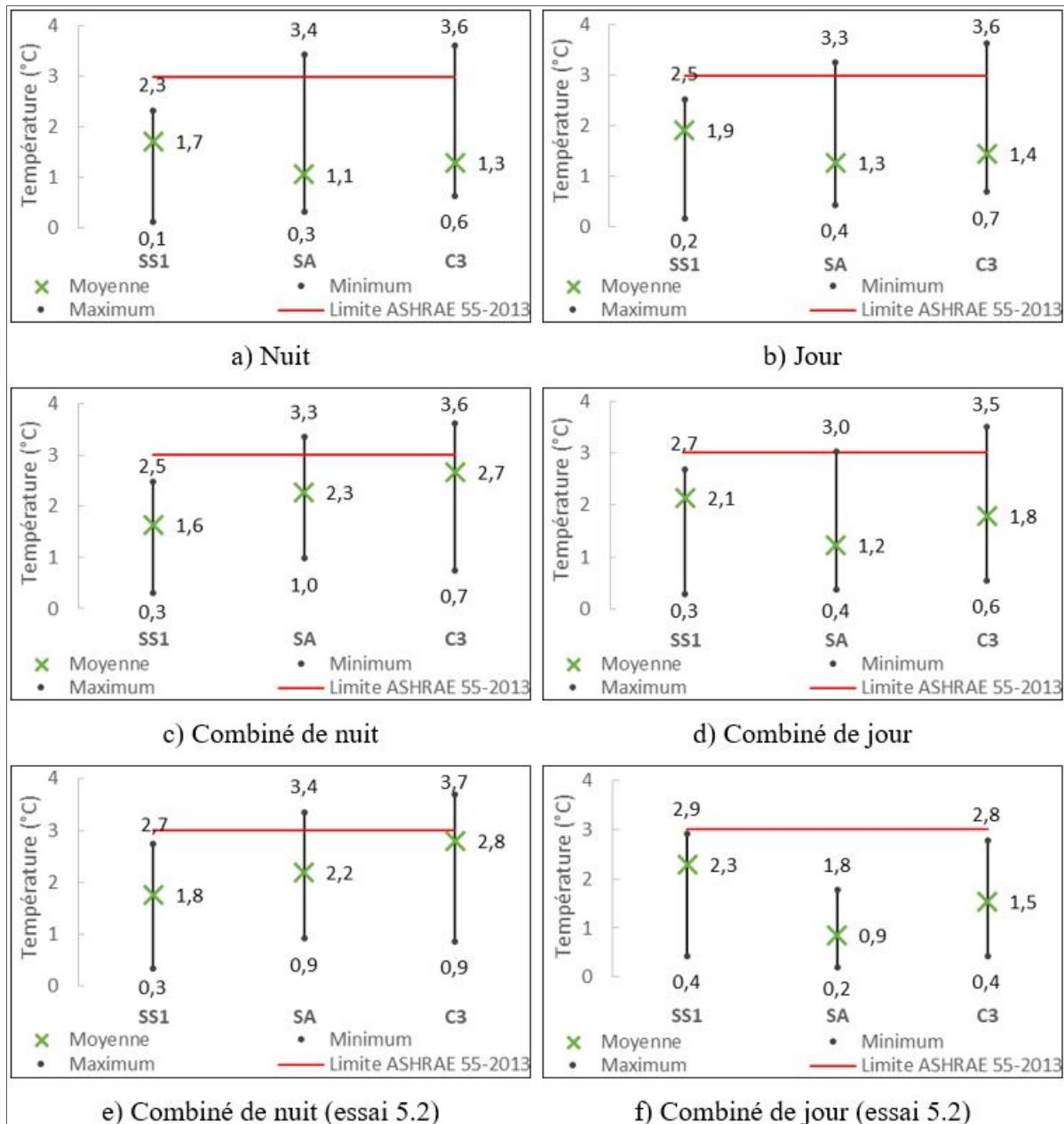


Figure 4.13 : Résumé de la différence verticale de la température de l'air à la suite des différents types d'abaissements

Tableau 4.5 : Différence verticale maximum de la température de l'air (ΔT_V) avec les fenêtres dégagées (essai 5.2)

	Essai 5.2	
	ΔT_V max	ΔT_V max
Type abaissement (numéro essai)	Combiné de jour (5.2)	Combiné de nuit (5.2)
Date et heure	2016-03-02 17:00	2016-03-03 6:30
Pièce	C3	C3
Température (°C)		
Tête	23,3	21,4
Chevilles	19,0	17,4
ΔT_V	4,3	4

Le SS1 avait les températures moyennes de l'air les plus froides au niveau des chevilles. De plus, les températures aux chevilles et à la tête ont pris plus de temps à augmenter dès la reprise. Les températures les plus froides enregistrées étaient au niveau des chevilles du SA au moment même de la reprise à la suite d'un abaissement de nuit. Les températures ont augmenté rapidement au niveau de la tête au SA et à la C3 au moment de la reprise en raison de la stratification thermique de l'air. Des températures de l'air sont présentées au niveau des chevilles et de la tête à l'ANNEXE III, Figure-A III-1.

Le temps pour atteindre la différence verticale maximum de température de l'air au SS1 prenait entre 2 et 3 h à partir de la reprise. Ensuite, il était généralement de moins de 1 h au SA et à la C3. Une différence d'au moins 3 °C a souvent été maintenue au SA et à la C3 pour une période de 1 h et moins, au début de la reprise. De plus, au SS1, cette différence a été maintenue deux fois, soit durant 45 et 15 min, respectivement à la suite d'un abaissement combiné de jour (2 mars 2016) et d'un combiné de nuit (3 mars 2016) avec les fenêtres dégagées.

4.2.4 Température de surface du plancher

Les températures de surface des planchers sont présentées à la Figure 4.14 ainsi que la limite minimale permise de 19 °C de l'ASHRAE 55-2013. Les pièces étudiées étaient : SS1, CU, SM,

SA, SB, C1 et C3. Au SS1, la température du plancher a été évaluée pour trois thermocouples, soit T41, T46 et T50 (Figure 2.7). En général, les températures de plancher ont respecté la limite minimum dans la maison référence à l'exception de la SM pour l'essai 4. Néanmoins, la température de plancher pour un confort optimal de 25 °C n'a pas été respectée. Dans la maison test, les températures de plancher n'ont pas toujours respecté la limite minimale. Une température de 21 °C et plus a rarement été atteinte et, quand cela s'est produit, cela l'a été dans les pièces SA et C3 seulement. Avec les fenêtres dégagées, à la suite d'un abaissement combiné de jour, la température de plancher a déjà été au-dessus de la limite minimale de confort au moment même de la reprise (16 h) dans les pièces SA et C3, avec 21,5 et 20,8 °C respectivement, le 1^{er} mars 2016 (rayonnement solaire élevé). Le Tableau 4.6 présente les températures de plancher minimums et maximums pour tous les essais avec les fenêtres couvertes et dégagées. En général, les températures du plancher au SS1 ont diminué à chaque abaissement répétitif à cause de la masse volumique élevée du béton (voir ANNEXE III, Figure-A III-2).

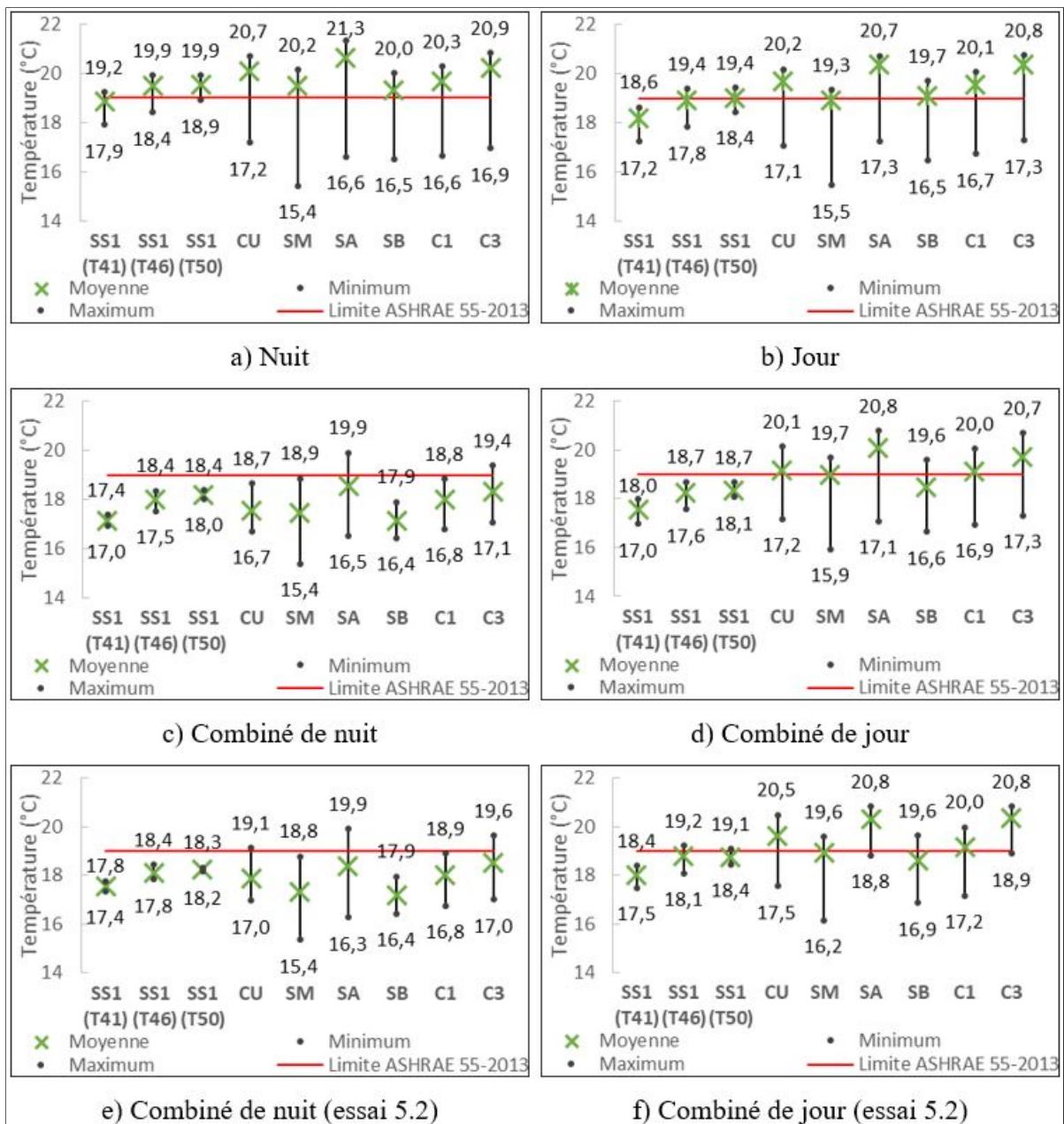


Figure 4.14 : Résumé de la température de surface de plancher à la suite des différents types d'abaissements

Tableau 4.6 : Température de surface de plancher (T_p) minimum et maximum

	Essais 1 à 5.1		Essai 5.2	
	T_p min	T_p max	T_p min	T_p max
Type abaissement (numéro essai)	Combiné de nuit (4)	Nuit (2)	Combiné de nuit (5.2)	Combiné de jour (5.2)
Date et heure	2015-02-21 6:00	2014-02-17 16:00	2016-03-03 6:00	2016-03-01 16:00
Pièce	SM	SA	SM	SA
Température (°C)	15,1	21,6	15,1	21,5

Le temps de récupération pour atteindre une température de plancher de 19 °C est présenté dans le Tableau 4.7 par pièces étudiées et par type d'abaissements. Après un abaissement combiné de nuit, les pièces SA et C3 ont toujours atteint 19 °C ensuite, la CU, la SM et la C1 l'ont atteint quelquefois. À la suite d'un abaissement combiné de nuit, la limite a été moins souvent respectée puisque la période d'analyse était plus courte (2 h). Pour tous les scénarios d'abaissements au SS1, les thermocouples T46 et T50 ont atteint 19 °C durant les premières journées des essais seulement et ils ont rarement atteint 20 °C après un abaissement de nuit. Tandis que le T41 a atteint 19 °C quelques fois après un abaissement de nuit seulement. En général, les pièces qui ont atteint 20 °C, après un abaissement de nuit, l'ont atteint dans l'ordre de présentation des pièces dans le Tableau 4.7. Après un abaissement combiné de nuit, seul le SA a rarement atteint 20 °C. Ensuite, après un abaissement de jour et combiné de jour, les pièces qui ont déjà atteint 20 °C l'ont atteint dans l'ordre suivant : le SA, la C3, la CU et la C1.

Tableau 4.7 : Temps de récupération ($T_p = 19^\circ\text{C}$) par pièces par type d'abaissements

Type abaissement	Temps de récupération $T_p = 19^\circ\text{C}$ (heure)								
	SS1 (T41)	SS1 (T46)	SS1 (T50)	CU	SM	SA	SB	C1	C3
Nuit	$\geq 2:45^*$	0:45 à 4:30	0:00 à 3:15	1:45 à 2:15	1:45 à 2:30	1:00 à 1:15	3:15 à 4:00	2:00 à 2:45	1:30
Combiné de nuit			Non atteinte	1:45 à 2:00*	1:45 à 2:00*	1:15	Non atteinte	1:45 à 2:00*	1:30 à 2:00
Combiné de nuit (essai 5.2)			Non atteinte	1:45 à 2:00*	2:00*	1:15 à 1:30	Non atteinte	2:00*	1:15 à 1:30
Jour	Non atteinte	$\geq 6:30$	$\geq 5:00$ à 6:30	2:15 à 2:30	2:15 à 3:00	0:45 à 1:00	4:00 à 4:45	2:30 à 2:45	1:00 à 1:15
Combiné de jour	Non atteinte	3:45 à 4:45*	3:00*	1:15 à 2:45	1:30 à 2:00	0:45 à 1:15	2:45 à 4:15	1:30 à 2:30	1:00 à 1:45
Combiné de jour (essai 5.2)	Non atteinte	1:15 à 4:15*	0:00 à 5:45*	1:00 à 2:00	1:45 à 2:00	0:00 à 0:45	3:00 à 4:00	1:30 à 2:30	0:00 à 1:00

* La température de 19°C n'a pas toujours été atteinte.

Concernant le thermocouple T50 au SS1, après la reprise, il lui a fallu jusqu'à 1 h pour atteindre la température minimum cible, peu importe le type d'abaissement effectué. Des abaissements répétitifs ont affecté l'inertie thermique du béton puisque des inversions de la température au SS1 ont été observées lors des changements de la température de consigne des thermostats. C'est-à-dire que, lorsque la température de l'air diminuait, celle du plancher continuait d'augmenter légèrement (période d'abaissement) tandis qu'elle diminuait encore un peu lorsque la température de l'air augmentait (période d'analyse). Ces inversions sont illustrées à l'aide du thermocouple T50 à l'ANNEXE III, Figure-A III-2. Avec des abaissements combinés, les deux autres thermocouples (T46 et T50) ont varié inversement lors des périodes d'abaissements seulement; cela était plus fréquent avec les fenêtres dégagées. Ce phénomène

s'est aussi produit aux pièces à l'étage et à la CU lors des périodes d'abaissements seulement et il était plus fréquent avec des abaissements combinés à partir de 8 h (voir ANNEXE III, Figure-A III-3). Cependant, les variations de la température lors des inversions étaient minimes soit de moins de 0,2 °C.

4.2.5 Température radiante asymétrique

L'asymétrie de la température radiante a été analysée pour deux cas : (1) le plafond plus chaud que le plancher et (2) le mur plus froid que l'air de la pièce. Selon l'ASHRAE 55-2013, les différences doivent être de moins de 5 °C et de 10 °C pour le premier et deuxième cas respectivement. Cependant, dans le guide technique et pratique de la construction (Ching, Adams et Saint-Pierre (adapt.), 2001 c2003), il est recommandé que la différence entre le mur et l'air soit de moins de 2,5 °C.

4.2.5.1 Plafond plus chaud que le plancher

Les différences entre les températures du plafond et du plancher sont présentées à la Figure 4.15. Les pièces étudiées étaient : SS1, CU, SM, SA, C1 et C3. Dans tous les essais, les différences de température étaient inférieures à la limite dans les maisons test et référence. Une valeur négative signifie que le plancher était plus chaud que le plafond. Ceci s'est souvent produit au moment de la reprise de la température de consigne. Le maximum atteint était de 4,6 °C au SS1 après un abaissement de jour combiné, avec les fenêtres couvertes, le 2 mars 2016, à 18 h. Les températures du plafond et du plancher étaient de 22,4 °C et de 17,8 °C respectivement.

Le temps le plus long pour atteindre la différence de température maximum entre le plafond et le plancher était au SS1 avec environ 2 h; ensuite, à la CU avec environ 1 h; et au reste des pièces (SM, SA, C1 et C3) avec généralement de moins de 1 h. Les minimums des pièces SM et SA du RDC ont souvent été atteints quelques heures après la reprise comparativement aux autres pièces où leurs minimums ont été atteints au moment même de la reprise.

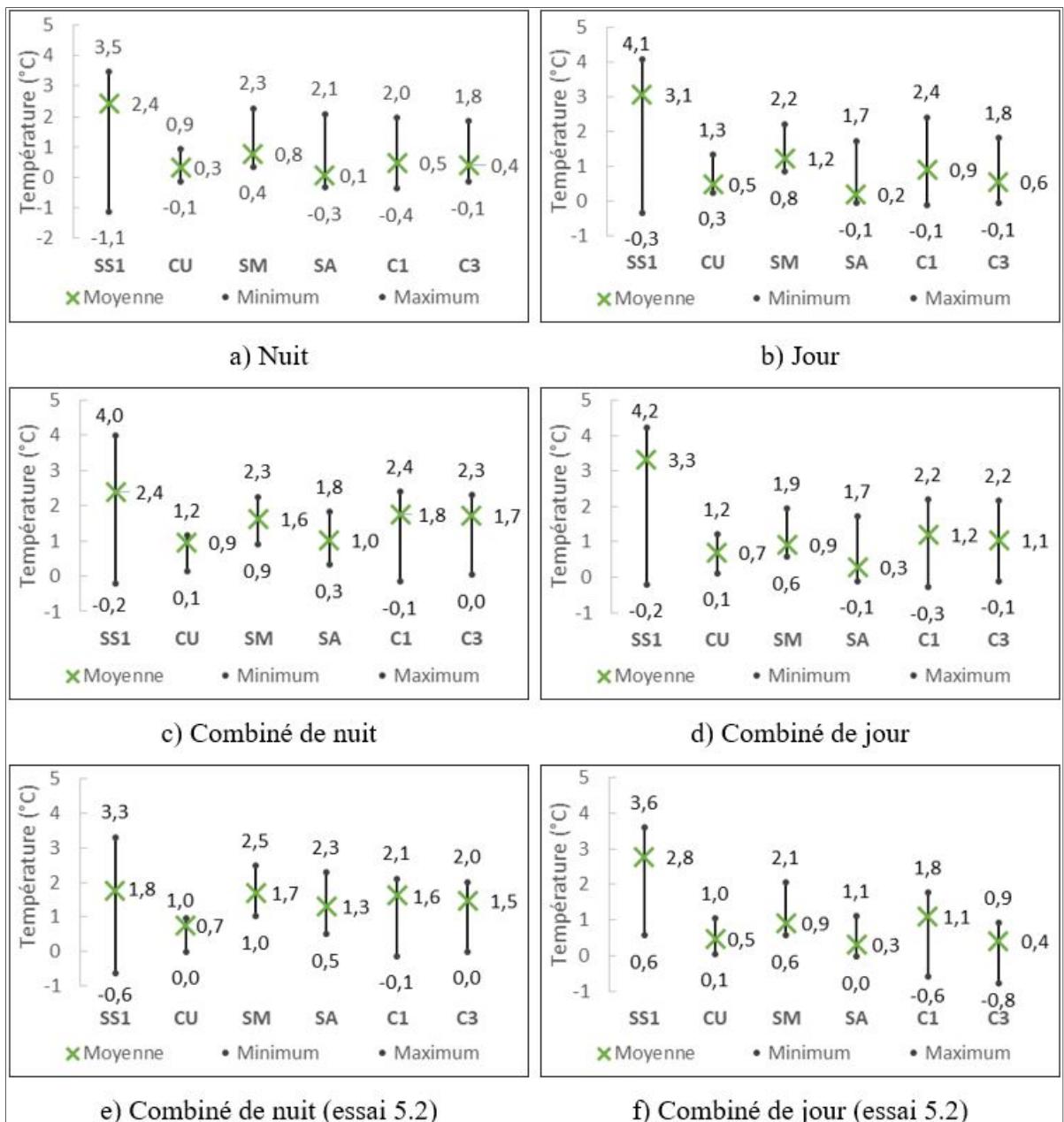


Figure 4.15 : Résumé de la différence de température entre le plafond et le plancher à la suite des différents types d'abaissements

4.2.5.2 Mur plus froid que l'air

Les différences entre les températures de surface intérieure des murs extérieurs et celles de l'air au centre des pièces sont présentées à la Figure 4.16 ainsi que la limite permise de Ching, Adams et Saint-Pierre (adapt.) (2001 c2003). Les pièces étudiées étaient : SS1, SM, C1, C2 et C3. Une valeur négative signifie que le mur était plus froid que l'air. Dans tous les essais, les différences de température étaient inférieures aux limites dans les maisons test et référence. Cependant, certaines valeurs se rapprochaient de la limite de 2,5 °C. En général, l'ordre des pièces, allant de celle dont la température de surface intérieure d'un mur est la plus froide vers celle la plus chaude, s'établit ainsi : SS1, C1, SM en alternance avec C3 et C2. Ensuite, pour les températures de l'air l'ordre s'établit ainsi : SM, SS1, C2, C1 en alternance avec C3. Des températures de surface intérieure des murs et de l'air des pièces sont présentées à l'ANNEXE III, Figure-A III-4.

Au moment de la reprise, la température de l'air se réchauffait plus rapidement que celle de la surface intérieure des murs à l'exception de la C2 et parfois de la C3. Les pièces SM et C2 avaient souvent des écarts positifs, c'est-à-dire que le mur était plus chaud que l'air. Cependant, l'air de la SM se réchauffait plus rapidement que le mur et peu de temps après le mur devenait plus chaud. Par contre, la pièce SM est située vers le nord-est avec une porte-patio où les pertes de chaleur peuvent être plus grandes et ainsi créer de plus grands écarts de température. À la C2, les écarts étaient petits, car l'air se réchauffait environ à la même vitesse que le mur. Cependant, ceci peut aussi être attribuable à la composition du mur, au matériau de revêtement extérieur en vinyle, ainsi qu'à l'orientation de la pièce au sud-ouest. Comme mentionné plus tôt, ce matériau a réagi de façon plus instantanée aux conditions extérieures (Figure 4.8). À la C1, les écarts maximums étaient généralement les plus élevés puisque le mur était froid, ce qui correspond à sa position vers le nord-est, et la température de l'air était élevée à cause de la stratification thermique. Au SS1, la température de surface intérieure du mur et celle de l'air ont augmenté lentement, et leurs maximums ont été atteints plus tard que ceux des autres pièces. En effet, ces températures au SS1 ont nécessité entre 1 h et 2 h pour atteindre leurs

maximums, tandis que dans les autres pièces ces températures ont atteint les écarts maximums généralement en moins de 1 h.

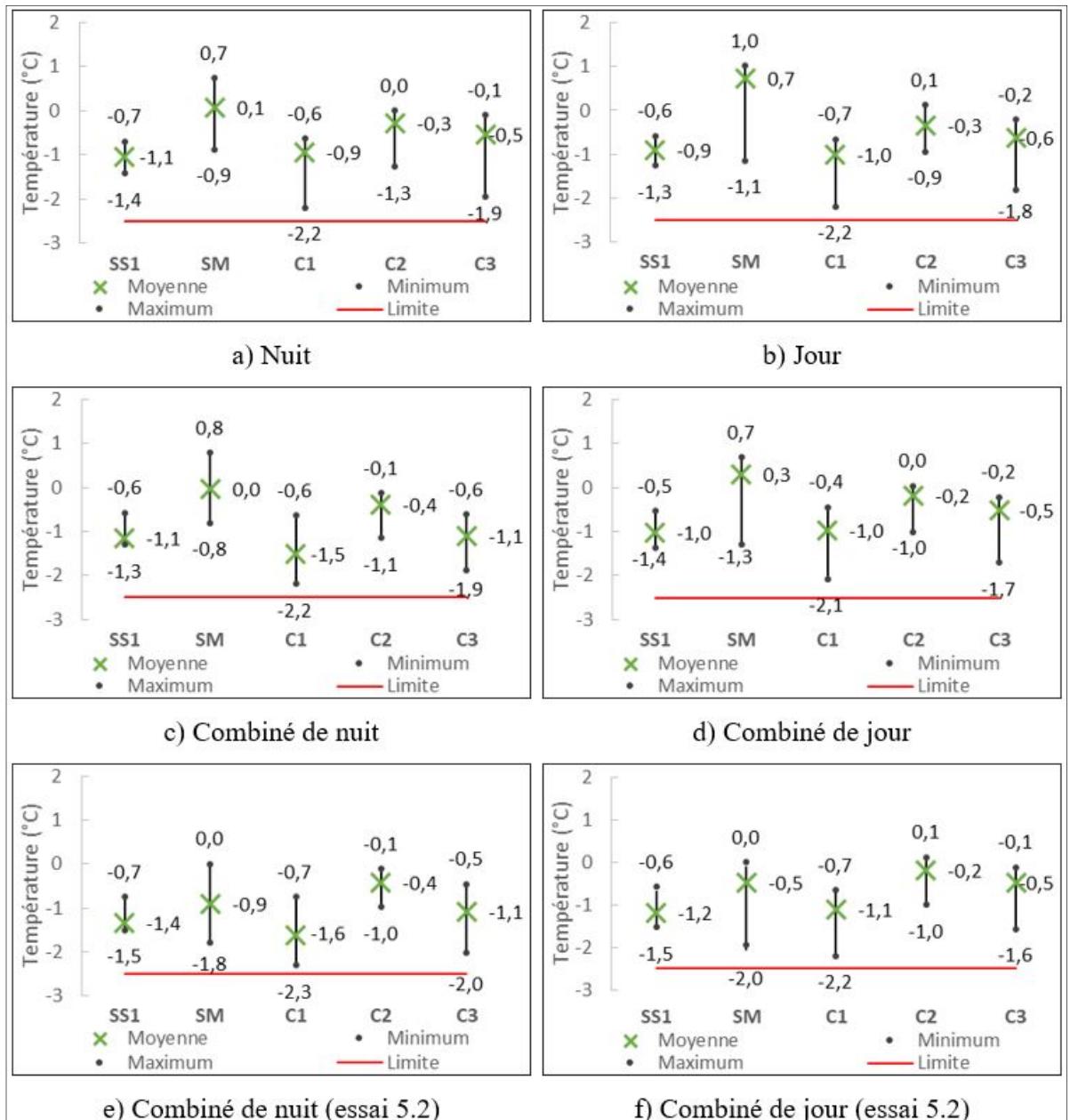


Figure 4.16 : Résumé de la différence de température entre le mur et l'air à la suite des différents types d'abaissements

4.2.6 Courant d'air

Les courants d'air, symbolisés par la vitesse de l'air, sont présentés à la Figure 4.17. Les résultats ont été pris sur l'occupant du SS1, du SA et de la C3. Dans tous les essais, la vitesse de l'air dans les maisons test et référence était inférieure à la limite permise de 0,15 m/s de l'ASHRAE 55-2013. En général, elle était plus élevée au SS1 ensuite, en ordre décroissant à la C3 et au SA. Cependant, avec les fenêtres dégagées, les tendances étaient différentes. À la suite d'un abaissement combiné de jour, les valeurs maximums de la vitesse de l'air étaient plus élevées au SA puis en ordre décroissant, lors des journées ensoleillées, à la C3 et au SS1 sinon ces deux derniers étaient inversés.

La vitesse de l'air semblait être affectée par l'activation ou l'arrêt du chauffage et par le rayonnement solaire comme illustré à l'ANNEXE III, Figure-A III-5. Elle a diminué lors de la demande de pointe de chauffage qui survenait au moment de la reprise de la température de consigne. Ensuite, elle a augmenté progressivement avec la diminution de la demande pointe. Aussi, la vitesse de l'air augmentait lorsque le chauffage arrêtait brusquement (période d'abaissement). De plus, elle a augmenté lorsque le rayonnement solaire était élevé avec les fenêtres dégagées.

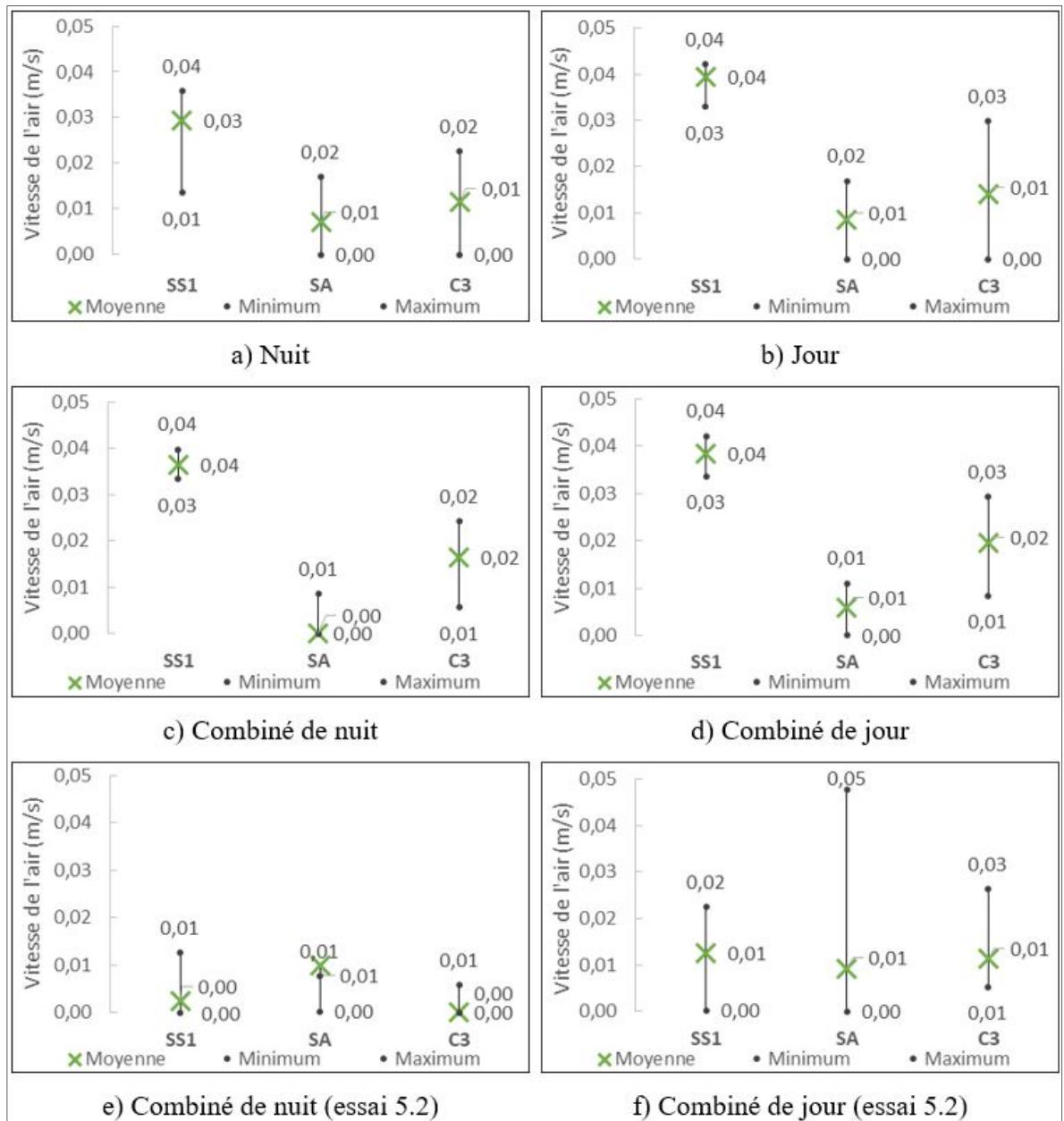


Figure 4.17 : Résumé du courant d'air à la suite des différents types d'abaissements

4.3 Évaluation du confort thermique avec le modèle de Fanger

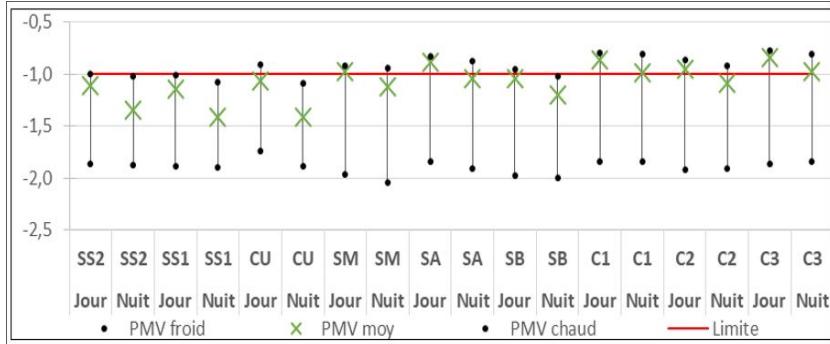
Dans la présente section, le confort thermique a été évalué avec les indices du vote moyen prévisible (PMV) et du pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) à la suite d'abaissements de la température pour le cinquième essai seulement. Il est aussi intéressant d'analyser la consommation de chauffage et les conditions intérieures afin de mieux comprendre les

fluctuations des indices de confort. Les informations concernant cet essai ont été fournies au Tableau 3.2, et les conditions extérieures à la Figure 4.4. Les indices de confort ont été présentés pour ceux calculés à l'aide des données mesurées in situ (Tableau 3.5) et ceux obtenus par simulations du modèle des MEEB d'EnergyPlus (Figure 3.2). L'une des maisons avait les fenêtres couvertes (essai 5.1), l'autre les fenêtres dégagées (essai 5.2). Toutes les pièces ont été analysées individuellement. Les résultats sont identifiés par le numéro de l'essai et s'ils étaient calculés (données mesurées in situ) ou simulés (modèle des MEEB d'EnergyPlus).

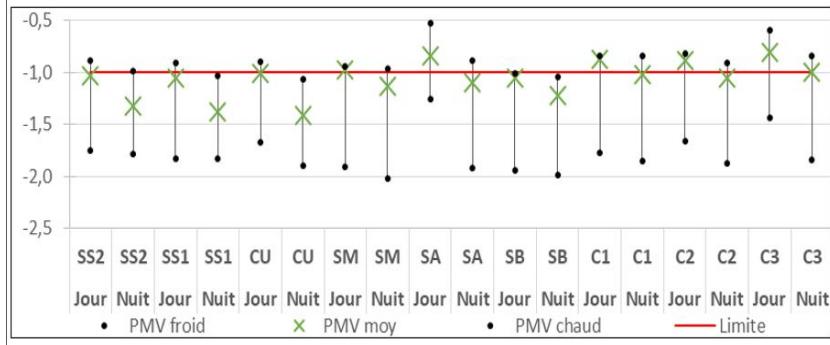
4.3.1 PMV-PPD

L'ASHRAE 55-2013 recommande un indice PMV de $\pm 0,5$, ce qui donne un indice PPD de 10 % comme l'illustre à la Figure 1.6. Cependant, un $PMV \leq -0,5$ a rarement été atteint à la suite d'abaissements combinés, et c'était seulement après un abaissement combiné de jour. Donc, le confort thermique a été évalué selon un PMV de ± 1 puisqu'il était plus souvent atteint, ceci correspondant à un PPD d'environ 25 %. Une sensation thermique froide signifie que le PMV augmente, et le contraire pour une sensation thermique chaude. Aussi, une évaluation du temps de récupération nécessaire pour atteindre un indice $PMV \leq -1$ à la suite d'abaissements est complétée.

Les indices PMV et PPD sont calculés en fonction de six facteurs qui influent sur le confort thermique, dont quatre portent sur les conditions thermiques intérieures. Un résumé des résultats est présenté aux Figure 4.18 (calculés) et Figure 4.19 (simulés). Ces résultats représentent la moyenne des cinq journées étudiées en termes de PMV minimum, moyen et maximum à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit pour toutes les pièces des deux essais. Ces résultats sont aussi présentés sous forme de tableaux incluant les PMV et les PPD à l'ANNEXE IV, Tableau-A IV-1 au Tableau-A IV-4.

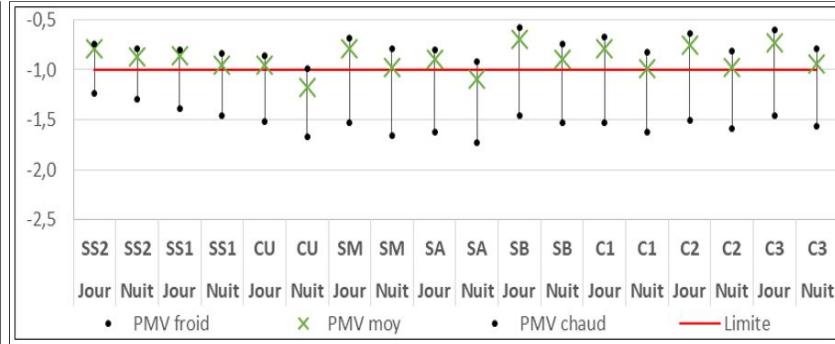


a) Essai 5.1

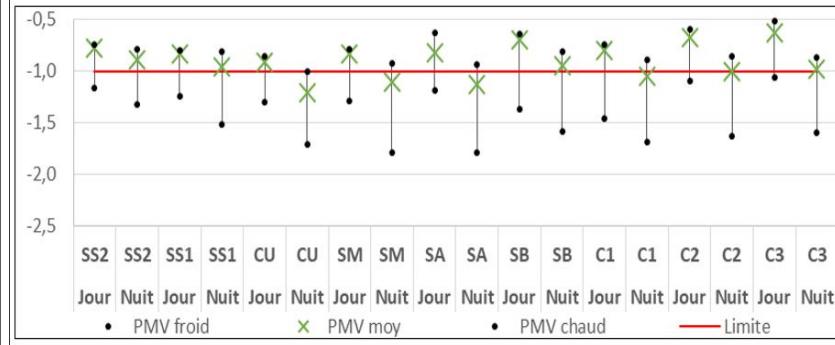


b) Essai 5.2

Figure 4.18 : Résumé des PMV calculés par pièce à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit



a) Essai 5.1



b) Essai 5.2

Figure 4.19 : Résumé des PMV simulés par pièce à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit

Pour les données in situ, les PMV calculés sont semblables dans les deux essais (Figure 4.18). Cependant, les pièces SA et C3 avaient des sensations thermiques plus chaudes après des abaissements combinés de jour avec l'essai 5.2. Aussi, les PMV moyens de l'essai 5.1 étaient un peu plus chauds dans le SA après des abaissements combinés de nuit. L'indice PMV calculés le plus bas (sensation froide) était environ de -2 pour les deux essais. Avec l'essai 5.1, il a été obtenu dans les pièces SM et SB après tous les abaissements au moment de la reprise (16 h et 6 h) sauf le 29 février 2016 après l'abaissement combiné de jour seulement. Avec l'essai 5.2, il a été obtenu dans la pièce SM après tous les abaissements combinés de nuit à 6 h; dans SA après un abaissement combiné de nuit le 3 mars 2016 à 6 h; et dans SB après tous les abaissements combinés de nuit à 6 h ainsi qu'après un abaissement combiné de jour le 28 février 2016 à 16 h. L'indice PMV calculé le plus élevé (sensation chaude), a été de -0,8 avec l'essai 5.1. Il a été obtenu dans la pièce SA après tous les abaissements combinés de jour entre 1 h 30 et 2 h 30; dans C2 à la suite d'un abaissement combiné de jour le 29 février 2016 après une durée de 4 h 45; enfin dans C1 et C3 après tous les abaissements entre 45 min et 1 h. À l'essai 5.2, c'était un PMV de -0,2 pour la pièce SA le 29 février 2016 à 16 h 15.

Pour les PMV moyens simulés, l'essai 5.2 a donné des sensations thermiques plus chaudes après des abaissements combinés de jour; et l'essai 5.1 après des abaissements combinés de nuit (Figure 4.19). Les différences entre ces deux essais sont faibles. L'indice PMV simulé le plus bas (sensation froide) était de -1,8 avec l'essai 5.1. Il a été obtenu dans les pièces SA et CU après un abaissement combiné de nuit le 3 mars 2016 à 6 h. Ensuite, avec l'essai 5.2, le PMV a été de -1,9. Il a été obtenu dans les pièces SM et SA après un abaissement combiné de nuit le 3 mars 2016 à 6 h. L'indice PMV simulé le plus élevé (sensation chaude), ce PMV a été de -0,5 avec l'essai 5.1. Il a été obtenu dans les pièces SB après un abaissement combiné de jour les 28 et 29 mars 2016 à 21 h et 20 h 15 respectivement; enfin dans C3 après un abaissement combiné de jour le 29 mars 2016 à 21 h 15. Avec l'essai 5.2, le PMV le plus élevé a été de 0. Il a été obtenu dans la pièce SA après un abaissement combiné de jour le 1^{er} mars 2016 à 16 h.

Un résumé des sensations froides et chaudes à la suite d'abaissements (PMV) est présenté à la Figure 4.20. Alors que la Figure 4.21 présente les écarts, en termes de PMV moyens, entre les résultats calculés et simulés à la suite d'abaissements pour chaque pièce.

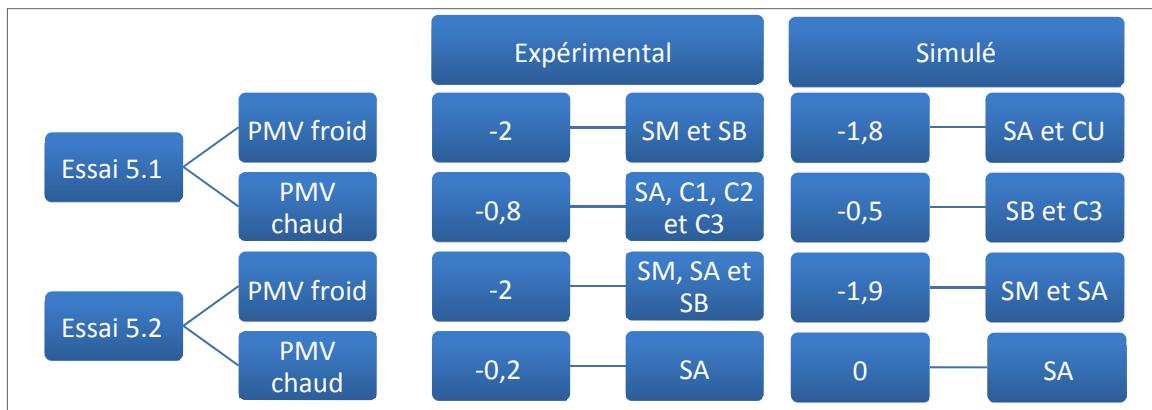


Figure 4.20 : Schéma des PMV calculés et simulés pour une sensation froide et chaude

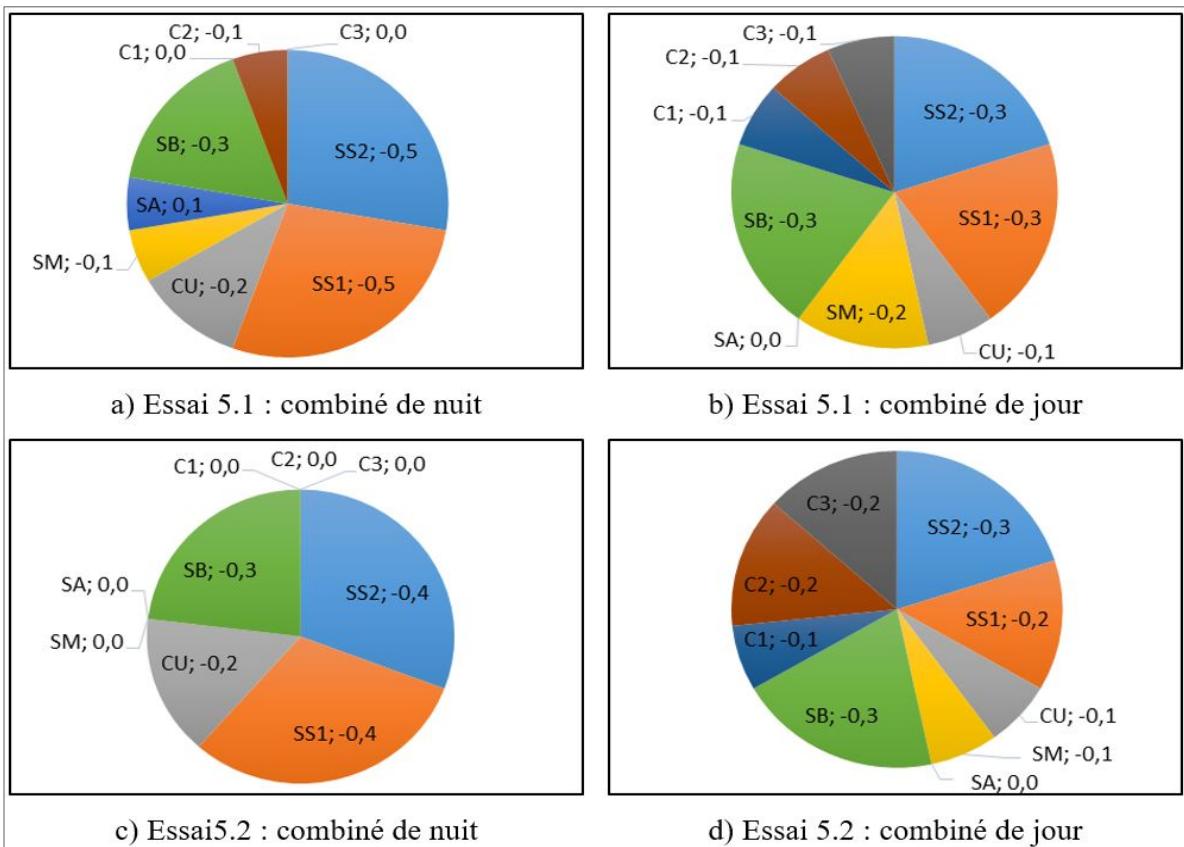


Figure 4.21 : Écart des PMV moyens calculés et simulés par pièce à la suite d'abaissements

En général, les indices PMV simulés ont surestimé ceux calculés, c'est-à-dire qu'ils avaient une tendance plus chaude. Par contre, les résultats calculés avaient parfois une sensation thermique plus chaude. Ceci était plus fréquent dans la pièce SA après des abaissements de nuit combinés. Les pièces au sous-sol et la SB avaient les plus grands écarts après des abaissements combinés pour les deux essais. En général, les écarts étaient un peu plus petits dans l'essai 5.2. Toutefois, dans l'ensemble, les écarts étaient petits pour les deux essais avec un écart moyen de 0,5 et moins. Un résultat négatif signifie que le résultat simulé est plus élevé que celui calculé.

La Figure 4.22 démontre qu'il y avait un écart entre les PMV calculés et simulés au SA le 29 février 2016 de 11 h à 16 h 15. Cet écart absolu était en moyenne de 0,8 avec un écart type de 0,3. La sensation thermique était plus chaude avec le PMV calculé. Une explication possible est le rayonnement solaire. Pour cette journée, selon les données mesurées, le rayonnement solaire horizontal (M-RS-THOR) maximum enregistré à 10 h 45 a été de 153,7 W/m² et celui vertical (M-RS-TVER) maximum enregistré à 11 h 45 a été de 828,4 W/m². Ensuite, les résultats simulés indiquent un rayonnement solaire horizontal maximum de 366 W/m² à 12 h 30. Toutefois, le rayonnement vertical n'est pas disponible dans EnergyPlus. Les PMV calculés fluctuaient en fonction du rayonnement solaire vertical.

Une valeur de réflectance de 0,6 a été ajoutée avec pour but de représenter le rayonnement solaire réfléchi par le sol (neige) dans EnergyPlus. Le PMV au SA avec cet ajout est illustré à la Figure 4.22. L'écart moyen absolu est maintenant réduit à 0,6 avec un écart type de 0,3 pour la journée du 29 février 2016 de 11 h à 16 h 15. Cependant, les autres journées ont aussi été affectées. À titre d'exemple pour la journée du 1^{er} mars 2016 de 11 h à 18 h, l'écart moyen absolu était de 0,3 avec un écart type de 0,2 sans l'ajout de la réflexion. Tandis qu'avec la prise en compte de la réflexion, l'écart moyen absolu était de 0,7 avec un écart type de 0,4.

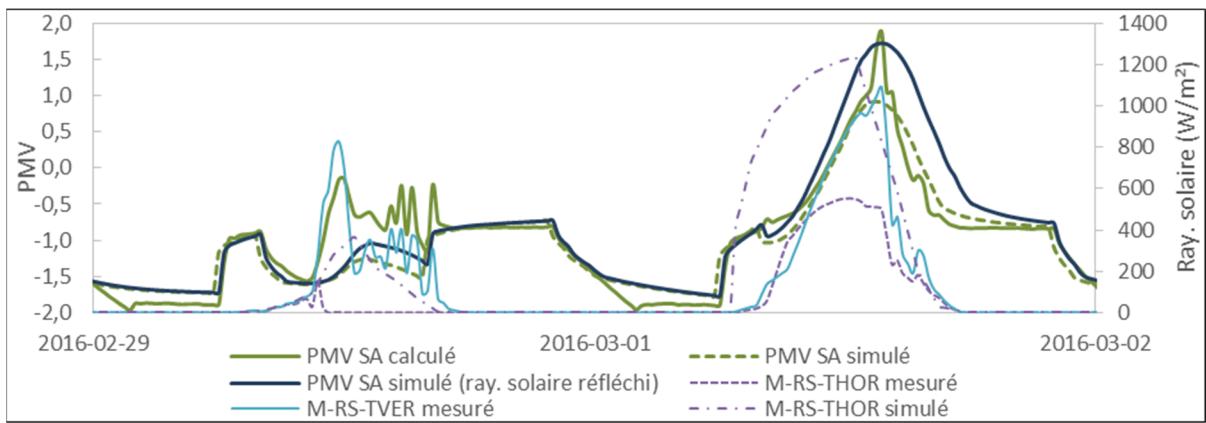


Figure 4.22 : Comparaison des PMV calculés et simulés du salon avec le rayonnement solaire de l'essai 5.2

4.3.2 Temps de récupération

Le temps de récupération nécessaire pour atteindre un indice $PMV \leq -1$ à la suite d'abaissements est présenté dans les Tableau 4.8 (calculés) et Tableau 4.9 (simulés) pour toutes les pièces étudiées après chaque type d'abaissement des deux essais.

Tableau 4.8 : Résumé du temps de récupération pour atteindre un $PMV \leq -1$ à la suite d'abaissements des essais expérimentaux

	Type abaissement	Temps de récupération $PMV \leq -1$ (heure)								
		SS2	SS1	CU	SM	SA	SB	C1	C2	C3
Essai 5.1	Combiné de jour	1:30 à 2:00	1:45 à 2:30	1:15 à 2:15	0:15 à 0:30	0:15 à 0:30	0:45 à 1:00	0:30	0:30	0:15 à 0:30
	Combiné de nuit	1:45 à 2:00*	2:00*	2:00*	0:30 à 0:45	0:30	1:00 à 1:45	0:30	0:30	0:30
Essai 5.2	Combiné de jour	1:15 à 2:00	1:30 à 2:15	1:15 à 2:15	0:15 à 0:30	0:00 à 0:15	0:45 à 1:00	0:15 à 0:30	0:15 à 0:30	0:00 à 0:15
	Combiné de nuit	1:45 à 2:00*	2:00*	2:00*	0:30	0:30 à 0:45	1:00 à 1:45	0:30 à 0:45	0:30	0:30

* Un $PMV \leq -1$ n'a pas toujours été atteint.

Tableau 4.9 : Résumé du temps de récupération pour atteindre un PMV ≤ -1 à la suite d'abaissements des essais simulés

	Type abaissement	Temps de récupération PMV ≤ -1 (heure)								
		SS2	SS1	CU	SM	SA	SB	C1	C2	C3
Essai 5.1	Combiné de jour	0:15	0:15	0:30 à 1:15	0:15 à 1:00	0:30	0:15 à 0:30	0:15	0:15	0:15
	Combiné de nuit	0:15	0:15 à 0:30	1:00 à 2:00	0:30 à 0:45	0:45 à 1:30	0:15 à 0:30	0:15 à 0:45	0:15 à 0:30	0:15 à 0:30
Essai 5.2	Combiné de jour	0:00 à 0:15	0:00 à 0:15	0:00 à 1:00	0:00 à 0:30	0:00 à 0:15	0:15 à 0:30	0:15 à 0:30	0:00 à 0:15	0:00 à 0:15
	Combiné de nuit	0:15	0:15 à 0:30	1:15 à 2:00	0:45 à 1:15	0:45 à 1:30	0:15 à 0:45	0:30 à 1:15	0:15 à 1:00	0:15 à 0:45

Pour ce qui est des PMV calculés avec les données in situ des deux essais, les pièces SS1 et CU ont parfois pris plus de 2 h pour atteindre un PMV ≤ -1 après les deux scénarios d'abaissements. Le SS2 a pris jusqu'à 2 h et parfois il ne l'a pas atteint après un abaissement combiné de nuit. La SB a pris jusqu'à 1 h après un abaissement combiné de jour et jusqu'à 1 h 45 après un abaissement combiné de nuit. Le reste des pièces (SM, SA, C1, C2 et C3) ont pris moins de 1 h. Les essais 5.1 et 5.2 avaient de petites variations concernant le temps de récupération pour atteindre un PMV ≤ -1 , à savoir de ± 15 min. Avec les fenêtres dégagées (essai 5.2), un PMV ≤ -1 était déjà atteint au moment même de la reprise après un abaissement combiné de jour lorsque le rayonnement solaire était élevé, ce qui a été observé dans les pièces SA et C3 le 1^{er} mars 2016.

Quant aux PMV simulés des deux essais, le temps de récupération a été de moins de 1 h et au plus de 1 h 30 pour toutes les pièces. Cependant, la pièce CU a pris jusqu'à 2 h après un abaissement combiné de nuit. Les essais 5.1 et 5.2 avaient des variations pouvant aller jusqu'à ± 45 min en ce qui concerne le temps de récupération pour atteindre un PMV ≤ -1 . Avec les fenêtres dégagées (essai 5.2), le temps de récupération a eu tendance à diminuer à la suite d'un

abaissement combiné de jour. Parfois un PMV ≤ -1 était déjà atteint au moment même de la reprise lorsque le rayonnement solaire était élevé. Ceci s'est produit le 28 février 2016 dans les pièces C2 et C3 ainsi que le 1^{er} mars 2016 dans toutes les pièces à l'exception de la SB et de la C1. Par contre, le temps de récupération a eu tendance à augmenter à la suite d'un abaissement combiné de nuit.

Il y avait quelques différences concernant le temps de récupération pour atteindre un indice PMV ≤ -1 à la suite d'abaissements entre les résultats calculés et simulés. Au sous-sol, il avait diminué d'au moins 1 h avec les résultats simulés. En général, les résultats simulés atteignaient un PMV ≤ -1 plus tôt. Néanmoins, avec l'essai 5.1, un PMV ≤ -1 était toujours atteint en premier avec les résultats calculés au SA à la suite d'abaissements combinée de jour et de nuit. De plus, avec l'essai 5.2, ceci s'était toujours produit dans les pièces SM et SA après un abaissement combiné de nuit.

Lorsque les températures extérieures étaient basses, les PMV simulés semblaient plus être affectés que ceux calculés avec l'essai 5.2. Tel était le cas la nuit du 2 au 3 mars 2016, la température extérieure était en dessous de -20 °C soit la plus froide de toute la durée de l'essai 5. Ce matin-là, les résultats simulés de l'essai 5.2 ont pris entre 15 à 45 min de plus que ceux calculés à atteindre un PMV ≤ -1 dans les pièces SM, SA, C1, C2 et C3.

Le Tableau 4.10 présente pour ce qui est des PMV minimums et maximums absolus les écarts de temps enregistrés entre les résultats calculés et simulés à partir de la reprise. En général, les écarts maximums ont été atteints au début de la reprise. Il ne semblait pas y avoir de tendance pour les minimums. De plus, la différence de temps avec les fenêtres dégagées semble plus grande.

Tableau 4.10 : Résumé des écarts de temps des PMV minimums et maximums absolus entre ceux calculés et simulés à la suite d'abaissements

	Type abaissement	Écart de temps des ΔPMV absolus (heure)									
		ΔPMV	SS2	SS1	CU	SM	SA	SB	C1	C2	C3
Essai 5.1	Combiné de jour	min	1:15 à 2:00	1:45 à 2:00	1:45 à 5:30	0:15 à 0:45	0:15 à 1:15	0:15 à 0:30	0:30 à 2:00	0:30 à 0:45	0:30 à 0:45
		max	0:15	0:15	0:15 à 0:30	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
	Combiné de nuit	min	1:30 à 2:00	1:45 à 2:00	1:45 à 2:00	0:30	0:15 à 0:45	0:30 à 1:45	0:00 à 0:45	0:30 à 0:45	0:15 à 0:30
		max	0:15	0:15	0:15 à 0:30	0:00	0:00 à 0:30	0:00 à 0:45	0:00	0:00	0:00
Essai 5.2	Combiné de jour	min	1:45 à 2:30	2:00 à 2:15	1:30 à 4:00	0:30 à 3:15	0:15 à 4:45	0:30 à 0:45	0:30 à 1:45	0:15 à 2:30	0:30 à 3:00
		max	0:00 à 0:15	0:00 à 0:15	0:00 à 0:30	0:00	0:00 à 1:00	0:00 à 1:00	0:00 à 0:00	0:00 à 3:30	0:00 à 0:15
	Combiné de nuit	min	1:45 à 2:00	0:00 à 2:00	0:00 à 2:00	0:15 à 1:15	0:00 à 2:00	0:30 à 0:45	0:00 à 2:00	0:15 à 0:45	0:15 à 0:45
		max	0:15	0:15	0:15 à 0:30	0:00	0:00 à 0:45	0:00 à 0:15	0:00	0:00	0:00

4.3.3 Consommation de chauffage

Comme présenté plus tôt à la section 4.1, les conditions environnementales extérieures ont affecté la consommation de chauffage. Il en est de même aussi pour les indices de confort. Le pourcentage d'écart de la consommation de chauffage entre les deux essais est présenté aux Tableau 4.11 (mesurés) et Tableau 4.12 (simulés). Le pourcentage d'écart est donné pour chaque pièce ainsi que le total de la maison. En premier lieu, les résultats sont donnés pour les cinq journées étudiées avec des abaissements combinés de jour et de nuit (28 février au 3 mars 2016). En deuxième lieu, les résultats sont donnés pour une journée où le rayonnement

solaire était important (1^{er} mars 2016 de 8 h 15 à 22 h 00). Une valeur négative signifie qu'il y avait une diminution de la consommation à l'essai 5.2 avec les fenêtres dégagées.

Tableau 4.11 : Pourcentage d'écart de la consommation de chauffage entre les essais 5.1 et 5.2 mesurés

Date	Pourcentage d'écart entre l'essai 5.1 et 5.2 (%)									
	SS2	SS1	CU	SM	SA	SB	C1	C2	C3	Total
2016-02-28										
00:00 à 03-04	1,4	0,9	-0,6	-3,4	13,5	5,0	7,6	1,6	-1,3	2,2
00:00 (5 jours)										
2016-03-01										
8:15 à 22:00	-0,5	-10,9	-8,3	-22,7	-24,6	1,7	-0,1	-17,0	-26,9	-10,2

Tableau 4.12 : Pourcentage d'écart de la consommation de chauffage entre les essais 5.1 et 5.2 simulés

Date	Pourcentage d'écart entre l'essai 5.1 et 5.2 (%)									
	SS2	SS1	CU	SM	SA	SB	C1	C2	C3	Total
2016-02-28										
00:00 à 03-04	-7,5	-9,3	-11,6	-24,7	-8,4	-13,6	-12,3	-13,8	-13,6	-12,6
00:00										
2016-03-01										
8:15 à 22:00	-23,4	-21,7	-41,6	-44,5	-44,4	-33,0	-30,1	-55,7	-58,9	-37,8

Le dégagement des fenêtres des MEEB a généralement occasionné des augmentations de la consommation durant toute la période étudiée avec des abaissements combinés (Tableau 4.11). La pièce avec la plus grande augmentation était le SA avec 13,5 %. La somme de toutes les pièces a engendré une augmentation de 2,2 %. Toutefois durant une journée ensoleillée (1^{er} mars 2016), le dégagement des fenêtres a entraîné des économies d'énergie. Les pièces avec des économies de 20 % et plus étaient situées au sud (SA et C3) ou avaient une grande

surface vitrée (SM). La somme de toutes les pièces a engendré une diminution de 10,2 % de la consommation.

Les données de consommation simulées, avaient une différence notable entre les essais 5.1 et 5.2. Les fenêtres dégagées ont permis de réaliser des économies sur la consommation de chauffage durant toute la période étudiée avec des abaissements combinés (Tableau 4.12). La pièce avec la plus grande économie était la SM avec 24,7 %. La somme de toutes les pièces a engendré une diminution de 12,6 % par rapport à la maison avec les fenêtres couvertes. Durant une journée ensoleillée (1^{er} mars 2016), les économies d'énergie étaient élevées avec les fenêtres dégagées. Les pièces avec des économies de 40 % et plus étaient situées au sud et à l'ouest (CU, SA, C2 et C3) ou avaient une grande surface vitrée (SM). La somme de toutes les pièces a engendré une diminution de 37,8 % de la consommation.

La Figure 4.23 présente pour ce qui est de la consommation de chauffage le pourcentage d'écart entre les résultats mesurés et simulés pour toutes les pièces. Les résultats sont donnés en a) et en b) pour les cinq journées étudiées (28 février au 3 mars 2016), et, en c) et en d) pour une journée où le rayonnement solaire était important (1^{er} mars 2016 de 8 h 15 à 22 h 00). Les différences étaient importantes, en particulier au sous-sol, où il y avait une diminution d'environ 60 % et plus comparativement aux résultats simulés. Les pièces au RDC ont connu les plus petites différences; de même, la différence au SA lors de l'essai 5.1 était assez similaire.

Le pourcentage d'écart de la consommation de chauffage était plus prononcé à l'essai 5.2. Il y avait une diminution, avec les résultats simulés, de 47 % (essai 5.2) et de 37 % (essai 5.1) pour toute la maison durant les cinq journées étudiées. Ensuite, pour la période étudiée du 1^{er} mars 2016, il y avait une diminution de 62 % (essai 5.2) et de 46 % (essai 5.1).

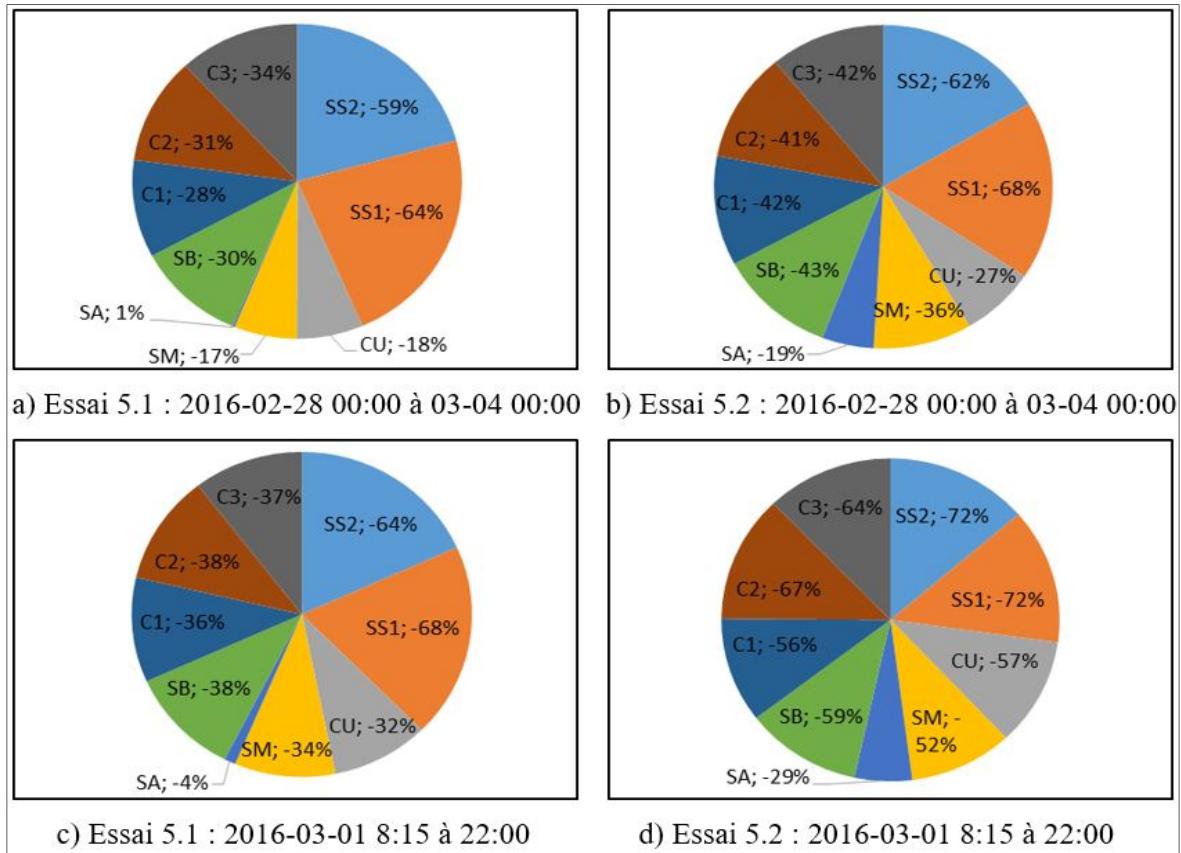


Figure 4.23 : Pourcentage d'écart de la consommation de chauffage mesurée et simulée par pièce

4.3.4 Condition intérieure

Les assemblages qui ont été sélectionnés pour l'analyse des températures de surface intérieure sont le plancher (CU, SM, SA, SB, C1 et C3), le mur extérieur (SM, C2 et C3) et la fenêtre (SA et C3). De plus, les températures moyennes de l'air ont été analysées dans toutes les pièces. Enfin, les PMV sont présentés en fonction des températures opératoires.

Les différences de température moyenne de surface entre les essais 5.1 et 5.2 des MEEB étaient relativement semblables pour les cinq journées étudiées avec des abaissements combinés de jour et de nuit (28 février au 3 mars 2016). La plus grande différence était sur les fenêtres avec une augmentation de la température moyenne de 10,2 et de 10,7 °C pour C3 et SA

respectivement à l'essai 5.2. Vient ensuite la température de plancher au SA où la température moyenne a augmenté de 0,9 °C à l'essai 5.2.

Les différences de température moyenne de l'air entre les essais 5.1 et 5.2 étaient aussi relativement semblables pour toute la période étudiée. La plus grande différence était au SA avec une augmentation de la température moyenne de 0,9 °C à l'essai 5.2. Les T_o calculées ont été présentées à la section 4.2.1, et, à l'ANNEXE IV (Figure-A IV-1) sont présentés les PMV en fonction des T_o obtenues à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit.

Pour les températures simulées, les différences de température moyenne de surface entre les essais 5.1 et 5.2 étaient relativement semblables pour les cinq journées étudiées avec des abaissements combinés de jour et de nuit (28 février au 3 mars 2016). La plus grande différence provient des fenêtres avec une augmentation de la température moyenne de 1,9 et 2,2 °C pour C3 et SA respectivement à l'essai 5.2. Ensuite, c'était suivi par la température de plancher au SA où la température moyenne a augmenté de 0,9 °C avec l'essai 5.2.

Les différences de température moyenne de l'air entre les essais 5.1 et 5.2 étaient aussi relativement semblables pour toute la période étudiée. La plus grande différence se situe au SA avec une augmentation de la température moyenne de 0,8 °C à l'essai 5.2. La Figure 4.24 présente les PMV simulés en fonction des T_o obtenues à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit pour les pièces SS1, SA et C3. Les sensations thermiques et les T_o étaient un peu plus étendues avec l'essai 5.2. Dans EnergyPlus, la T_o est calculée ainsi : 0,5 x température moyenne de l'air +0,5 x température moyenne radiante (\bar{T}_r).

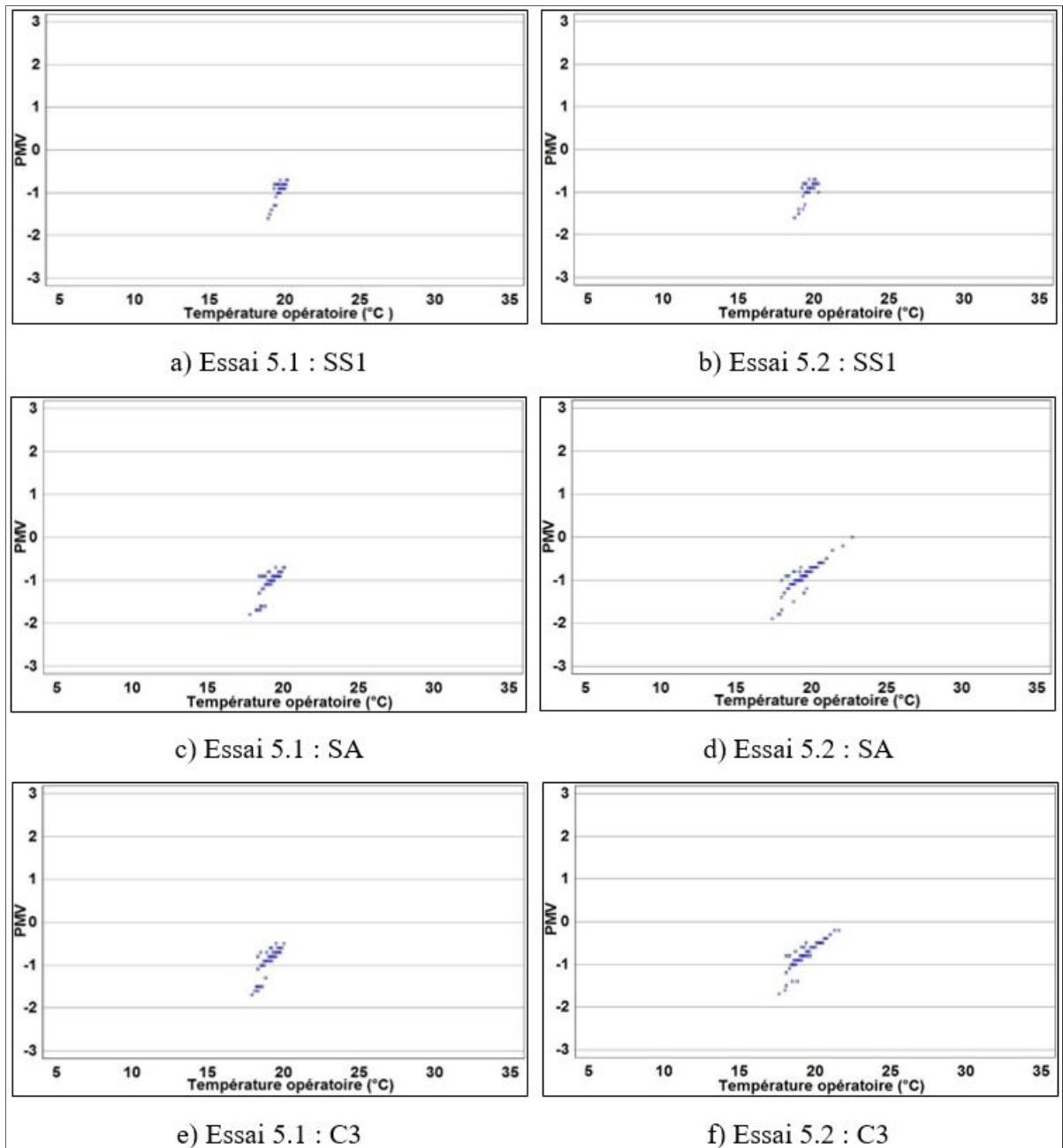


Figure 4.24 : PMV simulés en fonction de la température opératoire des pièces sous-sol 1, salon et chambre 3 à la suite d'abaissements combinés aux essais 5.1 et 5.2

Les températures de surface intérieure mesurées et simulées ont été comparées entre elles pour le plancher, le mur extérieur et la fenêtre. De même, les températures moyennes de l'air mesurées et simulées de toutes les pièces ont aussi été comparées. La Figure 4.25 présente les écarts de température moyenne pour la surface intérieure des assemblages, et la Figure 4.26 les

écart pour les températures moyennes de l'air durant les cinq journées étudiées (28 février au 3 mars 2016). Une valeur négative signifie que les températures simulées étaient plus élevées que les températures mesurées.

Pour les deux essais, les températures moyennes de surface intérieure mesurées des planchers et des murs étaient plus élevées que les températures simulées. Cependant, au RDC, les températures simulées étaient quelquefois plus élevées durant les abaissements et au début des reprises. À l'étage, dans la SB, les températures simulées étaient plus élevées durant le jour, seulement avec un rayonnement solaire élevé. Néanmoins, les écarts moyens entre les températures de surface mesurées et simulées étaient relativement faibles. La pièce ayant obtenu le plus grand écart était la C2 avec 1,5 °C et un écart type de 0,7 °C, et ce, pour les températures du mur de l'essai 5.1.

En ce qui concerne les fenêtres de l'essai 5.1, les températures de surface intérieure simulées étaient généralement plus élevées à l'exception des journées où le rayonnement solaire était élevé. Au contraire, à l'essai 5.2, les données mesurées étaient généralement plus élevées. Entre les données mesurées et les données simulées, les écarts moyens absolus des températures de surface sont plus grands dans le cas des fenêtres que dans celui des planchers et des murs, et cela, de façon encore plus marquée à l'essai 5.2.

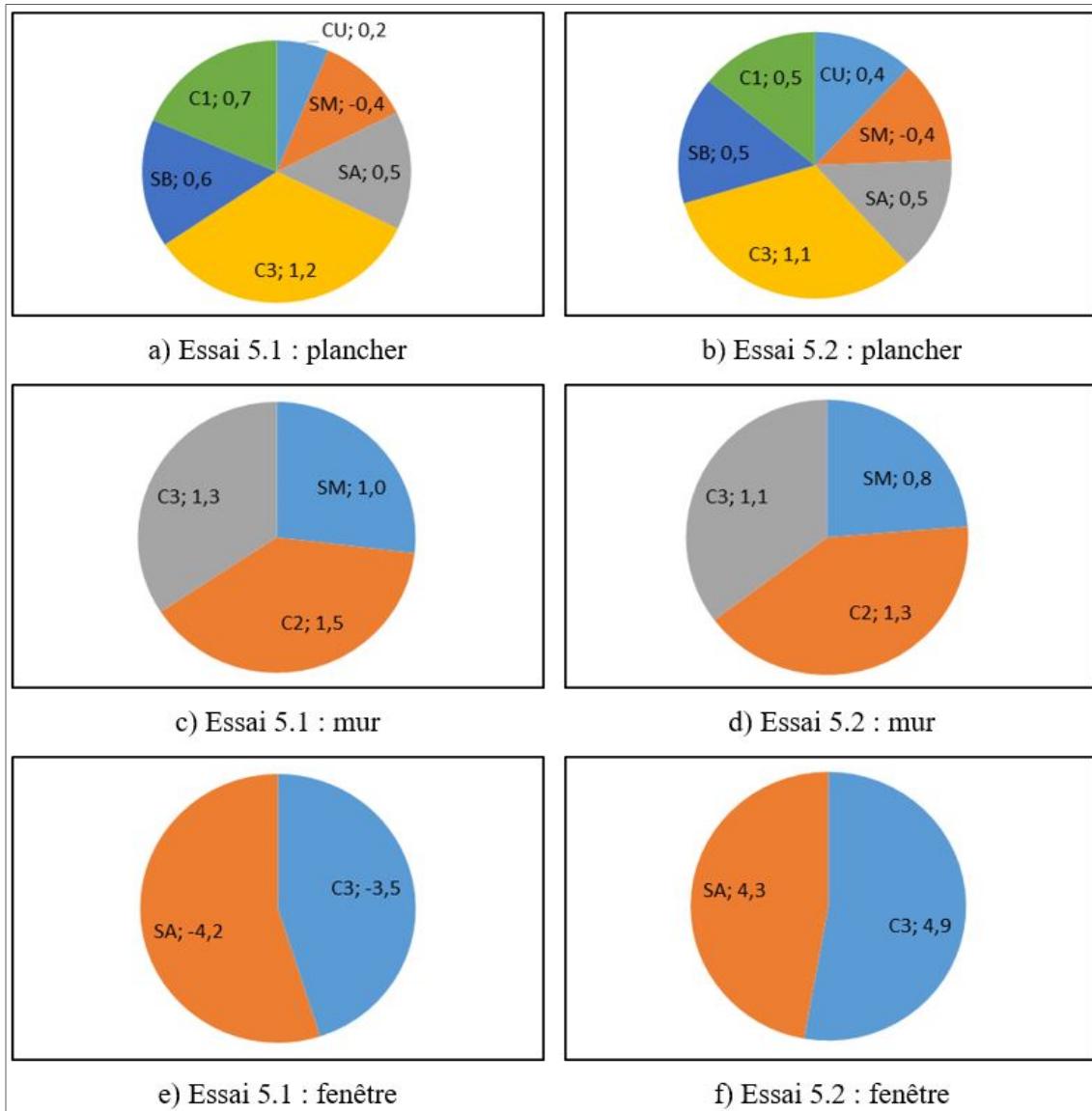


Figure 4.25 : Écart de la température de surface intérieure mesurée et simulée par pièce (2016-02-28 00:00 au 03-04 00:00)

En ce qui concerne les températures moyennes de l'air, celles simulées étaient généralement plus élevées avec les deux essais. De plus, les températures simulées ont diminué plus rapidement au début de l'abaissement de la température de consigne et augmenté plus rapidement lorsque la température de consigne augmentait. Les températures moyennes de l'air simulées ont respecté celles programmées sur les thermostats. Par exemple, lorsque le thermostat était programmé à 21 °C, la température de l'air simulée a rarement été au-dessus à l'exception de l'essai 5.2 lors des journées avec un rayonnement solaire élevé. Aussi, la

température de l'air simulée n'a pas descendu en dessous de 17 °C lors d'abaissements de la température à l'exception de la pièce CU. Ceci peut s'expliquer par le fait que la CU est à aire ouverte avec le hall d'entrée où la plinthe électrique est installée. Il y avait un plus grand volume à chauffer, et la capacité de la plinthe n'est peut-être pas suffisante. De plus, cette pièce avait le plus petit écart moyen entre les données mesurées et simulées pour les cinq journées étudiées soit de 0 °C avec un écart type de 0,8 °C à l'essai 5.1 et de 0,9 °C à l'essai 5.2. Dans les autres pièces, les écarts moyens étaient faibles aussi, soit un maximum de -1,1 °C avec un écart type de 0,8 °C au SS1 à l'essai 5.1.

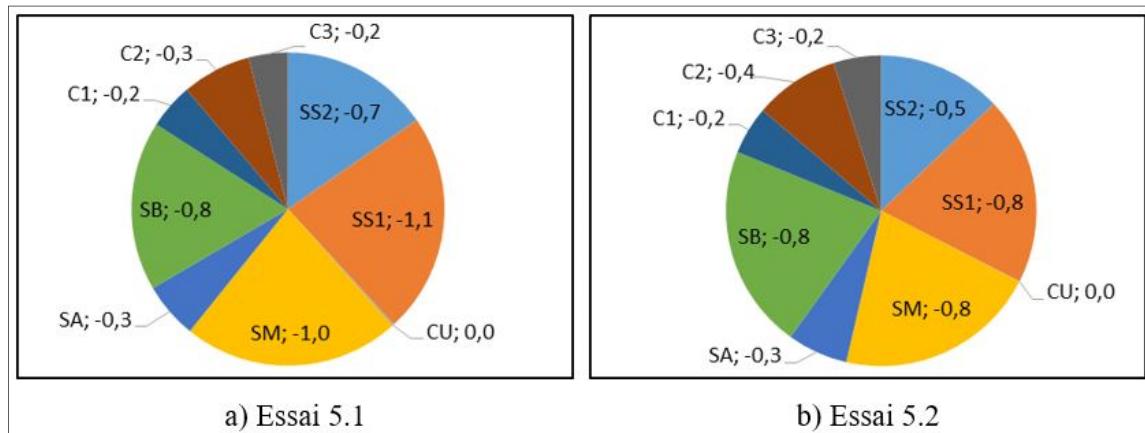


Figure 4.26 : Écart de la température moyenne de l'air mesurée et simulée par pièce
(2016-02-28 00:00 au 03-04 00:00)

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Une évaluation du confort thermique à la suite d'abaissements de la température serait complète si les opinions et les votes réels d'occupants étaient inclus dans l'analyse comme l'ont fait entre autres Ioana et al. (2016) ainsi que Zhang, de Dear et Candido (2016). Toutefois, lorsque ces informations ne sont pas disponibles, comme c'est le cas des analyses effectuées avec les MEEB, une approche plus générique, à l'instar de celles proposées par l'ASHRAE 55-2013 et Fanger (1972), permet tout de même une analyse pertinente des conditions de confort.

La durée de la période d'analyse ainsi que le nombre de jours et de pièces étudiées ont eu un impact sur les résultats. Lorsque la période était longue, les conditions intérieures devenaient plus stables. Plusieurs journées étudiées par essai ont permis d'émettre des tendances plus justes des résultats. Un petit nombre étudié de pièces par étage peut entraîner des tendances fautives sur un étage. Les pièces sont indépendantes à l'exception de la CU et du hall d'entrée qui constituent une aire ouverte. Les résultats ont démontré que l'orientation cardinale des pièces a influé sur les conditions intérieures. Donc, généraliser les résultats par étages n'est pas idéal.

L'analysant des données mesurées, a permis de constater que les maisons jumelles ne réagissaient pas toujours similairement, peu importe si elles étaient en équilibre thermique ou à la suite d'essais. Cela dit, même si elles sont de construction identique et à proximité, il peut y avoir des différences, qui ont été observées, entre autres, avec les vitesses de l'air et les températures au sous-sol.

Les lignes qui suivent présentent une discussion générale incluant les résultats des critères de confort et du modèle de Fanger (1972) avec les données mesurées in situ. Tout d'abord est présentée une synthèse sur l'effet des fenêtres dégagées sur les conditions intérieures. Puis, les sujets suivants sont discutés : l'effet de la stratification thermique, les températures de surface,

les abaissements répétitifs, le taux d'humidité et la comparaison entre les votes d'occupants et les PMV. Enfin, est présentée l'évaluation du confort thermique avec des simulations.

5.1 Évaluation du confort thermique avec des données mesurées in situ

5.1.1 Comparaison entre les fenêtres couvertes et dégagées

Il existe une différence non négligeable entre les effets du dégagement des fenêtres dégagées lors d'abaissements de la température combinés de jour et de nuit : des effets positifs et négatifs tant sur le bâtiment que sur le confort.

Le surplus de gain de chaleur, provenant du rayonnement solaire élevé durant le jour, avait un effet positif à la suite d'un abaissement combiné de jour. Il a permis d'obtenir des températures opératoires (T_0) et de plancher ainsi que des indices PMV plus élevés, voir même acceptables au moment même de la reprise. Par le fait même, le temps de récupération avait généralement diminué pour les pièces qui bénéficiaient de ce gain de chaleur. De plus, la consommation de chauffage avait diminué, ce qui a permis de réduire la demande d'énergie instantanée durant les heures de pointe dans quelques pièces.

Les pertes de chaleur par les fenêtres dégagées durant la nuit avaient un effet négatif à la suite d'abaissements combinés de nuit particulièrement lors des nuits froides. La T_0 était plus basse au début de la reprise pour l'occupant du SA, et le temps de récupération était plus long. La différence verticale de la température de l'air était plus élevée durant la nuit et les journées nuageuses. Par exemple, il peut y avoir des infiltrations d'air à travers les joints des ouvertures muraux au niveau du plancher comme dans la SM, qui est munie d'une porte-patio. Ceci peut expliquer les températures de l'air froides de cette pièce. La consommation de chauffage a augmenté durant la nuit dans quelques pièces. De plus, les fenêtres dégagées ont amplifié l'inertie thermique du béton au sous-sol lors des abaissements de la température en ce qui concerne la température de surface du plancher (température de surface des murs de fondation non vérifiée).

5.1.2 Effet de la stratification thermique

L'évaluation des critères de confort qui incluaient la température de l'air et les différences verticales de la température a permis de noter l'effet de la stratification thermique. Les températures de l'air étaient plus élevées à l'étage, et le temps de récupération y était le plus court. Ceci démontre que la chaleur a migré rapidement vers l'étage supérieur. Cependant, la pièce orientée sud du RDC (SA) a obtenu en après-midi des températures de l'air comparables à celles de l'étage. Le gain de chaleur était élevé dans cette pièce puisque le soleil est bas en hiver.

Un abaissement durant la nuit a plus affecté au début de la reprise les T_o du RDC que celle des autres étages. Le temps de récupération pour atteindre une T_o de 20 °C pouvait être plus long que celui des autres étages. Ceci s'explique par le fait que, durant l'abaissement, sa chaleur a monté vers l'étage supérieur. De même au RDC, il pouvait y avoir une augmentation de la consommation de chauffage avec des abaissements de la température (Jacquet, Le Bel et Monfet, 2017). De plus, cet étage était plus vulnérable aux infiltrations d'air en raison de l'effet de cheminée. D'ailleurs, la vitesse de l'air n'a pas été investiguée puisqu'elle était sous la limite acceptable et n'affectait donc pas le confort. Aussi, après un abaissement de nuit combiné avec les fenêtres dégagées, les différences maximums de température entre le plafond et le plancher étaient un peu plus élevées pour le RDC. Les températures de plancher étaient plus froides, mais avec la stratification thermique le plafond se réchauffait rapidement. Cependant, les températures de plancher de la CU n'ont pas autant varié puisque cette pièce et le hall d'entrée, situé au sud-ouest, constituent une aire ouverte et que la CU est isolée de l'extérieur par le garage attenant à la maison. Au sous-sol, les différences de la température entre le plafond et le plancher étaient élevées. Ceci s'explique par le fait que la différence de hauteur est plus grande qu'aux autres étages. C'est-à-dire que le plafond n'est pas fini et que le thermocouple est installé sur la surface du contreplaqué du plancher au RDC, mais du côté du SS1.

Une quantité de chaleur abondante a été distribuée par les plinthes électriques à la suite des abaissements. Cette chaleur s'élevait rapidement vers les étages supérieurs. Durant la première

heure de la reprise, la température de l'air augmentait rapidement au RDC et à l'étage et n'était pas uniforme à différentes hauteurs dans une pièce. Tandis qu'au sous-sol, la température de l'air prenait plus de temps à se réchauffer. Ainsi, les limites n'ont pas été respectées concernant les critères de la différence verticale de la température de l'air et de la variation de la T_o avec le temps. Cependant, une étude a évalué le confort avec des cycles de la température dans un climat chaud, et les occupants ont accepté de plus grandes variations de la T_o avec le temps (Zhang, de Dear et Candido, 2016). Mais encore, la T_o était inférieure à la zone de confort pour une isolation des vêtements de 0,5 clo. De plus, les occupants ont toléré de moins grandes variations avec une augmentation de la T_o qui se rapprochait de celle qui est neutre. Donc, il se pourrait qu'une augmentation rapide de la température de l'air soit acceptable après des abaissements dans un climat froid.

L'effet de la stratification thermique de l'air a été observé avec des stratégies d'abaissements de la température dans les maisons du CCTR (Manning et al., 2005) et du LTE (Jacquet, Le Bel et Monfet, 2017). De plus, selon des votes d'occupants, la sensation thermique de froid à chaud évolue en fonction de la température de l'air intérieure plus élevée avec les étages supérieurs (Ioana et al., 2016).

5.1.3 Température de surface

Les températures de surface intérieure des planchers et des murs extérieurs semblaient être affectées par les conditions extérieures selon l'orientation cardinale des pièces. Comme démontré avec les résultats, les pièces orientées au nord et à l'est étaient principalement affectées par les températures extérieures ; celles au sud et à l'ouest par le rayonnement solaire.

Les températures de surface intérieure des murs extérieurs semblaient aussi être affectées par les matériaux qui componaient les murs (ossature de bois ou béton) ainsi que les revêtements extérieurs tels que la brique et le vinyle. La brique et le béton avec l'effet de l'inertie thermique ont fait varier les températures de surface intérieure avec un délai dans le temps. Les résultats des différences de température entre les murs et l'air des pièces ont démontré que le mur prenait

généralement plus de temps à se réchauffer à la suite d'abaissements. À la suite des abaissements, les écarts étaient plus grands à l'étage puisque la température de l'air se réchauffait rapidement à cause de la stratification thermique. Les écarts étaient acceptables, mais tout de même près de la limite de 2,5 °C. Au sous-sol, les écarts maximums étaient atteints au moins 1 h après la reprise. Des surfaces plus froides affectent la température de l'air ambiant et ainsi demandent plus d'énergie de chauffage (Poehlman, Mesher et Meadowcroft, 1988) et (Manning et al., 2005). Il en est de même pour le confort puisque la température moyenne radiante a environ 40 % plus d'effet sur le confort thermique que la température de l'air (Ching, Adams et Saint-Pierre (adapt.), 2001 c2003). Les occupants risquent d'être plus sensibles à ces écarts déjà que la température de l'air n'était pas élevée (moins de 21 °C).

Les températures de surface du mur des pièces SM et C2 augmentaient plus rapidement que les autres pièces. Le thermocouple sur la surface intérieure du mur de la C2 semble être positionné dans la zone de distribution du système de chauffage. Les plinthes électriques sont généralement installées le long d'un mur extérieur avec des fenêtres afin de pallier la différence par radiation avec l'air ambiant. Ce mode de distribution de chaleur monte le long du mur selon la largeur de la plinthe et s'accumule au plafond (Figure 5.1). Tandis que dans la SM, le thermocouple est positionné à côté de la porte-patio. Donc, il est affecté par les conditions extérieures. Une autre hypothèse, il est positionné au-dessus du registre de diffusion de l'air pour le chauffage central.

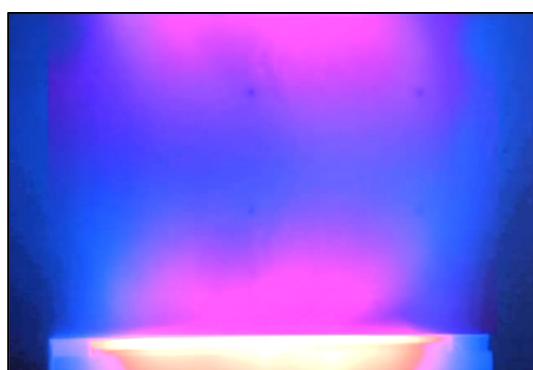


Figure 5.1 : Distribution de chaleur d'une plinthe électrique
Tiré d'une vidéo de Convectair (2012)

Les planchers du RDC ont atteint une température de 20 °C avant ceux de l'étage à l'exception de la C3 qui l'a atteinte rapidement aussi (pièce orientée sud). Ceci peut s'expliquer encore une fois par le fait que le plafond au sous-sol n'est pas fermé. Donc, le plancher au RDC a été réchauffé par transfert de chaleur par conduction puisque la température de l'air dans les solives de plancher au sous-sol était élevée. Les inversions de la température de surface du plancher qui se sont produites au sous-sol, à la CU et à l'étage peuvent s'expliquer par deux hypothèses. La première hypothèse explique à l'aide du transfert de chaleur de la surface chaude du plafond du RDC vers le plancher de l'étage. La deuxième explique par l'inertie thermique du béton au SS1 et du recouvrement de céramique qui est un matériau conducteur dans les pièces CU et SB. De plus, le fait que ceci s'est produit surtout au début de la période d'abaissement combiné de jour (8 h) peut s'expliquer par l'air chaud qui s'élève en raison de la grande quantité de chaleur fournie par les plinthes électriques en peu de temps.

5.1.4 Abaissements répétitifs

Des abaissements répétitifs de la température semblent diminuer le confort au sous-sol seulement. Ceci s'explique par les murs de fondation et la dalle en béton qui ont une masse thermique élevée. Ceux-ci emmagasinent la chaleur et la diffusent lors d'un changement de température. Cependant, lorsque les abaissements étaient répétitifs moins de chaleur a été emmagasinée. Aussi, les températures de l'air et des surfaces ainsi que les indices PMV ont pris plus de temps pour atteindre un seuil acceptable à partir de la reprise (plus de 1 h). Ceci était aussi attribuable à la stratification thermique. De plus, les températures de la dalle tendaient à diminuer à chaque abaissement répétitif, ce qui peut être attribuable aussi au fait que la dalle n'est pas isolée. Dans la maison test des MEEB, le sous-sol avait le temps de récupération et la demande de pointe de chauffage les plus longs en raison de l'effet de masse (Jacquet, Le Bel et Monfet, 2017). Il en est de même concernant le confort thermique puisque les échanges thermiques du corps humain avec l'environnement comptent pour beaucoup : pour 35 % par convection et pour 35 % également par rayonnement (Guide Bâtiment Durable, 2013).

Les températures du sol sont plus stables que celles de l'air extérieur, et ceci s'est reflété sur les conditions intérieures du sous-sol. Entre autres, les températures de surface de la dalle avaient les plus petites amplitudes lors de la reprise. De plus, les fenêtres sont plus petites, donc, moins de gain de chaleur provenant du rayonnement solaire et, aussi, de perte. Néanmoins, l'analyse des conditions intérieures au sous-sol est plus complexe. Comme le démontre Armstrong (2011), les températures de surface intérieure des murs de béton proches du niveau du sol réagissent rapidement aux conditions extérieures. Tandis que celles qui se rapprochent du niveau de plancher sont affectées par la température extérieure sur une période plus longue.

Il est fréquent que le sous-sol d'une résidence soit inhabité. Cependant, il est plutôt question du type de matériau utilisé, soit ceux ayant une capacité thermique élevée. Des abaissements de la température créent un déséquilibre thermique dans ces matériaux, et ils n'emmagasinent pas assez de chaleur à cause des abaissements répétitifs. Donc, un bâtiment avec ce genre de matériau, comme revêtement soit intérieur ou soit structural, pourrait être plus à risque d'affecter le confort des occupants avec des abaissements de la température répétitifs.

5.1.5 Taux d'humidité

Le fait que les maisons ne soient pas occupées peut avoir une incidence sur le taux d'humidité dans l'air. En effet, l'humain dégage de la vapeur d'eau ainsi que ses occupations comme la cuisine et les douches. Les risques de condensation augmentent avec des abaissements de la température (Poehlman, Mesher et Meadowcroft, 1988) et (Manning et al., 2005). L'humidité est fonction inverse de la température de l'air. Donc, le taux d'humidité augmente lorsque la température de l'air diminue. De la condensation peut alors se produire et amener la détérioration des matériaux en contact avec les surfaces froides des murs extérieurs, des fenêtres ainsi que des ponts thermiques. Dans la présente étude, les risques de condensation n'ont pas été étudiés, et le taux d'humidité était faible.

5.1.6 Vote des occupants par opposition au PMV

Les résultats des indices PMV des essais 5.1 et 5.2 étaient en dessous de la sensation neutre, généralement avec une sensation thermique d'environ -1 (Figure-A IV-1). La T_0 moyenne pour les pièces SS1, SA et C3 était environ de 20 °C avec un écart type de 1 °C pour les périodes d'analyse à la suite d'abaissements combinés de jour et de nuit.

Des votes d'occupants ont été investigués dans la région de l'Amérique du Nord, et la plage de variation acceptable de sensation thermique sur l'échelle à sept points était de ± 1 . La température opératoire oscillait entre 20,3 et 25 °C, celle neutre étant de 22,7 °C (Zhang et al., 2017). Les votes d'occupants ont démontré qu'ils ont éprouvé une sensation de froid plus grande que les prévisions, c'est-à-dire qu'ils ont ainsi éprouvé un inconfort plus grand que les votes prévus (PMV) lorsque la température opératoire descendait sous la température de sensation de confort thermique neutre (Figure 1.8).

Cela démontre que dans les conditions étudiées de présent mémoire, les occupants risquent de ressentir le froid plus que prévu et d'en éprouver un plus grand inconfort puisque les indices de confort étaient en dessous de la sensation neutre, la température opératoire étant plus basse. Il est à noter qu'avec l'étude des votes d'occupants, l'isolation des vêtements était en moyenne de 0,79 clo tandis qu'il était de 1 clo avec le calcul de l'indice PMV.

Un PMV de -1, légèrement froid, correspond à un PPD d'environ 25 %. Cependant, l'ajout d'un pourcentage supplémentaire d'inconfort local de 10 %, qui peut être ressenti sur une partie du corps, le PPD atteint 35 % (ASHRAE 55, 2013). Considérant qu'une maison unifamiliale comprend en moyenne quatre occupants, il y aurait au moins une personne insatisfaite du point de vue thermique. Une plage de sensation thermique de ± 1 semble élevée pour assurer le bien-être des occupants dans un bâtiment résidentiel.

En résumé, les résultats obtenus selon les critères de confort et selon le modèle de Fanger (1972) étaient souvent affectés par les mêmes facteurs à savoir : l'effet de la stratification

thermique et les abaissements répétitifs. Le Tableau 5.1 associe les critères selon leur(s) facteur(s) dominant(s). De plus, les critères qui ont respecté les limites de l'ASHAE 55-2013 y sont indiqués. Bien entendu, les conditions environnementales extérieures ont agi comme un facteur omniprésent.

Tableau 5.1 : Résumé de l'évaluation du confort thermique

Critère de confort	Effet de la stratification thermique	Abaissements répétitifs	Limite ASHRAE 55-2013 respectée
Température opératoire	✓	✓	
Variation de la température opératoire avec le temps	✓		
Différence verticale de la température de l'air	✓		*
Température de surface du plancher		✓	
Plafond plus chaud que le plancher	✓	✓	✓
Mur plus froid que l'air		✓	✓
Courant d'air			✓
Indices PMV et PPD	✓		

* La limite n'a pas été respectée seulement au début de la reprise, et ce pour une période de 1 h ou moins environ.

Une température de consigne de 21 °C ne semble pas suffisante pour assurer le confort thermique des occupants. De plus, il faut prévoir un temps de récupération d'au moins 1 h

avant que les conditions intérieures deviennent stables. L'environnement risque d'être inconfortable pour les occupants pendant ce temps d'attente.

5.2 Évaluation du confort thermique avec des simulations

Les simulations énergétiques sont fréquemment utilisées en conception ou pour la prédition d'un comportement lors d'une réfection. Toutefois, ces outils théoriques ne prédisent pas avec autant de certitude que les essais expérimentaux. Les indices PMV et PPD calculés de l'essai 5 ont été comparés avec ceux de simulations en mode dynamique réalisées avec le programme EnergyPlus. Globalement, les PMV calculés et simulés avaient des similitudes en termes de variation selon les conditions environnementales. Toutefois, les simulations montrent généralement des indices de sensation thermique un peu plus élevés que les indices calculés. Les différences entre les résultats calculés et ceux obtenus par simulations peuvent provenir de multiples facteurs. Les principaux facteurs observés résident dans les paramètres entrés dans EnergyPlus, les conditions environnementales extérieures et intérieures. En outre, les données du fichier météo téléchargé avaient des différences par rapport aux données mesurées in situ des MEEB.

Comme il est mentionné sur le site des MEEB (voir note de bas de page 1), des améliorations peuvent être apportées à l'évaluation du transfert de chaleur à travers les murs de fondation et la dalle. Des températures de surface extérieure des murs de fondations et de la dalle ont été entrées dans le modèle des MEEB d'EnergyPlus pour chaque mois de l'année. Donc, ces températures ont été contrôlées, et par le fait même, le transfert de chaleur dans ces assemblages. Ceci peut expliquer les écarts entre les résultats simulés et les résultats calculés en ce qui concerne le sous-sol puisque la plupart des grands écarts se trouvent à cet endroit.

Aussi, inversement à ce qui a été mentionné, c'est le rayonnement solaire réfléchi sur le sol qui, dans les simulations, semble avoir une lacune de calcul lorsque le rayonnement solaire horizontal est bas. Même avec l'ajout d'une valeur de réflectance pour représenter le rayonnement solaire réfléchi par le sol (neige) n'améliore pas le PMV. Aussi, lorsque la

température extérieure était très basse, les pertes de chaleur par les fenêtres dégagées étaient plus élevées dans les résultats simulés. Dans ce cas, le temps de récupération pour atteindre un PMV de -1 était prolongé.

Les indices de confort dépendent, entre autres, des températures de surface et de l'air. En comparaison avec les données mesurées, les températures simulées de surface intérieure étaient généralement plus basses, et celles de l'air étaient plus élevées. Aussi, la température moyenne de l'air simulée était monotone. C'est-à-dire qu'elle devenait constante aux températures programmées des thermostats, à 21 °C peu de temps après la reprise, à 17 °C pendant les abaissements. Par contre, celle de la CU ne l'était pas autant. Une hypothèse est que la chaleur provenant de la plinthe électrique n'est pas répartie uniformément dans l'aire ouverte du hall d'entrée et de la CU. Donc, il y avait des asymétries de la température de l'air, et par le fait même, le confort peut en être affecté. En simulation, il est possible de représenter le transfert de chaleur entre différentes zones par un flux de chaleur interzonal (Fournier et Leduc, 2014) comme effectué dans le modèle des MEEB d'EnergyPlus. De plus, les différences de températures moyennes de l'air entre celles mesurées et simulées de la CU étaient nulles. Ceci démontre le potentiel d'EnergyPlus à reproduire le flux de chaleur interzonal.

5.3 Recommandations

Quelques ajustements peuvent être fait afin d'améliorer le confort thermique. Il y a l'option de s'adapter aux conditions intérieures avec l'isolation des vêtements et le type d'activité effectué. Aussi, il y a l'option d'augmenter la température de consigne des thermostats ainsi que de laisser les fenêtres dégagées le jour, afin de bénéficier du gain solaire, ayant pour effet d'augmenter la température opératoire. Les fenêtres recouvertes la nuit vont permettre de réduire les pertes de chaleur par les fenêtres. Il faut prévoir une période de récupération de plus d'une heure à la suite d'abaissements pour être moins affecté par les variations de la température. Par contre, il est mentionné que certaines améliorations du confort thermique peut faire augmenter la consommation de chauffage ainsi que la demande d'énergie sur le réseau de distribution en hiver aux heures de pointe et par le fait même les gaz à effet de serre.

CONCLUSION

Une grande part de la consommation d'énergie résidentielle est allouée au chauffage d'où l'intérêt des clients a tenté de la diminuer. L'un des moyens le plus courant et accessible consiste en des abaissements de la température de consigne aux thermostats. L'impact de ces abaissements sur le confort thermique lors de la reprise, c'est-à-dire lorsque le thermostat tente d'atteindre sa température de consigne, est peu abordé. Bien qu'il y ait des normes concernant les conditions qui procurent un environnement thermique acceptable pour les occupants; elles s'emploient généralement en condition d'équilibre thermique. Elles servent toutefois de référence pour l'évaluation du confort thermique. De plus, il y a peu d'études comparatives en climat froid puisqu'elles sont principalement réalisées en climat chaud.

L'objectif de la présente recherche était donc d'évaluer et d'analyser l'impact des abaissements de la température aux thermostats en mode chauffage sur le confort thermique des occupants. Pour ce faire, des données mesurées in situ des MEEB du LTE ont été utilisées aux fin de l'évaluation du confort thermique selon les critères de l'ASHRAE 55-2013 et à l'aide du modèle de Fanger (1972). Ensuite, les résultats in situ ont été comparés avec ceux obtenus par simulations en mode dynamique réalisées avec EnergyPlus avec pour intention de déterminer le potentiel de ce programme à assister le processus de conception de scénarios d'abaissements de la température.

Les résultats ont démontré que le confort thermique n'était pas atteint dans les MEEB à la suite d'abaissements de la température selon les deux types d'évaluation utilisés. Seulement trois critères sur sept de l'ASHRAE 55-2013 ont été respectés tandis que les quatre autres n'ont pas été respectés ou le temps de récupération était long. En ce qui concerne les indices de confort, un PMV d'environ -1 était généralement atteint, soit un PMV inférieur à celui recommandé de $\pm 0,5$. La comparaison des résultats calculés avec ceux simulés a démontré qu'il y avait des similitudes, et que les écarts moyens étaient de 0,5 et moins. Les principaux facteurs à la source des différences observées étaient les paramètres entrés dans EnergyPlus; les conditions environnementales extérieures et intérieures.

Des abaissements de la température ont eu un impact sur l'effet de la stratification thermique entre les étages. Des abaissements répétitifs ont affecté l'inertie thermique des matériaux ayant une masse volumique élevée et, par le fait même, le confort. De plus, l'orientation cardinale des pièces est un facteur à considérer relativement au confort thermique.

La présente étude n'avait pas pour objet d'évaluer le confort avec des votes réels d'occupants. Des configurations différentes des pièces et du nombre d'étages ne donneraient pas les mêmes résultats. Aussi, il peut être intéressant d'analyser d'autres scénarios d'abaissements ainsi que différentes amplitudes de température et de comparer leurs effets sur le confort. Néanmoins, il est à se demander si une économie d'énergie de l'ordre d'environ 10 %, lorsque des abaissements de la température ont eu lieu durant la nuit ou le jour, est suffisante pour justifier un environnement intérieur inconfortable à la suite de ces abaissements.

ANNEXE I

ÉTUDE DE CAS : DESCRIPTION DES POINTS DE MESURES

Tableau-A I-1 : Description des points de mesures utilisés dans l'analyse des données

Type	Nom point de mesure	Description
Météo	M-RS-THOR	Rayonnement solaire horizontal (Wh/m ²)
	M-RS-TVER	Rayonnement solaire vertical (Wh/m ²)
	M-TSEC	Température de l'air extérieure (°C)
Mur de fondation P représente le plan : B (maison 2) et C (maison 1).	T40-P-h	Température surface intérieure du gypse à 2133,6 mm à partir de la solive du plancher au RDC (°C)
	T38-P-h	Température surface intérieure du gypse à 1524 mm à partir de la solive du plancher au RDC (°C)
	T35-P-h	Température surface intérieure du gypse à 1066,8 mm à partir de la solive du plancher au RDC (°C)
	T32-P-h	Température surface intérieure du gypse à 838,2 mm à partir de la solive du plancher au RDC (°C)
	T29-P-h	Température surface intérieure du gypse à 457,2 mm à partir de la solive du plancher au RDC (°C)
Mur extérieur X représente le numéro de la pièce : 1 (C2); 2 (C3); 3 (C1) et 4 (SM).	TMx-0-h	Température surface intérieure du gypse (°C)
	TMx-1-h	Température surface extérieure du gypse (°C)
	TMx-2-h	Température surface intérieure du panneau isolant (°C)
	TMx-3-h	Température surface extérieure du panneau isolant (°C)
	TMx-4-h	Température surface intérieure du carton fibre (°C)
	TMx-5-h	Température surface extérieure du pare-air (°C)
	TMx-6-h	Température surface intérieure du revêtement extérieur (°C)
	TMx-7-h	Température surface extérieure du revêtement extérieur (°C)

Type	Nom point de mesure	Description
Plancher sous-sol P représente le plan : B (maison 2) et C (maison 1).	T41-P	Température surface intérieure de la dalle à 889 mm à partir de la surface extérieure du béton du mur de fondation (°C)
	T46-P	Température surface intérieure de la dalle à 1651 mm à partir de la surface extérieure du béton du mur de fondation (°C)
	T50-P	Température surface intérieure de la dalle à 2413 mm à partir de la surface extérieure du béton du mur de fondation (°C)
Plancher X représente le numéro de la pièce : 1 (SA); 2 (SM); 3 (CU), 4 (C3), 5 (C1) et 6 (SB).	TPLx-0-h	Température surface intérieure du plafond de gypse (°C) (ND plancher RDC)
	TPLx-1-h	Température surface extérieure du plafond de gypse (°C) (ND plancher RDC)
	TPLx-2-h	Température, dans l'espace d'air, environ à mi-hauteur de la solive ajourée (°C) (ND plancher RDC)
	TPLx-3-h	Température surface intérieure du contreplaqué (°C)
	TPLx-4-h	Température surface du plancher (°C)
Plafond de l'étage X représente le numéro de la pièce : 1 (C3) et 2 (C1).	TTx-0-h	Température surface intérieure du plafond de gypse (°C)
	TTx-1-h	Température surface extérieure du plafond de gypse (°C)
	TTx-2-h	Température surface intérieure du panneau isolant (°C)
	TTx-3-h	Température surface extérieure du panneau isolant (°C)
	TTx-4-h	Température dans l'air de l'entretoit (°C)
Température de l'air X représente le numéro de la pièce : 1 (SS1); 2 (SS2); 3 (SA); 4 (SM); 5 (C3); 6 (C1); 8 (CU); 9 (C2) et 10 (SB).	PTx-0-h	Température à la base de la perche, près du plancher (°C)
	PTx-2-h	Température à environ 610 mm de la base (°C)
	PTx-4-h	Température à environ 1219 mm de la base (°C)
	PTx-6-h	Température à environ 1829 mm de la base (°C)
	PTx-8-h	Température en haut de la perche, près du plafond, à environ 2438 mm de la base (°C)
Température radiante (sphère noire) La sphère noire est au centre de la perche (température de l'air) à environ 1219 mm du plancher.	SPHCU-h	Température radiante dans la cuisine (°C)
	SPHSM-h	Température radiante dans la salle à manger (°C)
	SPHSA-h	Température radiante dans le salon (°C)
	SPHSB-h	Température radiante dans la salle de bain (°C)
	SPHC1-h	Température radiante dans la chambre 1 (°C)
	SPHC2-h	Température radiante dans la chambre 2 (°C)
	SPHC3-h	Température radiante dans la chambre 3 (°C)

Type	Nom point de mesure	Description
Consommation de chauffage	CHSS2-h	Plinthe électrique dans le sous-sol 2 (Wh)
	CHSS-h	Plinthe électrique dans le sous-sol 1 (Wh)
	CHCU-h	Plinthe électrique dans la cuisine et dans le hall d'entrée (Wh)
	CHSM-h	Plinthe électrique dans la salle à manger (Wh)
	CHSA-h	Plinthe électrique dans le salon (Wh)
	CHSB-h	Plinthe électrique dans la salle de bain (Wh)
	CHC1-h	Plinthe électrique dans la chambre 1 (Wh)
	CHC2-h	Plinthe électrique dans la chambre 2 (Wh)
	CHC3-h	Plinthe électrique dans la chambre 3 (Wh)
Occupants <u>XX</u> représente l'étage : ET (étage), RC (RDC) et SS (sous-sol). Hauteur chevilles 0,1 m Hauteur torse 0,6 m Hauteur tête 1,1 m	OCXXANE-h	Vitesse de l'air à la tête (m/s)
	OCXXCVL-h	Température aux chevilles (°C)
	OCXXTSL-h	Température au torse (°C)
	OCXXTEL-h	Température à la tête (°C)
	OCXXCVS-h	Température radiante aux chevilles (°C)
	OCXXTSS-h	Température radiante au torse (°C)
	OCXXTES-h	Température radiante à la tête (°C)
Perches mobiles	PMXXANE-h	Vitesse de l'air à une hauteur de 2,1 m (m/s)
	PMXXHUA-h	Humidité de l'air (%)

ANNEXE II

MÉTHODOLOGIE : POINTS DE MESURES UTILISÉS PAR CRITÈRES DE CONFORT

Tableau-A II-1 : Points de mesures utilisés par critères de confort

Critère de confort	Étage	Pièce	Point de mesure
Température opératoire	SS	SS1	
	RDC	SA	T_o et T_r (voir Figure-A II-1)
	Étage	C3	
Variation de la température opératoire avec le temps	SS	SS1	
	RDC	SA	T_o (voir Figure-A II-1 a))
	Étage	C3	
Différence verticale de la température de l'air	SS	SS1	OCSSTEL-h/OCSSCVL-h
	RDC	SA	OCRCTEL-h/OCRCCVL-h
	Étage	C3	OCETTEL-h/OCETCVL-h
Température de surface du plancher	SS	SS1	T41-P-h, T46-P et T50-P
	RDC	CU, SM et SA	TPL3-4-h, TPL2-4-h et TPL1-4-h
	Étage	SB, C1 et C3	TPL6-4-h, TPL5-4-h et TPL4-4-h
Plafond plus chaud que le plancher (voir critère précédente)	SS	SS1	TPL1-3-h
	RDC	CU, SM et SA	TPL6-0-h, TPL5-0-h et TPL4-0-h
	Étage	C1 et C3	TT2-0-h et TT1-0-h
Mur plus froid que l'air	SS	SS1	T38-P-h/PT1-2-h
	RDC	SM	TM4-0-h/PT4-2-h
	Étage	C1, C2 et C3	TM3-0-h/PT6-2-h, TM1-0-h/PT9-2-h et TM2-0-h/PT5-2-h
Courant d'air	SS	SS1	OCSSANE-h
	RDC	SA	OCRCANE-h
	Étage	C3	OCETANE-h

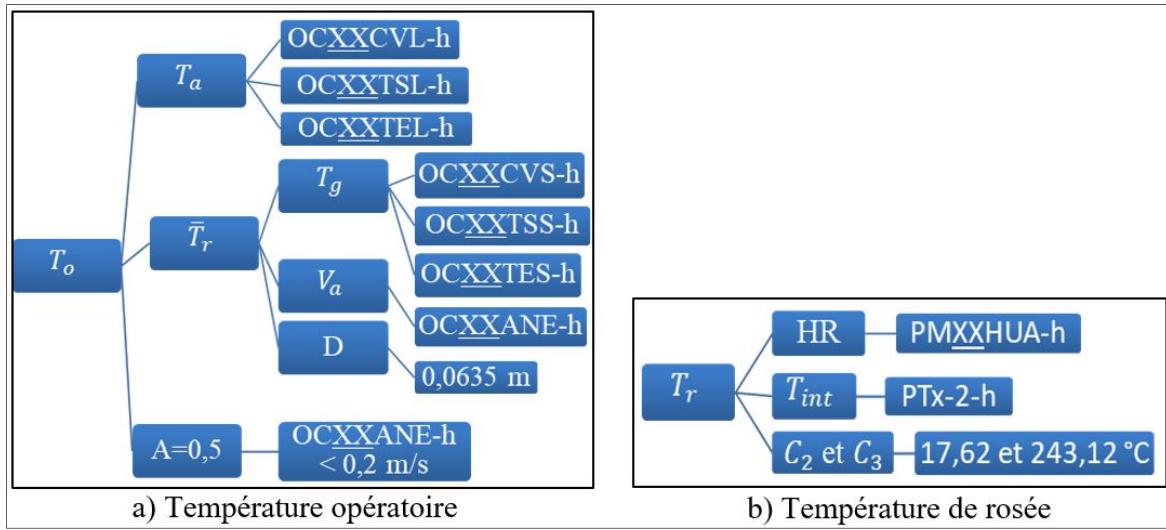


Figure-A II-1 : Points de mesures utilisés pour les calculs

ANNEXE III

RÉSULTATS : CRITÈRES DE CONFORT

Tableau-A III-1 : Variation de la température opératoire avec le temps des pièces aux premier et deuxième pas de temps à la suite d'abaissements de nuit

	Variation temps	ΔT_o (°C)					
		SS1		SA		C3	
		1er	2e	1er	2e	1er	2e
Minimum	15 min	0,5	0,5	1,5	1,2	1,6	0,9
	30 min	1,0	0,9	2,8	1,5	2,6	1,2
	1 h	1,7	1,6	3,3	1,8	3,1	1,5
	2 h	2,9	2,6	3,6	2,0	3,5	1,8
	4 h	3,4	2,9	4,0	2,4	3,7	2,0
Moyenne	15 min	0,5	0,6	1,6	1,2	1,7	0,9
	30 min	1,1	1,0	2,8	1,5	2,6	1,3
	1 h	1,9	1,7	3,3	1,8	3,2	1,6
	2 h	3,1	2,7	3,7	2,1	3,5	1,9
	4 h	3,5	3,0	4,1	2,5	3,8	2,1
Maximum	15 min	0,6	0,6	1,7	1,3	1,8	1,0
	30 min	1,2	1,1	2,9	1,6	2,7	1,3
	1 h	2,1	1,9	3,4	1,9	3,2	1,7
	2 h	3,3	2,9	3,7	2,2	3,6	2,0
	4 h	3,6	3,0	4,1	2,7	3,8	2,2

Tableau-A III-2 : Variation de la température opératoire avec le temps des pièces aux premier et deuxième pas de temps à la suite d'abaissements de nuit combinés

	Variation temps	ΔT_0 (°C)					
		SS1		SA		C3	
		1er	2e	1er	2e	1er	2e
Minimum	15 min	0,4	0,5	1,7	1,0	1,6	0,8
	30 min	0,9	0,8	2,8	1,3	2,6	1,1
	1 h	1,6	1,4	3,2	1,6	3,1	1,5
	2 h	2,7	ND	3,6	ND	3,5	ND
	4 h	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Moyenne	15 min	0,5	0,5	1,8	1,0	1,7	0,9
	30 min	1,0	0,9	2,8	1,3	2,6	1,2
	1 h	1,8	1,6	3,3	1,6	3,1	1,6
	2 h	2,9	ND	3,6	ND	3,5	ND
	4 h	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Maximum	15 min	0,6	0,5	1,9	1,2	1,8	1,0
	30 min	1,1	1,0	2,8	1,5	2,6	1,3
	1 h	1,9	1,7	3,3	1,8	3,1	1,7
	2 h	3,0	ND	3,7	ND	3,5	ND
	4 h	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tableau-A III-3 : Variation de la température opératoire avec le temps des pièces aux premier et deuxième pas de temps à la suite d'abaissements de nuit combinés (essai 5.2)

	Variation temps	ΔT_o (°C)					
		SS1		SA		C3	
		1er	2e	1er	2e	1er	2e
Minimum	15 min	0,4	0,4	1,1	1,1	1,5	0,8
	30 min	0,8	0,8	2,2	1,6	2,4	1,1
	1 h	1,6	1,4	3,2	2,0	3,0	1,5
	2 h	2,7	ND	2,2	ND	3,4	ND
	4 h	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Moyenne	15 min	0,5	0,5	1,3	1,2	1,6	0,8
	30 min	1,0	0,9	2,5	1,8	2,4	1,2
	1 h	1,8	1,6	3,3	2,2	3,0	1,6
	2 h	3,0	ND	3,8	ND	3,5	ND
	4 h	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Maximum	15 min	0,6	0,5	1,4	1,3	1,7	1,0
	30 min	1,1	1,0	2,7	2,0	2,5	1,3
	1 h	1,9	1,7	3,3	2,4	3,1	1,7
	2 h	3,2	ND	3,9	ND	3,6	ND
	4 h	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tableau-A III-4 : Variation de la température opératoire avec le temps des pièces aux premier et deuxième pas de temps à la suite d'abaissements de jour

	Variation temps	ΔT_0 (°C)					
		SS1		SA		C3	
		1er	2e	1er	2e	1er	2e
Minimum	15 min	0,4	0,5	2,0	0,3	2,0	0,6
	30 min	0,9	0,9	2,3	0,6	2,6	0,9
	1 h	1,7	1,5	2,7	0,8	3,2	1,3
	2 h	2,7	2,5	2,8	0,9	3,6	1,6
	4 h	3,2	2,7	2,9	0,9	3,9	1,8
Moyenne	15 min	0,5	0,5	2,0	0,4	2,1	0,6
	30 min	1,0	0,9	2,4	0,7	2,7	1,0
	1 h	1,7	1,5	2,8	0,9	3,2	1,3
	2 h	2,8	2,5	3,1	1,1	3,7	1,6
	4 h	3,2	2,7	3,1	1,1	3,9	1,8
Maximum	15 min	0,5	0,5	2,1	0,5	2,1	0,6
	30 min	1,0	0,9	2,6	0,8	2,7	1,0
	1 h	1,8	1,6	3,0	1,0	3,3	1,4
	2 h	2,9	2,6	3,3	1,3	3,7	1,7
	4 h	3,3	2,8	3,4	1,3	3,9	1,9

Tableau-A III-5 : Variation de la température opératoire avec le temps des pièces aux premier et deuxième pas de temps à la suite d'abaissements de jour combinés

	Variation temps	ΔT_o (°C)					
		SS1		SA		C3	
		1er	2e	1er	2e	1er	2e
Minimum	15 min	0,5	0,5	1,8	0,5	1,7	0,6
	30 min	1,0	0,9	2,4	0,7	2,6	0,9
	1 h	1,7	1,6	2,7	0,9	3,1	1,3
	2 h	2,9	2,5	3,0	1,1	3,5	1,6
	4 h	3,3	2,7	3,1	1,2	3,8	1,8
Moyenne	15 min	0,6	0,6	1,9	0,7	1,9	0,7
	30 min	1,2	1,0	2,7	1,0	2,6	1,0
	1 h	2,0	1,7	3,1	1,3	3,2	1,4
	2 h	3,1	2,6	3,4	1,5	3,6	1,7
	4 h	3,3	2,7	3,5	1,6	3,8	1,9
Maximum	15 min	0,7	0,6	2,0	1,0	2,1	0,8
	30 min	1,3	1,1	2,8	1,3	2,7	1,1
	1 h	2,2	1,9	3,3	1,6	3,3	1,5
	2 h	3,4	2,8	3,6	1,8	3,7	1,8
	4 h	3,5	2,8	3,8	2,0	3,9	2,0

Tableau-A III-6 : Variation de la température opératoire avec le temps des pièces aux premier et deuxième pas de temps à la suite d'abaissements de jour combinés (essai 5.2)

	Variation temps	ΔT_0 (°C)					
		SS1		SA		C3	
		1er	2e	1er	2e	1er	2e
Minimum	15 min	0,5	0,5	-0,7	-1,5	0,9	-0,3
	30 min	1,0	0,9	-0,7	-1,7	0,9	-0,2
	1 h	1,8	1,6	-1,1	-1,9	0,9	-0,1
	2 h	2,9	2,6	-1,5	-1,8	0,8	0,0
	4 h	3,3	2,6	-1,5	-1,8	0,9	0,0
Moyenne	15 min	0,7	0,6	1,1	-0,1	1,6	0,2
	30 min	1,3	1,0	1,0	0,0	1,8	0,4
	1 h	2,1	1,8	1,3	-0,1	2,2	0,6
	2 h	3,3	2,7	0,9	-0,2	2,2	0,7
	4 h	3,4	2,7	0,9	-0,2	2,4	0,8
Maximum	15 min	0,8	0,6	2,8	0,8	2,4	0,7
	30 min	1,4	1,1	1,9	1,6	2,2	1,2
	1 h	2,3	1,9	3,6	1,5	3,4	1,5
	2 h	3,6	2,8	2,2	1,1	2,9	1,5
	4 h	3,6	2,8	2,3	1,1	3,2	1,7

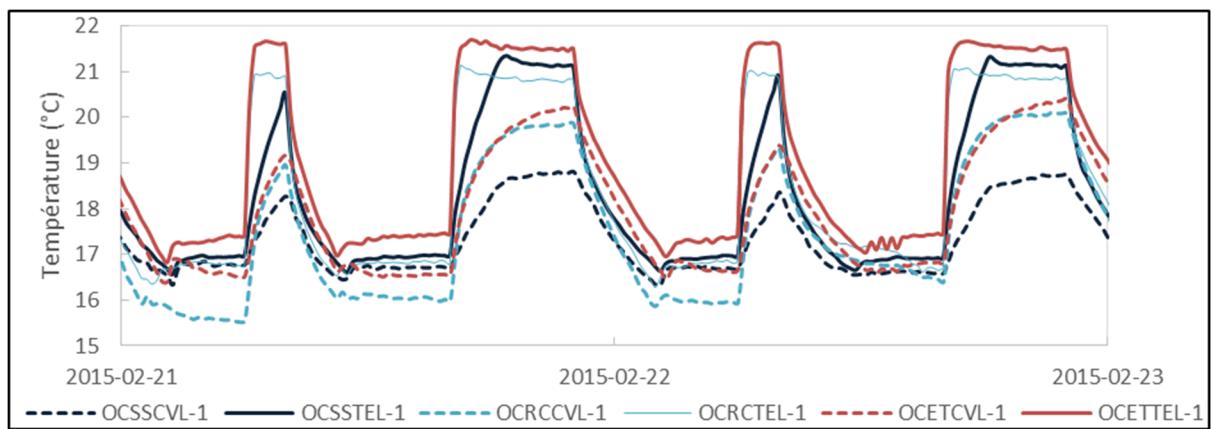


Figure-A III-1 : Températures de l'air au niveau des chevilles (OCXXCVL) et de la tête (OCXXTEL) au sous-sol 1 (SS), au salon (RC) et dans la chambre 3 (ET)
(maison test – essai 4 : abaissements combinés)

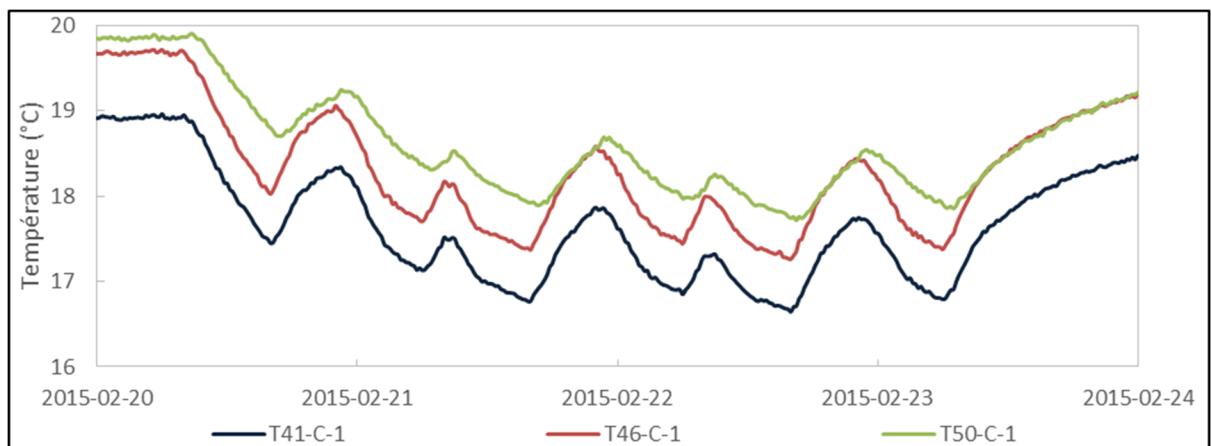


Figure-A III-2 : Températures de surface du plancher du sous-sol 1
(maison test – essai 4 : abaissements combinés)

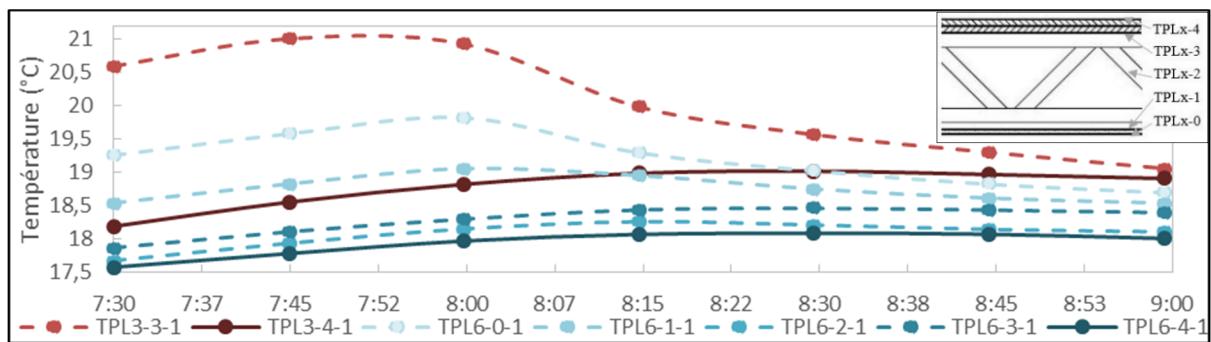


Figure-A III-3 : Températures de plancher des pièces cuisine (TPL3) et salle de bain (TPL6)
le 2 mars 2016 (essai 5.1 : abaissements combinés)

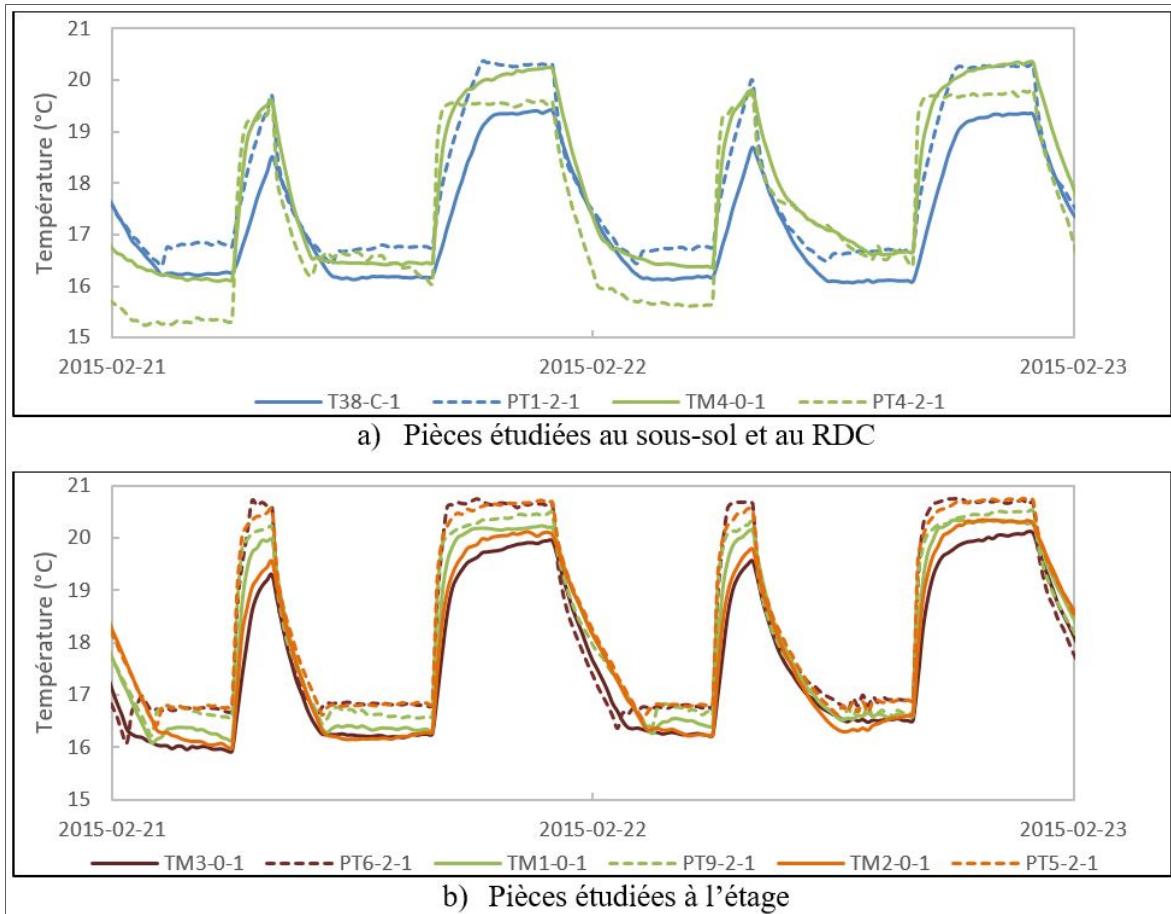


Figure-A III-4 : Températures de surface intérieure des murs et de l'air des pièces étudiées⁴
(maison test – essai 4 : abaissements combinés)

⁴ PT1-2-1 : température de l'air sous-sol 1; PT4-2-1 : température de l'air salle à manger; PT5-2-1 : température de l'air chambre 3; PT6-2-1 : température de l'air chambre 1; PT9-2-1 : température de l'air chambre 2; T38-C-1 : température de surface mur de fondation; TM1 : température de surface chambre 2; TM2 : température de surface chambre 3; TM3 : température de surface chambre 1; TM4 : température de surface salle à manger

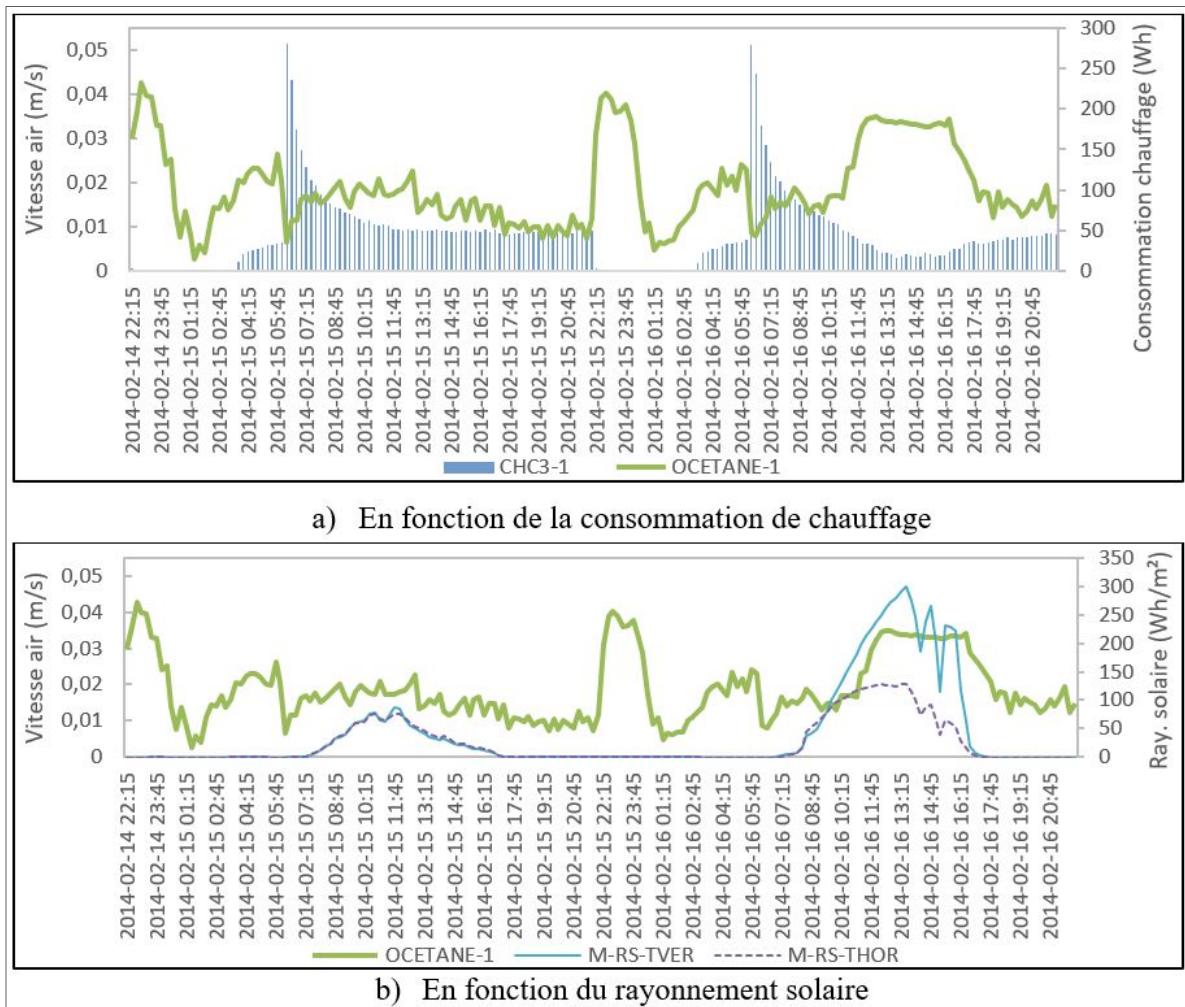


Figure-A III-5 : Vitesse de l'air dans la chambre 3⁵
(maison test essai 2 : abaissements de nuit)

⁵ CHC3-1 : consommation de chauffage chambre 3; M-RS-THOR : rayonnement solaire horizontal; M-RS-TVER : rayonnement solaire vertical; OCETANE-1 : vitesse de l'air à la tête

ANNEXE IV

RÉSULTATS : MODÈLE DE FANGER

Tableau-A IV-1 : Résumé des PMV calculés et simulés à la suite d'abaissements combinés
(essai 5.1)

Pièce	Type abaissement	PMV calculé				PMV simulé				ΔPMV moy	
		froid	moy	chaud	S	froid	moy	chaud	S		
SS2	Combiné	Jour	-1,9	-1,1	-1,0	0,2	-1,2	-0,8	-0,7	0,1	-0,3
		Nuit	-1,9	-1,3	-1,0	0,3	-1,3	-0,9	-0,8	0,2	-0,5
SS1	Combiné	Jour	-1,9	-1,1	-1,0	0,2	-1,4	-0,9	-0,8	0,1	-0,3
		Nuit	-1,9	-1,4	-1,1	0,3	-1,5	-1,0	-0,8	0,2	-0,5
CU	Combiné	Jour	-1,7	-1,1	-0,9	0,2	-1,5	-1,0	-0,9	0,1	-0,1
		Nuit	-1,9	-1,4	-1,1	0,3	-1,7	-1,2	-1,0	0,2	-0,2
SM	Combiné	Jour	-2,0	-1,0	-0,9	0,2	-1,5	-0,8	-0,7	0,2	-0,2
		Nuit	-2,0	-1,1	-0,9	0,4	-1,7	-1,0	-0,8	0,3	-0,1
SA	Combiné	Jour	-1,8	-0,9	-0,8	0,2	-1,6	-0,9	-0,8	0,2	0,0
		Nuit	-1,9	-1,0	-0,9	0,3	-1,7	-1,1	-0,9	0,3	0,1
SB	Combiné	Jour	-2,0	-1,0	-1,0	0,2	-1,5	-0,7	-0,6	0,2	-0,3
		Nuit	-2,0	-1,2	-1,0	0,3	-1,5	-0,9	-0,7	0,2	-0,3
C1	Combiné	Jour	-1,8	-0,9	-0,8	0,2	-1,5	-0,8	-0,7	0,2	-0,1
		Nuit	-1,8	-1,0	-0,8	0,3	-1,6	-1,0	-0,8	0,2	0,0
C2	Combiné	Jour	-1,9	-1,0	-0,9	0,2	-1,5	-0,8	-0,6	0,2	-0,1
		Nuit	-1,9	-1,1	-0,9	0,3	-1,6	-1,0	-0,8	0,2	-0,1
C3	Combiné	Jour	-1,9	-0,8	-0,8	0,2	-1,5	-0,7	-0,6	0,2	-0,1
		Nuit	-1,8	-1,0	-0,8	0,3	-1,6	-0,9	-0,8	0,2	0,0

Tableau-A IV-2 : Résumé des PPD calculés et simulés à la suite d'abaissements combinés
(essai 5.1)

Pièce	Type abaissement	PPD calculé				PPD simulé				ΔPPD moy	
		froid	moy	chaud	S	froid	moy	chaud	S		
SS2	Combiné	Jour	70,3	31,6	25,4	11,7	37,0	18,2	16,4	4,1	13,3
		Nuit	70,8	43,2	27,0	14,9	39,9	21,7	18,0	6,9	21,5
SS1	Combiné	Jour	71,6	33,3	26,5	12,2	44,8	20,7	18,5	4,0	12,6
		Nuit	71,8	46,6	29,4	14,4	48,9	24,9	19,8	9,8	21,7
CU	Combiné	Jour	63,9	29,6	22,3	11,2	52,0	24,5	20,4	4,8	5,1
		Nuit	71,3	46,8	29,9	13,7	60,1	34,4	25,5	11,7	12,4
SM	Combiné	Jour	75,2	25,8	22,7	10,4	52,7	18,7	14,8	5,2	7,1
		Nuit	78,8	32,6	23,6	18,1	59,2	26,4	18,1	13,5	6,3
SA	Combiné	Jour	69,0	22,3	19,5	9,9	57,4	22,4	18,4	5,5	-0,1
		Nuit	72,6	29,2	21,2	16,8	63,4	31,2	23,0	13,2	-2,0
SB	Combiné	Jour	75,5	28,3	24,1	10,4	48,4	15,9	12,0	6,2	12,4
		Nuit	76,7	35,9	27,0	16,4	52,6	23,0	16,5	11,7	12,9
C1	Combiné	Jour	68,8	21,4	18,4	10,3	52,8	18,7	14,7	6,6	2,7
		Nuit	69,0	27,0	18,8	16,8	57,6	26,6	19,5	12,3	0,4
C2	Combiné	Jour	72,8	24,6	20,7	10,5	51,3	17,7	13,6	4,8	6,9
		Nuit	72,2	30,8	22,9	16,2	55,8	25,9	19,1	11,7	4,9
C3	Combiné	Jour	70,0	20,8	17,6	10,5	48,7	16,7	12,7	4,7	4,1
		Nuit	69,3	26,4	18,8	16,6	54,4	24,8	18,3	11,5	1,5

Tableau-A IV-3 : Résumé des PMV calculés et simulés à la suite d'abaissements combinés
(essai 5.2)

Pièce	Type abaissement	PMV calculé				PMV simulé				ΔPMV moy	
		froid	moy	chaud	S	froid	moy	chaud	S		
SS2	Combiné	Jour	-1,7	-1,0	-0,9	0,2	-1,2	-0,8	-0,7	0,1	-0,3
		Nuit	-1,8	-1,3	-1,0	0,3	-1,3	-0,9	-0,8	0,2	-0,4
SS1	Combiné	Jour	-1,8	-1,1	-0,9	0,3	-1,2	-0,8	-0,8	0,1	-0,2
		Nuit	-1,8	-1,4	-1,0	0,3	-1,5	-1,0	-0,8	0,2	-0,4
CU	Combiné	Jour	-1,7	-1,0	-0,9	0,2	-1,3	-0,9	-0,9	0,1	-0,1
		Nuit	-1,9	-1,4	-1,1	0,3	-1,7	-1,2	-1,0	0,2	-0,2
SM	Combiné	Jour	-1,9	-1,0	-0,9	0,2	-1,3	-0,8	-0,8	0,1	-0,1
		Nuit	-2,0	-1,1	-1,0	0,3	-1,8	-1,1	-0,9	0,3	0,0
SA	Combiné	Jour	-1,3	-0,8	-0,5	0,1	-1,2	-0,8	-0,6	0,1	0,0
		Nuit	-1,9	-1,1	-0,9	0,3	-1,8	-1,1	-0,9	0,3	0,0
SB	Combiné	Jour	-1,9	-1,1	-1,0	0,2	-1,4	-0,7	-0,6	0,2	-0,3
		Nuit	-2,0	-1,2	-1,0	0,3	-1,6	-1,0	-0,8	0,3	-0,3
C1	Combiné	Jour	-1,8	-0,9	-0,8	0,2	-1,5	-0,8	-0,7	0,1	-0,1
		Nuit	-1,9	-1,0	-0,8	0,3	-1,7	-1,0	-0,9	0,3	0,0
C2	Combiné	Jour	-1,7	-0,9	-0,8	0,2	-1,1	-0,7	-0,6	0,1	-0,2
		Nuit	-1,9	-1,1	-0,9	0,3	-1,6	-1,0	-0,9	0,2	0,0
C3	Combiné	Jour	-1,4	-0,8	-0,6	0,1	-1,1	-0,6	-0,5	0,1	-0,2
		Nuit	-1,8	-1,0	-0,8	0,3	-1,6	-1,0	-0,9	0,2	0,0

Tableau-A IV-4 : Résumé des PPD calculés et simulés à la suite d'abaissements combinés
(essai 5.2)

Pièce	Type abaissement	PPD calculé				PPD simulé				ΔPPD moy	
		froid	moy	chaud	S	froid	moy	chaud	S		
SS2	Combiné	Jour	64,3	28,2	21,7	11,6	33,7	17,9	16,5	3,4	10,3
		Nuit	65,9	42,4	25,6	13,6	41,4	22,1	18,0	7,4	20,3
SS1	Combiné	Jour	68,5	29,5	22,4	12,5	37,7	20,1	18,5	3,8	9,5
		Nuit	68,4	45,1	27,8	13,7	51,5	25,3	19,0	10,2	19,7
CU	Combiné	Jour	60,2	27,2	21,0	10,4	41,3	23,0	20,3	4,5	4,1
		Nuit	71,8	46,8	29,2	14,1	62,5	36,2	26,3	11,9	10,6
SM	Combiné	Jour	72,4	25,4	22,7	9,9	41,4	20,1	17,0	4,9	5,3
		Nuit	77,5	32,7	24,0	17,4	66,2	31,7	21,6	13,9	1,0
SA	Combiné	Jour	39,9	20,5	11,9	4,9	36,1	19,7	15,8	4,3	0,7
		Nuit	72,7	31,6	20,8	17,2	66,6	32,9	22,7	13,5	-1,3
SB	Combiné	Jour	73,7	28,7	24,5	10,2	43,9	15,9	12,9	6,1	12,7
		Nuit	76,3	36,8	27,5	16,5	55,6	25,0	17,9	11,9	11,8
C1	Combiné	Jour	65,6	21,9	18,9	9,4	49,0	19,0	16,0	6,6	2,8
		Nuit	69,7	28,3	20,1	16,6	60,8	29,0	21,2	12,4	-0,7
C2	Combiné	Jour	59,6	22,1	18,8	8,0	33,3	15,1	12,1	4,3	7,0
		Nuit	70,6	29,5	20,7	16,4	57,6	27,1	20,0	11,8	2,4
C3	Combiné	Jour	47,8	19,1	12,7	6,2	31,4	14,0	11,0	4,2	5,1
		Nuit	69,0	27,3	18,6	16,3	56,2	26,1	19,1	11,6	1,2

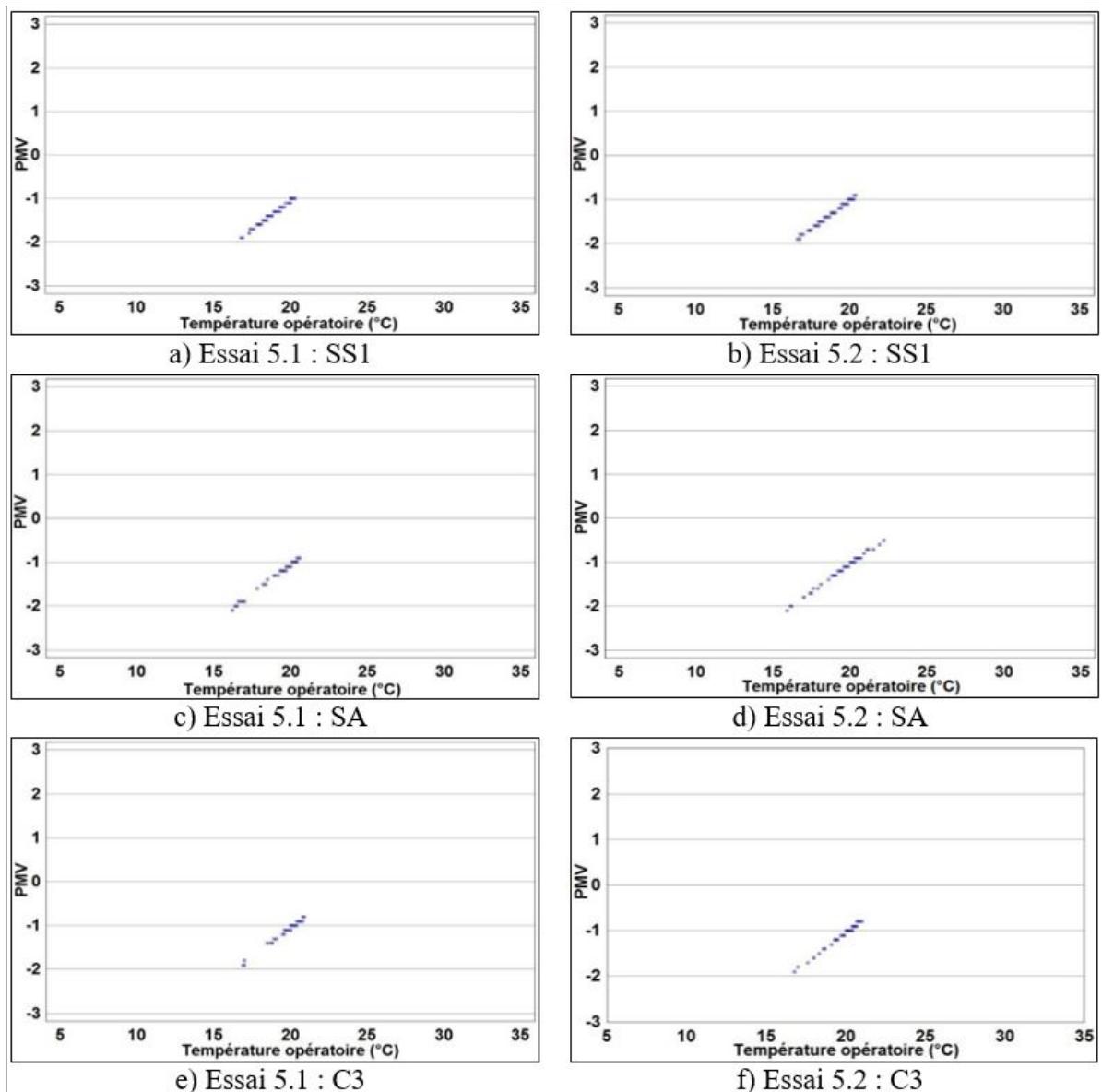


Figure-A IV-1 : PMV calculés en fonction de la température opératoire des pièces sous-sol 1, salon et chambre 3 à la suite d'abaissements combinés des essais 5.1 et 5.2

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. 2013. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 52 p.
- Armstrong, M. M. 2011. « Impact of cold climate on basement temperatures ». *Solplan Review*, n° 159, p. 14-15.
- ASHRAE Fundamentals. 2013. *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Ching, Francis D.K., Casandra Adams et Michel L. Saint-Pierre (adapt.). 2001 c2003. *Guide technique et pratique de la construction* [Building construction illustrated], 1er éd. Mont-Royal, Québec : Groupe Modulo, 456 p.
- Convectair. 2012. « Distribution de chaleur d'une plinthe électrique ». En ligne. < https://youtu.be/SuBhIL7uD_U >. Consulté le 7 décembre 2017.
- Fanger, P.O. 1972. « Thermal comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering ».
- Fong, K. F., T. T. Chow, C. Li, Z. Lin et L. S. Chan. 2010. « Effect of neutral temperature on energy saving of centralized air-conditioning systems in subtropical Hong Kong ». *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, n° 13, p. 1659-1665.
- Fournier, Michaël, et Marie-Andrée Leduc. 2014. « Study of Electrical Heating Setpoint Modulation Strategies for Residential Demand Response ». In *The Canadian Conference on Building Simulation (eSim)*. (Ottawa, Canada, may 8-9).
- Gouvernement du Québec. 2014. « Consommation d'énergie du Québec ». En ligne. < <http://politiqueenergetique.gouv.qc.ca/energie-au-quebec/consommation/> >. Consulté le 24 mars 2017.
- Guide Bâtiment Durable. 2013. « Échanges thermiques du corps humain avec l'environnement ». En ligne. < <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/notions.html?IDC=5437> >. Consulté le 4 décembre 2017.
- Handfiel, H., H. Nesreddine et Célyne Le Bel. 2006. « Power Demand of Programmable Thermostats with a Built-in Pick-up Algorithm for Electric Baseboard Heaters ». In *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems*. (Lisbon (Portugal), September 22-24).

Hydro-Québec. [s.d.]. « Hydro-Québec : La consommation d'électricité en cinq usages ». En ligne. < <http://www.hydroquebec.com/residentiel/mieux-consommer/consommation-electrique-sources.html> >. Consulté le 24 mars 2017.

International Organization for Standardization. 2005. *Moderate Thermal Environments—determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. ISO 7730. Genève

Ioana, Udrea, Cristiana Croitoru, Ilinca Nastase, Ruxandra Crutescu et Viorel Badescu. 2016. « Thermal Comfort in a Romanian Passive House. Preliminary Results ». *Energy Procedia*, vol. 85, n° Supplement C, p. 575-583.

Jacquet, Sébastien, Célynn Le Bel et Danielle Monfet. 2017. « In situ evaluation of thermostat setback scenarios for all-electric single-family houses in cold climate ». *Energy and Buildings*, vol. 154, n° Supplement C, p. 538-544.

Jones, Rory V., Steve Goodhew et Pieter de Wilde. 2016. « Measured Indoor Temperatures, Thermal Comfort and Overheating Risk: Post-occupancy Evaluation of Low Energy Houses in the UK ». *Energy Procedia*, vol. 88, n° Supplement C, p. 714-720.

Leduc, Marie-Andrée, Ahmed Daoud et Célynn Le Bel. 2011. « Developing Winter Residential Demand Response Strategies for Electric Space Heating ». In *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. (Sydney, Australia, 14-16 November).

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.

Manning, M. M., M. C. Swinton, F. Szadkowski, J. Gusdorf et K. Ruest. 2005. *The Effects of Thermostat Setting on Seasonal Energy Consumption at the CCHT Research Facility*. Coll. « Research Report (National Research Council Canada. Institute for Research in Construction); no. RR-191 »: National Research Council Canada.

Manning, M. M., M. C. Swinton, F. Szadkowski, J. Gusdorf et K. Ruest. 2007. « The Effects of thermostat setting on seasonal energy consumption at the CCHT Twin House Facility ». *ASHRAE Transactions*, vol. 113, n° 1, p. 1-12.

Manning, Marianne, Mike Swinton et Ken Ruest. 2005. *Incidence de la température de consigne des thermostats sur la consommation d'énergie*. Coll. « Le Point en recherche », 05-100. Ottawa (On.): Société canadienne d'hypothèques et de logement. < <https://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/63817.pdf> >.

MEEB. [s.d.]. « Maisons d'Expérimentation en Énergétique du Bâtiment ». En ligne. < <https://meeb.ca/> >. Consulté le 5 décembre 2016.

- Newsham, Guy R., et Cara L. Donnelly. 2013. « A model of residential energy end-use in Canada: Using conditional demand analysis to suggest policy options for community energy planners ». *Energy Policy*, vol. 59, p. 133-142.
- Ole Fanger, P., et Jørn Toftum. 2002. « Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates ». *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 6, p. 533-536.
- Poehlman, W. F. S., D. Mesher et C. R. Meadowcroft. 1988. « Monitoring the behaviour of an ultra-energy efficient house at Noble Kirk Farm ». *Energy and Buildings*, vol. 12, n° 3, p. 219-232.
- Rijal, H.B., M. Humphreys et F. Nicol. 2015. « Adaptive Thermal Comfort in Japanese Houses during the Summer Season: Behavioral Adaptation and the Effect of Humidity ». *Buildings* vol. 5, p. 1037-1054.
- Yang, X. B., D. F. Sun, X. J. Zhou, L. L. Cai et Y. Ji. 2011. « Indoor Thermal Comfort and its Effect on Building Energy Consumption ». *Applied Mechanics and Materials*, vol. 71-78, p. 3516-3519.
- Zhang, Fan, Richard de Dear et Christhina Candido. 2016. « Thermal comfort during temperature cycles induced by direct load control strategies of peak electricity demand management ». *Building and Environment*, vol. 103, p. 9-20.
- Zhang, Nan, Bin Cao, Zhaojun Wang, Yingxin Zhu et Borong Lin. 2017. « A comparison of winter indoor thermal environment and thermal comfort between regions in Europe, North America, and Asia ». *Building and Environment*, vol. 117, p. 208-217.