

# Évaluation de mesures d'adaptation aux vagues de chaleur dans des logements à loyer modique de Gatineau

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

DÉCEMBRE 2024

RAPPORT DE RECHERCHE

## **AUTEURS ET AUTRICES**

Patrick Poulin, conseiller scientifique spécialisé  
Marie-Eve Levasseur, cheffe de secteur  
Marie-Eve Dubuis, conseillère scientifique spécialisée  
Institut national de santé publique du Québec

Brigitte Pinard, directrice de santé publique de  
l'Outaouais  
Centre intégré de santé et de services sociaux de  
l'Outaouais

## **SOUS LA COORDINATION DE**

Jean-Bernard Gamache, chef d'unité  
Direction de la santé environnementale, au travail et  
de la toxicologie

## **COLLABORATION**

Laurie-Maude Drapeau, conseillère scientifique  
Marjolaine Dubé, conseillère scientifique  
Mahée Lacourse, bibliothécaire  
Institut national de santé publique du Québec

Denis Boyer, coordonnateur en efficacité énergétique  
Écohabitation

## **RÉVISION**

Isabelle Goupil-Sormany, médecin spécialiste  
Marie-Claude Lefebvre, conseillère scientifique  
Institut national de santé publique du Québec

Glen P. Kenny, professeur titulaire  
Université d'Ottawa

Les auteur(-trice)s ainsi que les membres du comité scientifique et les réviseur(e)s ont dûment rempli leurs déclarations d'intérêts et aucune situation à risque de conflits d'intérêts réels, apparents ou potentiels n'a été relevée.

Les réviseur(e)s ont été conviés à apporter des commentaires sur la version préfinale de ce document et en conséquence, n'en ont pas révisé ni endossé le contenu final.

## **RELECTURE ET MISE EN PAGE**

Aurélien Franco, agente administrative  
Direction de la santé environnementale, au travail et  
de la toxicologie

## **FINANCEMENT**

Ce projet a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche du centre intégré de santé et de services sociaux de l'Outaouais.

Ce projet est financé par le gouvernement du Québec et rejoint les objectifs du Plan pour une économie verte 2030.

*Ce document est disponible intégralement en format électronique (PDF) sur le site Web de l'Institut national de santé publique du Québec au : <http://www.inspq.qc.ca>.*

*Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue en écrivant un courriel à : [droits.dauteur.inspq@inspq.qc.ca](mailto:droits.dauteur.inspq@inspq.qc.ca).*

*Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.*

Dépôt légal – 4<sup>e</sup> trimestre 2024  
Bibliothèque et Archives nationales du Québec  
ISBN : 978-2-550-99193-9 (PDF)

© Gouvernement du Québec (2024)

## REMERCIEMENTS

L'Institut national de santé publique du Québec désire remercier sincèrement les personnes suivantes qui ont accepté de donner temps, expertise et commentaires sur le présent rapport de recherche :

### COMITÉ SCIENTIFIQUE

Line Bernier, directrice – services à la clientèle  
Alexandre Héroux-Thériault, directeur général  
Office d'habitation de l'Outaouais

Nathalie Bleau, coordonnatrice scientifique et responsable du partenariat Ville de Montréal-Ouranos  
Ouranos

Denis Boyer, coordonnateur en efficacité énergétique  
Écohabitation

Céline Campagna, conseillère scientifique spécialisée  
Institut national de santé publique du Québec

Benoit Côté, ingénieur  
Alexandre St-Pierre, ingénieur  
Société d'habitation du Québec

Nadine Guèvremont, directrice  
Maison de l'Amitié de Hull

Michael Lacasse, agent de recherches senior  
Abdelaziz Laouadi, agent de recherches senior  
Conseil national de recherches Canada

Isabelle Tardif, responsable de la coordination professionnelle  
Direction de santé publique de la Montérégie

### RÉVISION

Isabelle Goupil-Sormany, médecin spécialiste  
Marie-Claude Lefebvre, conseillère scientifique  
Institut national de santé publique du Québec

Glen P. Kenny, professeur titulaire  
Université d'Ottawa

## AVANT-PROPOS

L'Institut national de santé publique du Québec est le centre d'expertise et de référence en matière de santé publique au Québec. Sa mission est de soutenir le ministre de la Santé et des Services sociaux dans sa mission de santé publique. L'Institut a également comme mission, dans la mesure déterminée par le mandat que lui confie le ministre, de soutenir Santé Québec, la Régie régionale de la santé et des services sociaux du Nunavik, le Conseil cri de la santé et des services sociaux de la Baie James et les établissements, dans l'exercice de leur mission de santé publique.

La collection *Recherche et développement* rassemble sous une même bannière une variété de productions scientifiques qui apportent de nouvelles connaissances techniques, méthodologiques ou autres d'intérêt large au corpus de savoirs scientifiques existants.

Le présent rapport de recherche présente les principaux résultats d'un projet d'évaluation de l'efficacité de mesures d'adaptation à la chaleur, implantées dans le cadre de travaux de rénovation, visant à accroître le confort thermique des occupants et la qualité de l'air intérieur de logements à loyer modique de Gatineau. Ce projet a été élaboré à la demande de la Direction de santé publique de l'Outaouais et de l'Office d'habitation de l'Outaouais. Sa mise en œuvre a été rendue possible grâce à un financement octroyé par le gouvernement du Québec. Le projet rejoint notamment les objectifs du Plan pour une économie verte 2030. Il s'inscrit en cohérence avec l'axe 2 du Programme national de santé publique et l'orientation 2 de la Politique gouvernementale de prévention en santé, tous deux ayant notamment pour objectif la création d'environnements sains et sécuritaires pour la population du Québec. Il importe toutefois de préciser que les questions et les objectifs de recherche, la méthodologie employée ainsi que le contenu final de ce document relèvent exclusivement des professionnels scientifiques de l'Institut qui l'ont élaboré.

Ce document s'adresse aux professionnels du réseau de la santé et de l'habitation, ainsi qu'aux acteurs municipaux et gouvernementaux concernés par l'adaptation de l'environnement bâti aux conditions climatiques futures.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES</b> .....	<b>VII</b>
<b>FAITS SAILLANTS</b> .....	<b>1</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
<b>2 OBJECTIFS</b> .....	<b>8</b>
<b>3 MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>9</b>
<b>4 RÉSULTATS</b> .....	<b>12</b>
4.1 Données descriptives comparatives.....	13
4.1.1 Population à l'étude.....	13
4.1.2 Données structurales.....	15
4.1.3 Données environnementales.....	18
4.1.4 Données comportementales et perception de confort .....	20
4.2 Résultats des analyses statistiques comparatives .....	22
4.3 Résultats de la modélisation .....	24
4.3.1 Simulation énergétique sur une base annuelle.....	25
4.3.2 Simulation horaire des conditions thermiques intérieures en période de canicule.....	26
4.3.3 Simulations horaires selon divers scénarios hypothétiques.....	29
4.4 Résultats sommaires de la revue de la littérature .....	31
<b>5 DISCUSSION</b> .....	<b>32</b>
5.1 Variabilité des paramètres environnementaux .....	32
5.2 Variabilité des mesures comportementales .....	34
5.3 Confort thermique .....	37
5.4 Perspectives complémentaires issues de la modélisation .....	38
5.5 Intérêt de la méthodologie préconisée .....	40
5.6 Biais et limites de l'étude.....	41
5.6.1 Recrutement .....	42

5.6.2	Données structurales.....	43
5.6.3	Données environnementales.....	43
5.6.4	Consommation électrique et mesure d'étanchéité.....	44
5.6.5	Données comportementales.....	44
5.6.6	Données modélisées.....	45
5.7	Pistes de réflexion.....	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>51</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>52</b>
	<b>ANNEXE 1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE.....</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXE 2 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DE MESURES PASSIVES ADDITIONNELLES.....</b>	<b>71</b>
	<b>ANNEXE 3 DIAGRAMME DE FLUX DE TYPE PRISMA.....</b>	<b>76</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Comparaison des échantillons de participants lors des deux phases .....	14
Tableau 2	Comparaison des taux de CAH dans les logements mesurés avant et après les travaux de rénovation .....	16
Tableau 3	Comparaison des coûts annuels en électricité (en dollars canadiens) avant et après les travaux de rénovation .....	17
Tableau 4	Comparaison des variables environnementales mesurées avant et après les travaux de rénovation .....	19
Tableau 5	Comparaison des comportements d'intérêt et perception de confort chez les participants (au moins une fois durant la semaine de mesures) avant et après les travaux de rénovation .....	20
Tableau 6	Résultats des analyses ANOVA à mesures répétées appliquées aux températures moyennes intérieures des logements des huit locataires ayant participé aux deux phases de l'étude .....	23
Tableau 7	Résultats des analyses ANOVA à mesures répétées appliquées aux températures moyennes intérieures des logements des locataires ayant participé à au moins une des deux phases.....	24
Tableau A1-1	Caractérisation des échantillons de participants aux deux phases du projet.....	58
Tableau A1-2	Caractéristiques des logements avant et après les travaux de rénovation (changements).....	59
Tableau A1-3	Comportements et confort perçu évalués tous les jours pendant la semaine de mesures par les participants .....	62
Tableau A1-4	Appareils disponibles au cours des deux phases de mesures.....	63
Tableau A1-5	Orientations des façades .....	66
Tableau A1-6	Ombrage des façades (présence de structure ou de végétation portant ombrage à chaque façade) .....	66
Tableau A1-7	Facteurs influençant le confort thermique des occupants des logements considérés dans la modélisation.....	69

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Ligne du temps des étapes de réalisation du projet.....	11
Figure 2	Résultats des simulations énergétiques avant (prérénovation) et après les travaux de rénovation (postrénovation) .....	25
Figure 3	Températures sèches moyennes, avant (prérénovation) et après les travaux de rénovation (postrénovation), unité P.....	27
Figure 4	Températures radiantes moyennes, avant (prérénovation) et après les travaux de rénovation (postrénovation), unité P.....	28
Figure 5	Pourcentage prévisible d'insatisfaits, unité P.....	29
Figure A1-1	Aperçu de la méthode des séries temporelles radiantes (RTSM) .....	68
Figure A2-1	Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie de pare-soleil .....	71
Figure A2-2	Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie d'un mur végétalisé.....	72
Figure A2-3	Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie d'un toit blanc .....	73
Figure A2-4	Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie de pare-soleil, de mur végétal et de toit blanc.....	74
Figure A2-5	Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P en condition d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain .....	75

## LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

°C	Degrés Celsius
AM	Avant-midi
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> , analyse de la variance
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAH	Changement d'air à l'heure
CISSS	Centre intégré de santé et de services sociaux
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
CTS	<i>Conduction Time Series</i> ; séries temporelles de conduction
DSPublique	Direction de santé publique
HR	Humidité relative
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
kWt	Kilowattheure
mm	Millimètre
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
OHO	Office d'habitation de l'Outaouais
OMS	Organisation mondiale de la Santé
PM	Après-midi
PM <sub>2,5</sub>	Particules fines
PMV	<i>Predictable Mean Vote</i> ; vote moyen prévisible
PPD	<i>Predicted Percent Dissatisfied</i> ; pourcentage prévisible d'insatisfaits
ppm	Particules par million
RDC	Rez-de-chaussée
RTS	<i>Radiant Time Series</i> , série temporelles radiantes
RTSM	<i>Radiant Time Series Method</i> ; méthode des séries temporelles radiantes
T	Température
VRC	Ventilateur récupérateur de chaleur

## FAITS SAILLANTS

- La région sociosanitaire de l'Outaouais fait face, depuis plus d'une décennie, à des vagues de chaleur estivales récurrentes. Selon les projections climatiques actuellement disponibles, cette tendance devrait s'accroître dans les années à venir.
- L'Office d'habitation de l'Outaouais a procédé à une mise à niveau d'un de ses complexes de logements à loyer modique de Gatineau. Le projet consistait principalement à effectuer des travaux de rénovation visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels, notamment en utilisant des matériaux plus performants en matière d'isolation et d'étanchéité. Soutenu par la Direction de santé publique de l'Outaouais et l'Institut national de santé publique du Québec, l'Office d'habitation de l'Outaouais a accepté de participer à une étude portant sur l'évaluation de l'efficacité générale de ces mesures en période estivale.
- La présente étude visait à évaluer l'impact des travaux sur la performance des bâtiments, de leurs enveloppes et de leurs systèmes mécaniques. L'étude a permis d'évaluer, en période estivale, les comportements et les perceptions des occupants, ainsi que certains paramètres de confort et de qualité de l'air des milieux intérieurs avant et après la mise en œuvre des travaux de rénovation.
- Bien que les travaux de rénovation effectués sur les bâtiments aient pu engendrer des économies d'énergie en période hivernale et contribuer à l'étanchéité des habitations, ceux-ci semblent toutefois avoir eu pour effet d'accroître l'inconfort thermique des occupants en période estivale, en tenant compte des limites du projet. Optimiser l'étanchéité et l'isolation des bâtiments résidentiels peut s'avérer efficace dans la perspective d'économie d'énergie en période hivernale, mais peut aussi contribuer à la surchauffe des aires habitées en période estivale lorsque des mesures additionnelles visant à évacuer les charges thermiques excédentaires ne sont pas considérées.
- Parmi les éléments limitant la mesure de l'impact direct des travaux sur la performance énergétique des bâtiments et le confort thermique en période estivale, l'effet du comportement des occupants est important à considérer. Le mode de vie des usagers et leur utilisation des dispositifs de ventilation mécanique ou naturelle, l'usage d'un climatiseur individuel à faible coût et la gestion des éléments qui pourraient atténuer l'effet du rayonnement solaire direct (p. ex. stores, toiles et rideaux) peuvent avoir un impact considérable sur l'efficacité énergétique ou le confort thermique. Le positionnement géographique du complexe d'habitation en zone d'îlot de chaleur et la conception du bâtiment constituent d'autres éléments qui ont possiblement limité l'identification de bénéfices directs des travaux réalisés.
- La réalisation de travaux de modélisations complémentaires aux mesures environnementales effectuées ont permis de constater le potentiel théorique de certaines mesures d'atténuation de la chaleur. Parmi les mesures évaluées, on peut noter les murs végétalisés, les pare-soleil, les toits blancs et la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain dans lequel le complexe est situé.

- Enfin, les résultats de cette étude témoignent de la nécessité d'intégrer des mesures d'adaptation à la chaleur favorisant le maintien du confort thermique des occupants de bâtiments hébergeant des populations vulnérables dès leur construction ou encore d'implanter celles-ci lors de leur mise à niveau. De plus, l'implication et la sensibilisation des occupants semble une avenue à emprunter en concomitance avec des changements à l'environnement bâti, afin notamment de s'assurer que les appareils (p. ex. ventilateur récupérateur de chaleur) et les lieux sont utilisés de la manière la plus optimale possible au cours des épisodes de chaleur extrême.

## SOMMAIRE

Les impacts des changements climatiques se sont fait ressentir au Québec au cours des dernières décennies, particulièrement en ce qui concerne l'augmentation des températures extérieures moyennes. Des vagues de chaleur frappent régulièrement plusieurs régions, notamment celles situées au sud de la province, dont l'Outaouais; cette dernière ayant connu le plus grand nombre de vagues de chaleur enregistré au Québec jusqu'à ce jour. Selon les plus récentes projections, les températures maximales prévues en été augmenteront plus que les températures moyennes estivales. L'environnement bâti du sud du Québec, ainsi que les personnes vulnérables qui y vivent, sont donc particulièrement à risque de subir les effets délétères potentiellement engendrés par l'avènement d'intenses vagues de chaleur. Les occupants d'habitations sous l'influence d'îlot de chaleur urbain seraient particulièrement assujettis à ce type de risque environnemental.

C'est dans le contexte de la mise en œuvre d'un important projet de mise à niveau visant à améliorer l'efficacité énergétique d'un de ses complexes de logements à loyer modique de Gatineau que l'Office d'habitation de l'Outaouais (OHO) a également inclus des travaux qui pourraient s'avérer d'intérêt dans une perspective d'adaptation à la chaleur et d'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Ces travaux de rénovation devaient notamment inclure le remplacement d'une portion du revêtement extérieur, l'ajout d'isolant au niveau des toitures et des murs, le remplacement des portes et des fenêtres de même que l'installation d'unités de ventilation mécanique dans les unités n'en possédant pas encore. Soutenu par la Direction de santé publique de l'Outaouais (DSPublique) et l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), l'OHO a jugé opportun d'intégrer un projet d'évaluation des mesures implantées dans le cadre des travaux de rénovation afin de valider leur efficacité générale. L'objectif premier de ce projet consistait à comparer la performance de l'ensemble immobilier concerné, les comportements et les perceptions des occupants ainsi que certains paramètres de confort et de qualité de l'air des milieux intérieurs, en saison estivale, avant et après la mise en œuvre des travaux de rénovation.

L'approche méthodologique préconisée pour réaliser ce projet d'évaluation se décline en plusieurs volets. Le premier volet consiste en deux phases de collecte de données qui ont été réalisées (en été 2017 et 2019) dans un échantillon d'une trentaine de logements du complexe Raymond-Brunet. Les principales caractéristiques des logements, les comportements des occupants relatifs à la chaleur ainsi qu'une série de mesures de paramètres de qualité de l'air (dioxyde de carbone et particules fines) et de confort (température et humidité relative) ont été colligés avant (en 2017) et après (en 2019) la réalisation de travaux de rénovation (en 2018). Les résultats des deux phases de collecte de données ont ensuite été comparés dans le but d'évaluer l'efficacité des rénovations au regard du maintien du confort thermique. En ce qui concerne le deuxième volet méthodologique, des travaux de modélisation ont été réalisés par l'organisme Écohabitation afin de documenter la réponse thermique de certains logements témoins dans un contexte théorique de vague de chaleur tout en contrôlant l'influence du comportement des occupants sur les flux de chaleur modélisés. Les simulations numériques ont

également permis de déterminer les gains de confort théoriques pouvant être considérés en procédant à l'ajout de mesures passives d'adaptation à la chaleur additionnelles (non prévues dans le projet de rénovation) à l'édifice. Enfin, plusieurs séries d'analyses statistiques descriptives et croisées ont été réalisées afin de compléter l'évaluation des résultats obtenus.

L'échantillon de participants était relativement similaire d'une phase du projet à l'autre (notamment au regard de la proportion de femmes, du niveau de scolarité, du revenu annuel, de la durée d'occupation du logement, du nombre de ménages de plus de deux occupants et de la proportion de participants nés au Canada). En revanche, seulement neuf participants ont collaboré aux deux phases de mesures, dont huit au cours de la même période estivale (août). Une proportion légèrement plus importante de participants était exposée à la fumée de cigarette à l'intérieur au cours de la première phase de collecte de données. De plus, une plus grande proportion de participants possédait au moins un climatiseur portatif (ou de fenêtre) dans leur logement lors de la phase de mesures de 2017. Davantage de participants de la seconde phase de collecte de données ont indiqué éprouver une limitation physique, mentale ou un problème de santé limitant la quantité ou le type d'activités pouvant être réalisés à la maison ou ailleurs.

Alors qu'une proportion plus importante de participants ressentait les impacts de la chaleur sur leur santé mentale dans le premier échantillon de 2017, la deuxième cohorte de participants ressentait davantage les impacts négatifs de la chaleur sur leur santé physique.

Les résultats des tests d'infiltrométrie n'ont pas montré d'amélioration significative entre les deux phases de mesures; les taux de fuites d'air à 50 Pascal oscillaient, en moyenne, entre 5,84 CAH (changement d'air à l'heure) (moyenne arithmétique) en phase prérénovation et 6,05 CAH en phase postrénovation, ce qui suggère une moindre étanchéité de l'enveloppe ainsi qu'une légère perte d'efficacité énergétique. En ce qui concerne la consommation énergétique des logements rénovés, une évaluation sommaire a été effectuée en comparant la consommation électrique avant et après les travaux à l'aide des relevés d'Hydro-Québec transmis par l'OHO. Bien que plusieurs facteurs limitent la portée de comparaisons, il est possible d'observer une réduction potentielle des coûts annuels en électricité pour environ la moitié des logements ayant participé aux deux phases de collecte de données. Il est à noter que les mêmes logements ayant bénéficié d'une réduction des coûts annuels en énergie ont également présenté une plus grande étanchéité lors des tests d'infiltrométrie postrénovation.

En ce qui concerne les conditions environnementales observées dans les logements investigués, la variabilité de la température de l'air intérieur entre les logements au cours d'une même phase était importante (en 2017, min. = 18,5 °C et max. = 36,6 °C et en 2019, min. = 16,2 °C et max. = 32,8 °C). En raison du fait que les campagnes de collecte de données n'ont pu être réalisées lors de périodes de vague de chaleur et qu'une majorité des participants impliqués dans les deux phases possédait au moins un climatiseur, il est conséquent d'observer que les températures intérieures moyennes des logements (en 2017, moy. = 25,6 °C et en 2019, moy. = 25,2 °C) n'excédaient pas des niveaux considérés inconfortables selon les organismes reconnus (soit entre 24 °C et 26,5 °C environ l'été). En revanche, les concentrations de particules

fines (PM<sub>2,5</sub>) semblent avoir légèrement diminué entre les deux phases de mesures alors que les concentrations moyennes de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) n'ont que très légèrement fluctué, à la baisse, d'une phase à l'autre.

Selon les données descriptives compilées, les comportements et les habitudes de vie étaient plutôt similaires chez une grande proportion de participants, à l'exception de l'usage du ventilateur électrique plus soutenu durant la seconde phase (94,4 % en 2019 contre 64,7 % en 2017). En revanche, il semble que davantage de participants de la seconde phase aient relevé être inconfortables ou très inconfortables dans leur logement au moins une fois durant la semaine de mesure (soit 38,5 % en 2019 contre 17,8 % en 2017).

Les analyses statistiques ont mis en évidence que les mesures de températures intérieures moyennes associées à une même phase de collecte de données étaient très semblables pour les différents moments de la journée. De faibles différences sont observées lorsque ces mêmes données sont comparées d'une phase à l'autre; la différence de température observée à la suite des travaux de rénovation variait entre -3,8 °C et 2,2 °C pour le groupe d'individus dont la majorité possédait des climatiseurs. Des résultats similaires sont d'ailleurs observés au regard de l'humidité relative. Ainsi, la présence de climatiseurs dans la majorité des logements a influencé les résultats de l'évaluation menée; contexte qui n'a pas permis de distinguer une diminution significative de la température intérieure à la suite de la réalisation des travaux de rénovation, et ce, tant pour l'ensemble des périodes de la journée considérées que pour chacune d'entre elles considérées individuellement (avant-midi, après-midi, soirée et nuit).

Les résultats des travaux de modélisation ont, quant à eux, démontré que la proportion prévisible d'occupants insatisfaits (*Predicted Percentage of Dissatisfied* ou PPD basée sur des échelles de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]) assujettis à des conditions caniculaires s'est avérée plus élevée à la suite de la mise en œuvre des travaux de rénovation. En effet, les mesures visant à optimiser l'étanchéité des bâtiments en conditions hivernales dans une perspective écoénergétique pourraient, dans certaines circonstances, contribuer à la surchauffe des bâtiments en période estivale. Les résultats de ces travaux complémentaires suggèrent également que l'application de mesures passives comme les toits blancs ou les murs végétalisés, particulièrement lorsque qu'appliquées de façon combinée, peut présenter un potentiel de réduction de la chaleur intérieure (et du PPD associé) mesurable.

En conclusion, ce projet a permis de jeter un regard critique sur les bénéfiques potentiels pouvant être engendrés par la réalisation de travaux de rénovation tels que généralement appliqués aux petits bâtiments résidentiels du Québec. Bien que la mise en œuvre de tels travaux puisse être perçue comme un gain potentiel de confort pour les occupants en période hivernale, il semble que ceux-ci ne peuvent assurer un maintien du confort thermique en période estivale.

Parmi les éléments limitant la mesure de l'impact direct des travaux sur la performance énergétique des bâtiments et le confort thermique en période estivale, l'effet du comportement des occupants est important à considérer. En effet, le mode de vie des usagers et leur utilisation des dispositifs de ventilation mécanique ou naturelle, l'usage d'un climatiseur individuel à faible coût et la gestion des éléments qui pourraient atténuer l'effet du rayonnement solaire direct pourraient avoir un impact considérable sur l'efficacité énergétique ou le confort thermique. Le positionnement géographique du complexe d'habitation en zone d'îlot de chaleur et la conception du bâtiment constituent d'autres d'éléments qui ont limité l'identification de bénéfices directs des travaux réalisés. De plus, d'autres biais et limites méthodologiques ont potentiellement généré d'importantes incertitudes quant aux résultats assemblés et limitent de ce fait les interprétations possibles.

Par ailleurs, les résultats de la modélisation suggèrent que les mesures passives de gestion de la chaleur peuvent s'avérer d'intéressantes options à appliquer aux bâtiments résidentiels existants, mais elles ne seraient pas, à elles seules, en mesure d'endiguer les effets indésirables des vagues de chaleur sur les occupants, surtout lorsque celles-ci se prolongent sur plusieurs jours.

Enfin, il semble que l'implication et la sensibilisation des occupants soit une avenue à emprunter en concomitance avec des changements à l'environnement bâti afin notamment de s'assurer que les appareils (p. ex. ventilateur récupérateur de chaleur [VRC]) et les lieux sont utilisés de la manière la plus optimale possible au cours des épisodes de chaleur extrême.

## 1 INTRODUCTION

Les impacts des changements climatiques se sont ressentis au Québec au cours des dernières décennies, particulièrement en ce qui concerne l'augmentation des températures extérieures moyennes. En effet, entre 1948 et 2016, la température moyenne en été au Québec a augmenté de 1,5 °C à 3°C (Ouranos, 2015; Zhang *et al.*, 2019). L'augmentation moyenne des températures affecte à la hausse la fréquence et la durée des vagues de chaleur extrême (Gosselin *et al.*, 2022). De plus, « selon les projections, les températures maximales prévues en été augmentent plus que les températures moyennes estivales » (Ouranos, 2015). Des vagues de chaleur frappent régulièrement plusieurs régions et particulièrement celles situées au sud de la province. Depuis 2010, l'Outaouais est la région où le plus grand nombre de vagues de chaleur a été enregistré (Bustanza *et al.*, 2014, 2015, 2020; Bustanza et Lebel, 2012; Lebel *et al.*, 2016, 2017, 2019; Lebel et Bustanza, 2011, 2013). Pour cette région, selon un scénario d'émission élevé (RCP 8,5), les projections climatiques du nombre de jours où la température extérieure excédera 30°C, élaborées par le Centre canadien des services climatiques, indiquent que ce nombre, qui était de 4 à 14 jours en moyenne en 2005, passera à une plage de 7 à 21 jours en 2025 pour atteindre de 10 à 45 jours en 2050 (Donneesclimatiques.ca, 2021).

Dans le contexte de la mise en œuvre d'un important projet de mise à niveau d'un de ses complexes de logements à loyer modique de Gatineau (voir annexe 1), l'OHO a inclus certaines mesures d'adaptation à la chaleur et d'amélioration de la qualité de l'air intérieur. Soutenu par la DSPublique de l'Outaouais et l'INSPQ, l'OHO a accepté d'intégrer un projet d'évaluation de ces mesures. Ce projet visait notamment à comparer la performance des bâtiments, les comportements et les perceptions des occupants ainsi que certains paramètres de confort et de qualité de l'air des milieux intérieurs avant et après les rénovations. Deux phases de collecte de données ont été réalisées (en 2017 et en 2019) dans un échantillon de logements du complexe Raymond-Brunet. Deux rapports intermédiaires (non publiés<sup>1</sup>) ont également été produits pour décrire les méthodologies et les résultats obtenus au regard de chacune des phases de mesures. Le présent rapport décline d'abord les objectifs du projet d'évaluation, puis présente l'approche méthodologique retenue pour les différents volets du projet. Les principaux résultats descriptifs comparatifs obtenus à la suite des deux phases de mesures sont ensuite exposés, suivis des analyses statistiques comparatives, puis des résultats obtenus lors de la phase de modélisation. La discussion présente les différentes avenues d'interprétation des résultats empiriques obtenus à la lumière des résultats de la modélisation théorique des flux de chaleur affectant les milieux concernés. Des pistes de réflexion pour la réalisation de futures recherches dans le domaine de l'adaptation à la chaleur et de la qualité de l'air intérieur, ainsi que les limites du projet et des données récoltées sont également présentées.

---

<sup>1</sup> Disponibles sur demande.

## 2 OBJECTIFS

Comme défini dans le protocole du projet déposé auprès des partenaires et du Comité d'éthique du centre intégré de santé et de services sociaux (CISSS) de l'Outaouais, le présent projet avait pour but d'évaluer l'efficacité de mesures d'adaptation visant à accroître le confort thermique des occupants et la qualité de l'air intérieur de logements à loyer modique lors de vagues de chaleur. De façon plus spécifique, ce projet consistait à comparer, avant et après les travaux de rénovation :

- La performance des principales constituantes de l'enveloppe du bâtiment et de ses dispositifs de ventilation/extraction mécanique;
- Certains paramètres de confort (température et humidité relative) et de qualité d'air intérieur ( $\text{CO}_2$  et  $\text{PM}_{2,5}$ ) dans un échantillon de logements;
- La perception des occupants des logements concernés relativement à leur confort thermique et leurs comportements d'adaptation (habitudes de ventilation naturelle, utilisation des extracteurs d'air et appareils de ventilation et de climatisation, prise de douches, etc.) ainsi que les contraintes physiques et psychologiques limitant leur application.

Le projet visait également à estimer la contribution respective et cumulative des mesures d'adaptation appliquées à l'enveloppe, aux systèmes mécanisés ainsi que celles relevant du comportement des occupants au regard du maintien du confort thermique, de la qualité de l'air intérieur et de l'efficacité énergétique.

Afin d'atteindre ces objectifs, une démarche expérimentale intégrant différentes approches méthodologique a été développée, incluant deux phases de collecte de données de nature empirique (caractéristiques sociodémographiques des représentants des ménages volontaires, description des paramètres de confort de logements investigués, des comportements et perceptions des occupants) ainsi qu'un volet complémentaire impliquant la réalisation de simulations numériques (modélisation). Un plan d'analyses statistiques a également été produit afin que l'équipe de projet puisse traiter les données compilées de façon rigoureuse et en tirer des constats en lien avec les objectifs de l'étude. Les détails et les précisions associés à ces approches sont présentés à la section suivante ainsi qu'à l'annexe 1.

### 3 MÉTHODOLOGIE

La méthode et les choix d'analyse sont détaillées à l'annexe 1. De façon synthétique, l'approche méthodologique appliquée à ce projet s'appuie d'abord sur une démarche comparative (de type avant-après) combinée à un volet de modélisation. Le projet impliquait la participation d'une trentaine de ménages résidant dans le complexe Raymond-Brunet, un ensemble immobilier appartenant à l'OHO.

Situé à Gatineau, le complexe comporte 124 logements de deux étages concentrés dans un même quartier. Les ménages devaient accepter de participer à l'étude au cours des étés 2017 et 2019, soit avant et après la réalisation d'un important projet de rénovation. Ainsi, les caractéristiques des logements (p. ex. matériaux, isolation et étanchéité), les comportements des occupants relatifs à la chaleur (p. ex. ouverture des fenêtres et utilisation de la climatisation) ainsi qu'une série de mesures de paramètres de qualité de l'air et de confort (température, humidité relative, CO<sub>2</sub> et PM<sub>2,5</sub>) ont pu être colligés. De manière succincte, les travaux de rénovation consistaient à mettre à niveau différentes constituantes du bâtiment particulièrement pour rehausser l'isolation et l'étanchéité de son enveloppe (revêtement métallique externe remplacé par du fibrociment, remplacement des fenêtres et des portes, etc.) et des équipements de ventilation (ajout de système de VRC dans les logements de deux chambres). Des précisions relatives à ces travaux sont présentées à l'annexe 1.

En ce qui concerne l'évaluation des paramètres de confort et des concentrations de contaminants des milieux intérieurs (température, humidité relative, CO<sub>2</sub> et PM<sub>2,5</sub>), celle-ci fut réalisée à l'aide d'appareils de mesures qui ont été déployés sur une période de sept jours, lors de deux campagnes de collecte de données estivales. Les données de température et d'humidité relative extérieures proviennent quant à elles de la station d'Environnement Canada Ottawa CDA RCS 6105978. Les résultats des deux phases de collecte de données ont été comparés à l'aide de tests statistiques dans le but d'évaluer l'efficacité des rénovations et des mesures d'adaptation déployées.

De plus, des données sociodémographiques, comportementales et en lien avec les perceptions de l'état de santé physique et mentale ainsi que du confort des participants ont été colligées auprès de ces derniers. Ces informations ont été colligées au moyen d'un questionnaire sociodémographique ainsi que d'un journal d'activités quotidiennes (découpé par périodes de 6 h) relevant les appareils domestiques utilisés ainsi que l'adoption de comportements d'adaptation à la chaleur (p. ex. utilisation de ventilateur électrique, fermeture de rideaux, fréquentation d'un lieu climatisé ou frais). Il est à noter que les participants devaient répondre sur une base individuelle de leurs propres comportements et perceptions (un seul répondant par ménage). Toutefois, certaines variables documentées pouvaient concerner l'entièreté du ménage (p. ex. ouverture des fenêtres, exposition à la fumée secondaire à l'intérieur).

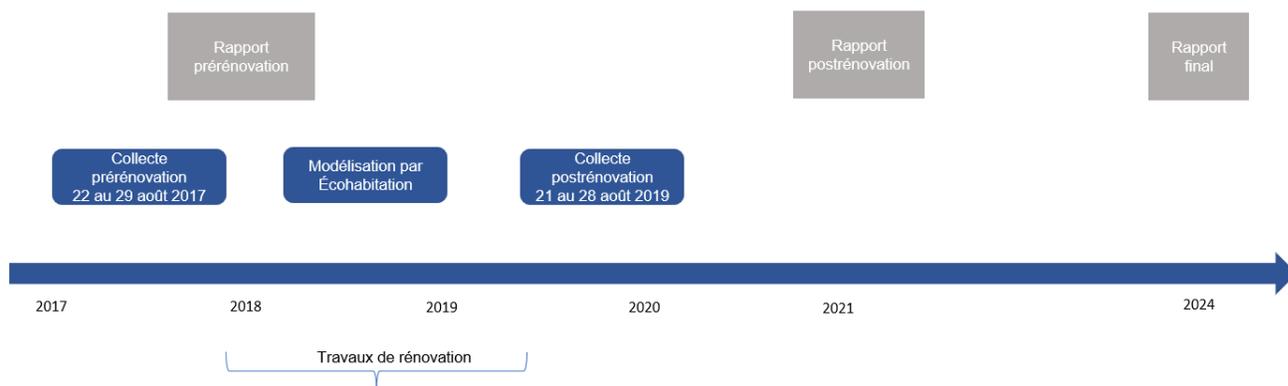
De manière complémentaire, une modélisation des logements investigués a été réalisée par l'organisme Écohabitation afin de documenter l'impact de la chaleur sur les milieux intérieurs dans un contexte théorique de vague de chaleur tout en contrôlant l'influence variable des occupants sur les flux de chaleur modélisés. En s'appuyant sur la méthode des séries temporelles radiantes (*Radiant Time Series Method*, RTSM), sur la norme ASHRAE (standard 55, portant sur le confort thermique) et certains postulats concernant les activités des occupants et l'utilisation de certains appareils domestiques, les simulations numériques ont permis de modéliser les flux de chaleur affectant six unités types du complexe résidentiel (avant et après les rénovations) de même que le confort thermique présumé des occupants. Après avoir assuré une calibration adéquate du modèle, diverses simulations ont pu être paramétrées, incluant l'ajout de mesures d'adaptation passives (non prévues dans le projet de rénovation) telles que les toits blancs, les pare-soleil et les murs végétaux.

De plus, plusieurs séries d'analyses statistiques descriptives et croisées ont été réalisées sur la base de modèles applicables aux séries de données colligées tout en soutenant l'atteinte des objectifs définis. Ces analyses visaient principalement à vérifier l'impact des rénovations sur le confort thermique (les perceptions, les comportements et les habitudes associés) des participants. Plus spécifiquement, des analyses de type ANOVA (*Analysis of Variance*; analyse de la variance) à mesures répétées ont été réalisées sur les séries de données rassemblées afin de vérifier l'impact de la phase du projet (variable indépendante) sur les données de températures intérieures quotidiennes moyennes de chacun des logements à l'étude (variable dépendante). Ce type d'analyse permet de tenir compte de la dépendance des mesures effectuées chez un même participant à des moments distincts tout en permettant d'utiliser la température extérieure comme variable d'ajustement. En effet, le recours à l'analyse des résultats de mesures répétées dans le logement d'un même participant assujetti à des conditions environnementales fluctuantes permet de tenir compte de la variabilité intrasujet.

Enfin, dans l'optique de comparer les résultats obtenus à ceux issus d'autres études similaires, une recherche systématisée de la littérature a été réalisée pour soutenir la discussion. Les normes de construction des bâtiments pouvant varier d'un pays à l'autre, seuls les articles présentant des données canadiennes ont été retenus. Après l'application des critères d'exclusion (voir annexe 3), seulement quatre articles pertinents ont été retenus concernant les mesures appliquées dans des bâtiments résidentiels et traitant de chaleur intérieure : deux à Montréal (Mirzaei *et al.*, 2012; Suerich-Gulick *et al.*, 2022), un à Toronto (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018) et un dans 10 grandes villes québécoises (Valois *et al.*, 2017).

Les principales étapes du projet sont présentées sur une ligne du temps (figure 1 p. 11).

Figure 1 Ligne du temps des étapes de réalisation du projet



Le projet a été réalisé grâce à la contribution de nombreux professionnels de l'INSPQ et de la DSPublique du CISSS de l'Outaouais. L'implication d'autres partenaires a également été nécessaire pour réaliser le projet d'évaluation. En tant que locateur et gestionnaire du complexe Raymond-Brunet, l'OHO a été impliqué à toutes les étapes du projet concernant les occupants et les logements, du recrutement des participants à l'installation et au retrait des appareils de mesures, en plus d'assurer les suivis pour la transmission des rapports aux participants. La Maison de l'Amitié de Hull, un organisme communautaire de soutien aux occupants situé sur le site du complexe Raymond-Brunet, a été fortement impliquée dans la phase de recrutement et de suivi des participants aux deux phases de collecte de données. Santé Canada a fourni les appareils de mesures pour les deux phases du projet d'évaluation, en plus d'assurer le soutien à leur utilisation et à l'extraction des données.

## 4 RÉSULTATS

Dans le but d'évaluer l'efficacité de mesures d'adaptation visant à accroître le confort thermique des occupants et la qualité de l'air intérieur de logements à loyer modique lors de vagues de chaleur, plusieurs types de données ont été colligées. Celles-ci sont d'ailleurs rapportées de façon successive dans la présente section en débutant par la présentation du portrait des caractéristiques sociodémographiques des participants de l'étude afin de bien caractériser l'échantillon de participants. Par la suite, les données structurales, environnementales et comportementales (ainsi que celles ayant trait à la perception du confort) sont présentées, suivies des résultats des analyses statistiques effectuées, de même que ceux issus des travaux de modélisation.

D'emblée, il importe de souligner qu'il n'a pas été possible de procéder à la collecte des données lors de vagues de chaleur extrême<sup>2</sup>, et ce, pour les deux périodes de mesures. Cependant, les maximums de températures extérieures atteints étaient tout de même élevés pour presque toutes les périodes lors des deux phases et, de surcroît, caractéristiques des conditions estivales. Les deux périodes sont également comparables, puisque les moyennes de température et d'humidité relative extérieures entre les deux phases du projet ne montrent pas d'écart important, bien que la période de mesures de 2019 ait été légèrement plus chaude. Ainsi, bien que la présente étude ait permis d'articuler de robustes constats, il est opportun d'assumer que certains des résultats obtenus auraient pu être modulés par l'avènement d'une vague de chaleur.

Comme mentionné précédemment, des rapports intermédiaires (non publiés) ont été produits pour présenter de façon factuelle et descriptive chacune des phases de collecte de données ainsi que leurs principaux résultats. Par conséquent, ce rapport présente uniquement les résultats comparatifs entre ces deux phases, soit les changements potentiels observés à la suite de la réalisation des travaux de rénovation effectués sur les unités résidentielles concernées du complexe Raymond-Brunet.

---

<sup>2</sup> Les avertissements de chaleur d'Environnement et Changement climatique Canada sont émis lorsque « l'une ou l'autre des conditions suivantes va se produire : une température extérieure de 30 °C ou plus et un indice humidex de 40 °C ou plus pendant au moins une heure » (MSSS, 2019). Pour la région de l'Outaouais, la moyenne pondérée des températures maximales extérieures prévues au cours des trois jours suivants doit atteindre 31°C et les températures minimales prévues doivent atteindre 18 °C (MSSS, 2019).

## 4.1 Données descriptives comparatives

### 4.1.1 Population à l'étude

Le tableau 1 (p. 14) dresse un portrait général des caractéristiques des échantillons de participants résidant (2017, n = 29; 2019, n = 28) au complexe Raymond-Brunet pour les deux phases de collecte de données. Neuf participants ont collaboré aux deux phases. Les échantillons sont relativement similaires en ce qui concerne la proportion de femmes, le niveau de scolarité, le revenu annuel, la durée d'occupation du logement, le nombre de ménages de plus de deux occupants et la proportion de participants nés au Canada. Il est également à noter que les participants des deux phases rapportaient ressentir, dans les mêmes proportions, les impacts de la chaleur sur leur santé mentale<sup>3</sup>.

Toutefois, une proportion légèrement plus importante de participants était exposée à la fumée de cigarette à l'intérieur au cours de la première phase, en 2017 (31,0 %) que lors de la seconde (17,9 % en 2019). De plus, davantage de participants ont indiqué durant la seconde phase de collecte de données, en 2019, avoir une limitation physique, mentale ou un problème de santé limitant la quantité ou le type d'activités pouvant être réalisés à la maison, au travail ou à l'école, ou ailleurs (32,2 % contre 20,7 % en 2017)<sup>4</sup>. Ces informations permettent de constater que certaines mesures d'adaptation peuvent être plus difficiles à appliquer par certains individus (p. ex. limitation pouvant réduire la capacité d'ouvrir les fenêtres ou de se rafraîchir dans un lieu approprié). Les participants de la seconde cohorte étaient également légèrement plus nombreux à ressentir des impacts négatifs de la chaleur sur leur santé physique (39,3 % contre 27,6 % en 2017)<sup>5</sup>. Enfin, il est important de relever qu'une plus grande proportion de participants possédait au moins un climatiseur portatif (ou de fenêtre) dans le logement au cours de la première phase de collecte, en 2017 (82,8 % contre 64,3 % en 2019).

---

<sup>3</sup> La question posée était « Votre santé mentale est-elle négativement affectée lorsqu'il fait très chaud et très humide l'été? », les choix de réponses incluant « Beaucoup », « Moyennement », « Un peu » et « Pas du tout ».

<sup>4</sup> La question posée était « Est-ce qu'un état physique, un état mental ou un problème de santé réduit la quantité ou le type d'activités que vous pouvez faire à la maison, au travail ou à l'école, ou dans d'autres activités, par exemple, dans les déplacements ou les loisirs? », les choix de réponses incluant « Oui, souvent », « Oui, parfois » et « Non, jamais ».

<sup>5</sup> La question posée était « Votre santé physique est-elle négativement affectée lorsqu'il fait très chaud et très humide l'été? », les choix de réponses incluant « Beaucoup », « Moyennement », « Un peu » et « Pas du tout ».

**Tableau 1 Comparaison des échantillons de participants des deux phases**

Caractéristiques	Échantillon en 2017	Échantillon en 2019
Nombre de participants (1 par logement/ménage investigué)	29	28
Proportion de participantes (femmes)	86,2 %	89,3 %
Commencé ou complété un programme d'études primaires ou secondaires	51,7 %	53,6 %
Commencé ou complété un programme d'études dans un cégep ou une école professionnelle	27,6 %	28,6 %
Revenu annuel brut pour le ménage de moins de 20 000 \$	75,0 %*	63,0 %
Vivre dans le logement depuis 5 ans ou plus	41,4 %	46,4 %
Vivre seul ou à deux	34,5 %	35,7 %
Ménage de 3 ou 4 personnes	44,8 %	39,3 %
Né au Canada	48,3 %	42,9 %
Proportion de participants exposée à la fumée de cigarette à l'intérieur du logement	31,0 %	17,9 %
Limitation physique, mentale ou problème de santé	20,7 %	32,2 %
Impact de la chaleur sur la santé mentale (beaucoup et moyennement)	27,6 %	14,3 %
Impact de la chaleur sur la santé physique (beaucoup et moyennement)	27,6 %	39,3 %
Proportion de participants possédant au moins un climatiseur portatif	82,8 %	64,3 %
Proportion de participants possédant au moins un ventilateur électrique	58,6 %	64,3 %
Insatisfaction de la température intérieure de leur logement en été (peu ou pas du tout satisfait)	44,8 %	35,7 %

\* Excluant un répondant ayant indiqué « Ne sais pas ».

#### 4.1.2 Données structurales

Comme précisé à l'annexe 1, les logements du complexe Raymond-Brunet ont subi des rénovations visant notamment à remplacer la portion métallique du revêtement extérieur des habitations par du fibrociment. L'isolation des toitures et des murs a également été améliorée. Les portes et les fenêtres ont été changées pour accroître leur résistance thermique. Enfin, des systèmes de ventilation (VRC ou échangeur d'air) ont été installés dans les logements de deux chambres. Puisque le projet visait à comparer la performance des logements avant et après la réalisation de travaux de rénovation, seules les unités dans lesquelles des appareils de mesures ont pu être déployés aux cours des deux phases d'investigation (soit 14 logements au total) font l'objet de comparaisons dans la section suivante. Il est à noter que ce groupe d'unités inclut donc des logements où les occupants présents en 2017 ont déménagé et ont été remplacés par de nouveaux occupants en cours de projet.

##### Étanchéité de l'enveloppe

Des tests d'infiltrométrie<sup>6</sup>, destinés à évaluer l'étanchéité à l'air de l'enveloppe des logements, ont été réalisés pour comparer les taux de CAH avant et après les travaux de rénovation du complexe immobilier (tableau 2 p. 16). Les travaux de rénovation réalisés visaient notamment à améliorer l'efficacité énergétique et à réduire la consommation électrique des logements. Il importe toutefois de rappeler qu'il est primordial que tout bâtiment, particulièrement si son isolation a été rehaussée, soit suffisamment ventilé pour assurer les besoins de tous les occupants en air frais, et ce, soit par l'entremise d'un système ventilation mécanique ou de l'utilisation de la ventilation naturelle volontaire.

Lors de la tenue des tests d'infiltrométrie en janvier 2017, les taux de fuites d'air à 50 Pascal oscillaient entre 2,30 et 8,38 CAH (la moyenne étant de 5,84 CAH) alors que ceux obtenus en phase postrénovation (mai 2019) variaient entre 3,89 et 9,44 CAH et présentaient une moyenne de 6,05 CAH. Il est à noter que les résultats les plus faibles sont associés aux logements plus étanches aux infiltrations d'air.

Le tableau 2 (p. 16) présente les CAH pour les logements dans lesquels les mesures d'étanchéité en situation pré- et postrénovation ont été effectuées; les cases grises indiquent les participants ayant complété les deux phases de mesures dans le même logement. Il est à noter qu'un de ces logements n'a pas subi de test d'infiltrométrie en phase postrénovation, et ce, pour une raison inconnue de l'équipe de recherche. De façon générale, les résultats comparatifs des tests d'infiltrométrie ont montré une amélioration de l'étanchéité de 10 des 14 logements investigués, suggérant une amélioration potentielle de l'efficacité énergétique de ces unités résidentielles suivant la réalisation des travaux de rénovation. Pour les quatre autres logements, les taux de

---

<sup>6</sup> Un test d'infiltrométrie consiste à évaluer le taux de fuites d'air d'un bâtiment et est réalisé en conditions fermées (portes, fenêtres, appareils de ventilation). Il permet d'évaluer la performance de l'enveloppe au regard des infiltrations et des exfiltrations passives d'air. Il ne s'agit pas d'une mesure de l'intensité de la ventilation du bâtiment en conditions d'utilisation normale.

CAH auraient augmenté, indiquant une possible réduction de l'efficacité énergétique de ces derniers.

**Tableau 2 Comparaison des taux de CAH dans les logements mesurés avant et après les travaux de rénovation**

Logement	CAH prérénovation	CAH postrénovation	Écart
<b>Mêmes participants dans le logement aux deux phases</b>			
A	8,08	7,70	-0,38
B	5,70	6,38	+0,68
C	5,44	5,16	-0,28
D	7,26	8,58	+1,32
E	5,82	5,59	-0,23
F	4,64	5,57	+0,93
G	6,32	5,45	-0,87
H	4,77	3,89	-0,88
I	6,09	6,44	+0,35
<b>Participants différents dans le logement aux deux phases</b>			
J	6,64	6,44	-0,20
K	4,48	4,12	-0,36
L	5,67	4,32	-1,35
M	6,34	5,10	-1,24
N	5,22	5,01	-0,21
O	7,43	nd	nd

### Consommation énergétique

En ce qui concerne la consommation énergétique des logements rénovés, une évaluation sommaire a été effectuée en comparant la consommation électrique avant et après les travaux à l'aide des relevés d'Hydro-Québec transmis par l'OHO (ce qui incluait le chauffage électrique, la climatisation lorsqu'applicable et l'eau chaude). Les relevés couvraient l'année avant les rénovations (de juillet 2016 à juillet 2017) ainsi que l'année suivant les rénovations (de décembre 2018 à décembre 2019). Il importe de rappeler que les locataires d'un même logement ont pu changer au cours du projet et que les différentes habitudes comportementales ont pu influencer la dépense énergétique associée à ces logements (utilisation de l'éclairage, utilisation du chauffage et de la climatisation, etc.). Dans ce contexte, il n'est pas possible d'évaluer la consommation électrique associée à l'usage des appareils du logement. Le calcul de la consommation énergétique demeure une mesure générale qui permet d'obtenir une idée de l'ordre de grandeur des coûts avant et après les rénovations pour un même logement.

Le tableau ci-dessous (tableau 3) présente les coûts annuels totaux avant et après les rénovations pour les logements ayant été échantillonnés au cours des deux phases. Les données en gris correspondent aux occupants ayant participé aux deux phases de mesures dans le même logement. Ainsi, les comportements ayant un impact sur la consommation énergétique sont plus à même d'être similaires dans les logements n'ayant connu aucun changement de locataire au cours du projet. De plus, les périodes couvertes pour la facturation électrique peuvent varier de quelques jours entre les logements en raison de la date de début des prélèvements d'Hydro-Québec. La somme annuelle constitue une approximation du coût total sur 12 mois pour chaque logement.

**Tableau 3 Comparaison des coûts annuels en électricité (en dollars canadiens) avant et après les travaux de rénovation**

Logement	Coût annuel prérénovation (\$)	Coût annuel postrénovation (\$)	Écart (\$)	Nombre de chambres à coucher
<b>Mêmes participants dans le logement aux deux phases</b>				
A	1 078,28	912,52	-165,76	2
B	1 306,71	1 446,77	+140,06	2
C	1 877,82	1 543,32	-334,50	3
D	1 387,96	1 435,18	+47,22	2
E	2 003,49	1 914,78	-88,71	3
F	2 982,77	3 095,07	+112,30	3
G	2 474,70	2 026,97	-447,73	4
H	2 362,92	1 953,96	-408,96	3
I	2 248,94	3 094,37	+845,43	3
<b>Participants différents dans le logement aux deux phases</b>				
J	892,13	1 172,19	+280,06	2
K	2 934,29	3 011,03	+76,74	3
L	2 396,81	1 746,79	-650,02	4
M	2 512,11	2 514,11	+2,00	4
N	2 904,08	2 431,82	-472,26	3
O	845,01	903,36	+58,35	2

Bien que plusieurs facteurs limitent les comparaisons, il est possible d'observer une réduction potentielle des coûts annuels en électricité pour environ la moitié des logements ayant participé aux deux phases de collecte de mesures (7 sur 15). Ainsi, parmi les neuf logements hébergeant les mêmes participants aux deux phases, cinq d'entre eux ont vu leur facture d'électricité diminuer après les rénovations, tandis que quatre logements ont vu leur facture augmenter. Les mêmes logements pour lesquels les coûts annuels en énergie ont été atténués ont également présenté une plus grande étanchéité lors des tests d'infiltrométrie postrénovation. L'inverse est également observable pour les logements dont l'efficacité énergétique s'est détériorée.

### **4.1.3 Données environnementales**

Bien qu'il n'ait pas été possible de tirer profit de conditions dites de vagues de chaleur extrême lors de la cueillette de données, un bref portrait comparatif des conditions environnementales intérieures (température, humidité relative, PM<sub>2,5</sub> et CO<sub>2</sub>) mesurées durant les deux phases de mesures est présenté au tableau 4 (p. 19). Les moyennes par période (avant-midi, après-midi, soirée et nuit) sont présentées afin d'obtenir un portrait représentatif de ces différents moments de la journée. La variabilité des températures entre les logements au cours d'une même période était toutefois importante. À titre d'exemple, les températures nocturnes pouvaient varier de 16,2 °C (minimum) à 32,8 °C (maximum) lors de l'été 2019. En 2017, les températures intérieures au cours de la nuit variaient de 18,5 °C à 35,9 °C.

Les concentrations moyennes de PM<sub>2,5</sub> ont légèrement diminué entre les deux phases de collecte de données, et ce, pour toutes les périodes de la journée. Les concentrations moyennes de CO<sub>2</sub> n'ont que très légèrement fluctué d'une phase à l'autre; la concentration médiane ayant passé de 605,2 ppm lors de la première phase de l'étude à 633,5 ppm lors de la seconde phase.

Les moyennes de température et d'humidité relative extérieures entre les deux phases du projet ne montrent pas d'écart important, bien que la période de mesures de 2019 ait été légèrement plus chaude. Cela confirme malgré tout que les conditions environnementales extérieures étaient similaires (absence de vague de chaleur, même période de l'année et températures comparables). Enfin, il est à noter que l'impact de la température extérieure sur les comportements des participants n'a pas été documenté dans la présente étude, considérant que l'exposition aux conditions extérieures était très variable d'un participant à l'autre (en fonction des habitudes et des comportements individuels) et assumant que l'objectif du projet visait à évaluer les effets sur la température intérieure.

Tableau 4 Comparaison des variables environnementales mesurées avant et après les travaux de rénovation

Paramètre	Comparaison des variables environnementales (moyenne totale ou par période)									
	Phase prérénovation (août 2017)					Phase postrénovation (août 2019)				
	Toutes périodes	AM	PM	Soirée	Nuit	Toutes périodes	AM	PM	Soirée	Nuit
<b>Température intérieure (°C)</b>	25,6 (max. : 36,6; min. : 18,5)	24,9 (max. : 34,7; min. : 19,1)	26,0 (max. : 36,5; min. : 19,9)	26,1 (max. : 36,6; min. : 18,6)	25,4 (max. : 35,9; min. : 18,5)	25,2 (max. : 32,8; min. : 16,2)	24,6 (max. : 32,7; min. : 16,2)	25,4 (max. : 31,2; min. : 18,7)	25,7 (max. : 31,4; min. : 18,6)	25,1 (max. : 32,8; min. : 16,2)
<b>HR intérieure (%)</b>	47,4 (max. : 81,1; min. : 24,2)	48,3 (max. : 78,3; min. : 25,9)	46,5 (max. : 79,7; min. : 24,8)	46,4 (max. : 81,1; min. : 24,2)	48,2 (max. : 75,1; min. : 28,6)	48,1 (max. : 77,1; min. : 30,6)	49,6 (max. : 77,1; min. : 34,3)	47,4 (max. : 70,2; min. : 30,6)	46,8 (max. : 74,8; min. : 32,1)	48,4 (max. : 75,2; min. : 34,8)
<b>PM<sub>2,5</sub> intérieure (mg/m<sup>3</sup>)</b>	0,042 (max. : 1,826; min. : 0)	0,050 (max. : 1,826; min. : 0)	0,032 (max. : 0,629; min. : 0)	0,045 (max. : 1,790; min. : 0)	0,043 (max. : 0,839; min. : 0)	0,016 (max. : 1,279; min. : 0)	0,015 (max. : 0,450; min. : 0)	0,019 (max. : 1,00; min. : 0)	0,015 (max. : 0,901; min. : 0,002)	0,017 (max. : 1,279; min. : 0)
<b>CO<sub>2</sub> intérieur (mg/m<sup>3</sup>)</b>	791,2 (max. : 1 999,6; min. : 357,0)	811,0 (max. : 1 999,6; min. : 357,0)	739,9 (max. : 1 999,6; min. : 357,0)	797,1 (max. : 1 999,6; min. : 366,8)	816,8 (max. : 1 999,6; min. : 370,2)	731,0 (max. : 1 999,6; min. : 376,0)	711,4 (max. : 1 999,6; min. : 376,0)	727,3 (max. : 1 999,6; min. : 383,5)	746,0 (max. : 1 999,6; min. : 383,5)	739,4 (max. : 1 999,6; min. : 387,0)
<b>Température extérieure</b> (Environnement Canada – Station Ottawa CDA RCS n° 6105978 [°C])	17,1 (max. : 24,9; min. : 8,9)	16,8 (max. : 24,3; min. : 9,6)	21,2 (max. : 24,9; min. : 18,3)	17,1 (max. : 21,8; min. : 10,9)	13,4 (max. : 20,2; min. : 8,9)	19,4 (max. : 28,0; min. : 9,5)	18,6 (max. : 24,2; min. : 11,5)	23,8 (max. : 28,0; min. : 19,6)	19,9 (max. : 24,7; min. : 13,1)	15,3 (max. : 21,5; min. : 9,5)
<b>HR extérieure</b> (Environnement Canada – Station Ottawa CDA RCS n° 6105978 [%])	71,3 (max. : 100; min. : 36)	73,7 (max. : 98; min. : 47)	51,0 (max. : 96; min. : 36)	69,5 (max. : 90; min. : 42)	90,9 (max. : 100; min. : 82)	64,2 (max. : 98; min. : 34)	68,6 (max. : 98; min. : 42)	46,1 (max. : 69; min. : 34)	61,9 (max. : 87; min. : 37)	80,3 (max. : 98; min. : 67)

#### 4.1.4 Données comportementales et perception de confort

Les données descriptives ayant pu être exploitées dans la présente analyse et qui sont associées aux comportements des occupants et à la perception du confort sont présentées au tableau 5. Les résultats assemblés lors des phases de collecte pré- et postrénovation s'avèrent plutôt similaires sur le plan des principaux comportements d'intérêt, à l'exception de l'usage de ventilateur électrique. De même, certaines divergences sont observées entre les deux phases quant au confort perçu dans le logement. En effet, il semble que davantage de participants de la seconde phase aient relevé être inconfortables ou très inconfortables dans leur logement au moins une fois durant la semaine de mesures (38,5 % en 2019 contre 17,9 % en 2017)<sup>7</sup>.

**Tableau 5 Comparaison des comportements d'intérêt et perception de confort chez les participants (au moins une fois durant la semaine de mesures) avant et après les travaux de rénovation**

Comportements et perception de confort (au moins une fois durant la semaine de mesures)	Phase prérenovation 2017	Phase postrénovation 2019
Ouverture des fenêtres pour aérer leur logement	79,3 %	92,6 %
Utilisation de leur ventilateur électrique (sur pied, de plafond, etc.)*	64,7 % (17 ménages)	94,4 % (18 ménages)
Utilisation d'un ventilateur récupérateur de chaleur*	81,8 % (12 ménages)	81,0 % (28 ménages)
Utilisation du ventilateur d'extraction de salle de bain	78,6 %	76,9 %
Utilisation de la sècheuse	78,6 %	84,6 %
Inconfortables ou très inconfortables au regard de la chaleur	17,9 %	38,5 %

\* Pour ceux qui ont indiqué avoir ce type d'appareil.

<sup>7</sup> Chaque jour, les participants devaient qualifier leur niveau de confort pour chaque période de la journée (nuit, avant-midi, après-midi, soirée), soit « Très confortable », « Confortable », « Inconfortable » ou « Très inconfortable ».

Les résultats des analyses statistiques (tests de Student) effectuées après les deux phases de collecte de données n'ont pas permis d'identifier d'association entre la température intérieure et le fait d'être inconfortable ou très inconfortable dans le logement, toutes périodes confondues (avant-midi, après-midi, soirée et nuit). La petite taille de l'échantillon a pu influencer ces résultats. Il n'a également pas été possible d'observer une association significative entre la température intérieure et le fait d'être affecté physiquement lorsqu'il fait très chaud et humide l'été à l'aide des données colligées dans les deux phases du projet de recherche. Toutefois, dans la première phase de collecte de données en 2017, il a été possible, même malgré la taille relativement modeste de l'échantillon de participants, d'observer une association significative entre la température dans leur logement et les individus considérant que leur santé mentale était affectée lorsqu'il fait très chaud et humide l'été. La température était statistiquement significativement plus basse (23,9 °C comparativement à 26,2 °C,  $p = 0,0272$ ) à toutes les périodes de la journée chez les individus dont la santé mentale était beaucoup et moyennement affectée par la chaleur (= 8). Bien qu'on ne puisse pas le confirmer à ce stade, cela pourrait être dû à l'adoption de mesures d'adaptation à la chaleur par ces individus en raison de leur inconfort thermique l'été (p. ex. usage de climatisation, ventilation accrue et vulnérabilité individuelle à la chaleur). Cette association n'était pas visible lors de la seconde phase de collecte de données en 2019.

Parmi les changements de comportements observés entre les deux phases de collecte de données par le biais de questionnaires, une diminution non significative et de faible amplitude du pourcentage (66,7 % en 2017 à 55,6 % en 2019) de participants ayant indiqué avoir procédé à l'ouverture de leurs fenêtres est observée en même temps qu'ils utilisaient la climatisation, et ce, au moins une fois durant la semaine d'échantillonnage (toutes périodes confondues). Ces données peuvent témoigner de l'adoption relativement répandue de pratiques de climatisation non optimisée, puisque l'utilisation concomitante de la ventilation naturelle et de la climatisation augmente les coûts en énergie et réduit l'efficacité de cette dernière. Il est à noter que ce comportement est surtout observé en période diurne, puisqu'en période nocturne, environ le tiers des participants ont simultanément procédé à l'ouverture de leurs fenêtres et utilisé la climatisation (au moins une fois durant la période). Il est toutefois important de souligner que la ou les pièces du logement bénéficiant de ventilation naturelle et ou de climatisation n'étaient pas documentées.

Lorsque toutes les périodes d'investigation sont considérées, on constate qu'environ les trois quarts des participants (79,2 % en 2017 et 72,2 % en 2019) ont fermé les rideaux (tous types confondus) et utilisé la climatisation de manière concomitante, au moins une fois durant la semaine d'échantillonnage. La proportion de participants ayant opté pour ce type de comportement spécifiquement en période diurne (soit en AM et en PM) a atteint 54,2 % en 2017 et 50,0 % en 2019. Ces observations témoignent qu'une importante proportion des participants a adopté certains comportements cohérents en matière de maintien du confort thermique, bien que ceux-ci pouvant toutefois être davantage promus. Par ailleurs, il faut considérer que la fermeture des rideaux en soirée et au cours de la nuit peut viser essentiellement à préserver l'intimité des occupants.

L'utilisation de modèles d'ANOVA à mesures répétées sur plusieurs variables comportementales en rapport avec la température intérieure n'a pas permis de relever d'association significative entre les comportements adoptés et la température intérieure (voir la section *Biais et limites de l'étude*).

## 4.2 Résultats des analyses statistiques comparatives

Des analyses de type ANOVA à mesures répétées ont été effectuées sur la base des données issues des huit participants ayant collaboré aux deux phases de l'étude lors de la même période (mois d'août 2017 et 2019)<sup>8</sup>. Les résultats ont d'abord permis de constater que les mesures de température intérieure moyennes associées à une même phase sont très semblables pour les différents moments de la journée. Par ailleurs, de faibles différences sont observées lorsque ces mêmes données sont respectivement comparées d'une phase à l'autre; la différence de température observée à la suite des travaux de rénovation variait entre -3,8 °C et 2,2 °C pour le groupe d'individus dont la majorité (soit 7/8) possédait un climatiseur. Il en va de même pour l'humidité relative. Pour le logement sans climatiseur, on observe une légère diminution de la température moyenne entre les deux phases pour toutes les périodes et une augmentation de la moyenne de l'humidité relative pour toutes les périodes. Ainsi, la présence de climatiseurs portatifs dans la majorité des logements influence les résultats de l'analyse de variance non ajustée. Il n'est donc pas possible de distinguer une diminution significative de la température intérieure à la suite de la réalisation des travaux de rénovation. Cette observation est valide pour l'ensemble des périodes de la journée considérées et pour chacune d'entre elles (avant-midi, après-midi, soirée et nuit). Une fois ajustée pour l'influence de la température extérieure, des diminutions de températures moyennes légèrement plus accentuées sont observées, mais ces dernières s'avèrent tout juste supérieures au seuil de significativité ( $p > 0,05$ ) pour les périodes constituant le cœur de la journée (avant-midi et après-midi). Lorsque l'ensemble des périodes sont considérées, aucune différence significative n'est observée entre les deux phases de l'étude (voir tableau 6 p. 23).

---

<sup>8</sup> Bien que neuf occupants aient participé aux deux phases consécutives de mesures, le logement de l'un d'entre eux a été échantillonné, lors de la seconde phase de collecte de donnée postrénovation, au cours du mois de juillet 2019; une période qui s'est avérée plus chaude que celle observée au mois d'août de la même année. Comme la période de mesures associée à ce participant ne correspond pas à celle des autres participants, ce dernier a été retiré de la base de données pour réaliser les analyses statistiques comparatives, portant le nombre d'occupants considéré à huit.

**Tableau 6 Résultats des analyses ANOVA à mesures répétées appliquées aux températures moyennes intérieures des logements des huit locataires ayant participé aux deux phases de l'étude**

	Sans ajustement			
Période	Phase 1	Phase 2	Différence (phase 2 - phase 1)	valeur p
Nuit	25,0	24,0	-1,0	0,1851
AM	24,6	23,4	-1,2	0,1268
PM	25,6	24,2	-1,4	0,1227
Soirée	25,6	24,4	-1,1	0,1903
Ensemble des périodes	25,2	24,0	-1,2	0,1441
	Avec ajustement pour la température extérieure			
Période	Phase 1	Phase 2	Différence (phase 2 - phase 1)	valeur p
Nuit	25,2	23,9	-1,3	0,1166
AM	24,9	23,2	-1,7	0,0496
PM	25,8	24,0	-1,8	0,0553
Soirée	25,8	24,2	-1,6	0,0847
Ensemble des périodes	25,4	23,8	-1,6	0,0600

D'autres analyses de type ANOVA à mesures répétées ont été effectuées afin de documenter d'éventuels changements à la suite de la réalisation des travaux de rénovation dans les logements n'ayant pas été occupés par le même ménage dans les deux phases de collecte de données. Une fois de plus, cette nouvelle série d'analyses n'a pas permis de détecter des différences significatives au regard de l'évolution des températures intérieures (tableau 7 p. 24).

**Tableau 7 Résultats des analyses ANOVA à mesures répétées appliquées aux températures moyennes intérieures des logements des locataires ayant participé à au moins une des deux phases**

Sans ajustement				
Période	T. int. (°C) – Phase 1	T. int. (°C) – Phase 2	Différence (°C) (phase 2 – phase 1)	Valeur-p
Nuit	25,4	25,1	-0,3	0,6759
AM	24,9	24,6	-0,3	0,5814
PM	26,0	25,4	-0,6	0,3354
Soirée	26,1	25,7	-0,4	0,5739
Ensemble des périodes	25,6	25,2	-0,4	0,5232
Avec ajustement pour la température extérieure				
Période	Phase 1	Phase 2	Différence (phase 2 – phase 1)	Valeur-p
Nuit	25,5	25,0	-0,6	0,3822
AM	25,2	24,3	-0,9	0,1696
PM	26,3	25,1	-1,2	0,0717
Soirée	26,4	25,4	-1,0	0,1339
Ensemble des périodes	25,9	24,9	-1,0	0,1301

### 4.3 Résultats de la modélisation

Les résultats présentés dans cette section sont tirés des rapports livrés par l'organisme Écohabitation et ont été validés par celui-ci avant d'être intégré au présent rapport. Cette démarche complémentaire a été développée afin de répondre aux différents objectifs du projet qui n'auraient pu être atteints que sur la base des données empiriques assemblées. Les résultats sont issus de simulations numériques dont les principales variables associées relèvent des informations techniques propres aux logements investigués et des données comportementales génériques simulant une présence humaine dans ces derniers selon les scénarios préconisés par l'ASHRAE. Les résultats de ce type d'analyse doivent donc être interprétés avec prudence, tout en tenant compte de leur contexte d'acquisition et des limites inhérentes à ce type d'approche méthodologique.

### 4.3.1 Simulation énergétique sur une base annuelle

Comme précisé à l'annexe 1 (méthodologie), une série de simulations numériques a été effectuée sur les unités P, Q, R, C, G et H. L'analyse intègre plusieurs variables, dont la température de l'air, la température radiante, le taux d'humidité relative, la vitesse de l'air (0 m/s), l'habillement et le métabolisme des occupants. Les premiers résultats générés par le biais de cette approche concernent la caractérisation des économies énergétiques (figure 2) pouvant découler de la mise en œuvre des travaux de rénovation au regard des systèmes suivants : chauffage, eau chaude domestique, éclairage et charges aux prises, ventilation et climatisation.

Figure 2 Résultats des simulations énergétiques avant (prérénovation) et après les travaux de rénovation (postrénovation)

		2 chambres Unité Q		3 chambres Unités P, R, C et H		4 chambres Unité G	
P r é  R é n o	Chauffage (kWh)	4920	9430	9810	9800	10020	9680
	ECD (kWh)	3590	4480	4470	4470	4470	5360
	Écl & app (kWh)	6850	7320	7320	7320	7320	7790
	VRC & vent (kWh)	80	310	310	290	310	310
	Clime (kWh)	550	610	640	540	620	610
	<b>Total (kWh)</b>	<b>15990</b>	<b>22150</b>	<b>22550</b>	<b>22420</b>	<b>22740</b>	<b>23750</b>
	Coût (\$ annuels)	1211	1753	1790	1778	1807	1896
P o s t  R é n o	Chauffage (kWh)	3370	5580	6280	6300	6480	5980
	ECD (kWh)	3590	4480	4480	4480	4480	5370
	Écl & app (kWh)	6850	7320	7320	7320	6590	7790
	VRC & vent (kWh)	290	290	290	280	290	290
	Clime (kWh)	450	490	510	450	500	500
	<b>Total (kWh)</b>	<b>14550</b>	<b>18160</b>	<b>18880</b>	<b>18830</b>	<b>18340</b>	<b>19930</b>
	Coût (\$ annuels)	1084	1398	1462	1458	1415	1555
	Réduction (kWh)	1440	3990	3670	3590	4400	3820
	Économies (\$ annuels)	127	355	328	320	392	341
	Réduction clime (kWh)	100	120	120	90	120	110

Source : Écohabitation, 2019a.

Bien que la consommation énergétique soit largement tributaire des comportements des occupants, les résultats de la modélisation effectuée suggèrent des économies d'énergie théoriques variant entre 127 \$ (pour le logement de deux chambres) et 392 \$ (pour l'un des logements de trois chambres). Alors que de telles économies sont basées sur le maintien d'une température intérieure de 25 °C en été (valeur théorique fixée par Écohabitation), les simulations indiquent que les travaux de rénovation permettraient théoriquement de produire des réductions des coûts énergétiques. Cette diminution varierait entre 90 et 120 kWh (kilowattheure) en ce qui a trait à l'usage de la climatisation pour une atténuation théorique des dépenses énergétiques annuelles totales pouvant atteindre 4 400 kWh (ou 392 \$) lorsque l'on considère tous les postes de dépense énergétique incluant le chauffage.

Le besoin en climatisation avant et après les travaux de rénovation a également été évalué de manière théorique (soit en simulant les conditions qui permettent de maintenir la température intérieure à 25 °C). L'unité R est utilisée à titre d'exemple, puisqu'elle représente l'unité la plus touchée par les vagues de chaleur en raison de ses trois façades exposées au soleil à différents moments de la journée, et le peu d'ombrage disponible pour la protéger du rayonnement solaire.

« Avant la rénovation, le besoin pour les cinq jours de vagues de chaleur était estimé à 68 kWh, ce qui représente un coût d'environ 5,50 \$, taxes incluses. La charge quant à elle se situe à environ 1,35 kW. Les rénovations portent la demande à 57 kWh (4,70 \$, taxes incluses) alors que celle-ci est réduite à 40 kWh (3,20 \$, taxes incluses) en ajoutant des pare-soleil et un mur végétal. La charge serait quant à elle réduite à environ 0,8 kW » (Écohabitation, 2019a).

#### **4.3.2 Simulation horaire des conditions thermiques intérieures en période de canicule**

Les simulations horaires ont été réalisées pour une série de logements à l'étude en utilisant une période de canicule réelle (du 4 au 8 août 2018) (Écohabitation, 2019a). Pour chaque unité d'habitation modélisée, les résultats bruts sont rapportés aux figures 3, 4 et 5. La figure 3 (p. 27) représente la progression de la température sèche<sup>9</sup> moyenne, la figure 4 (p. 28) montre la température radiante (ou radiative)<sup>10</sup> moyenne et la figure 5 (p. 29) indique le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD)<sup>11</sup>. Les courbes représentent les variations de température avant les rénovations et après les rénovations, pour la chambre ou le rez-de-chaussée (RDC) ainsi que la température extérieure (temp. locale). L'évolution temporelle du PPD est également présentée

---

<sup>9</sup> La température sèche correspond à celle indiquée par un thermomètre protégé de l'humidité et des radiations ambiantes.

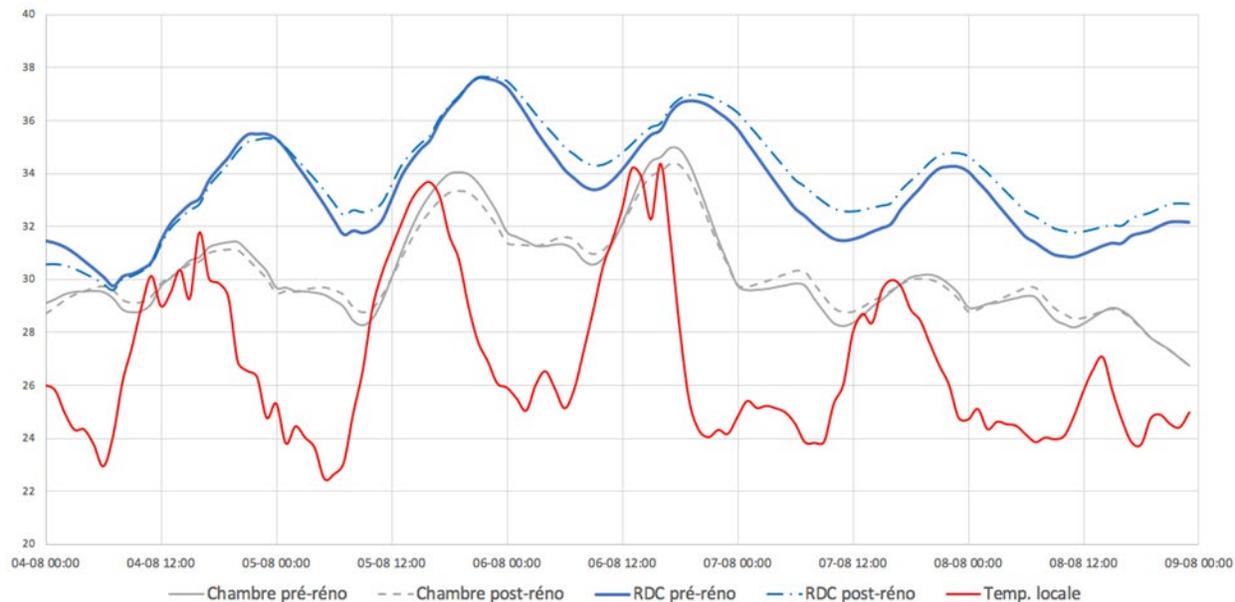
<sup>10</sup> Contrairement à la température sèche, la température radiative (ou radiante) est une température qui permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement. Elle est utilisée dans l'étude du confort thermique, principalement dans l'ingénierie du bâtiment.

<sup>11</sup> Calcul réalisé pour évaluer la probabilité qu'un occupant sera incommodé par le climat thermique intérieur. « Il est intéressant de noter que même avec un vote moyen prévisible neutre, on aura toujours 5 % d'insatisfaits. Il est donc improbable, selon cette formulation, d'éliminer complètement l'inconfort thermique en suivant une approche unique pour tous les bâtiments, peu importe les particularités des occupants. » (Écohabitation, 2018a)

sous forme graphique afin de décrire le confort d'une personne moyenne assujettie aux conditions thermiques ambiantes (Écohabitation, 2019a). Seul l'exemple de l'unité P sera présenté de façon plus détaillée, notamment en raison de sa représentativité, alors que les résultats des simulations appliquées aux autres logements sont présentés en annexe.

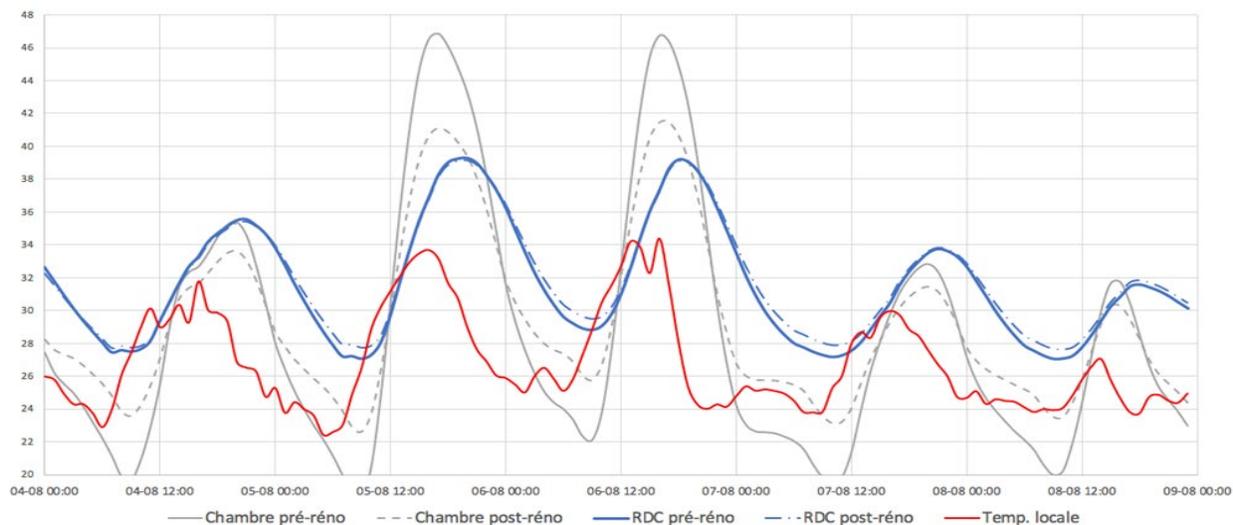
Ainsi, suivant l'analyse de la figure 3, il est intéressant de constater que les températures sèches moyennes obtenues pour la période postrénovation sont souvent supérieures à celles calculées pour la phase de prérénovation, et ce, particulièrement au RDC. Cette même observation peut être articulée pour les unités R, C, G et H de ce même complexe. Ce résultat peut notamment s'expliquer par le fait que les travaux de rénovation ont permis de bonifier l'isolation et l'étanchéité de l'enveloppe de l'habitation favorisant du même élan la rétention de la chaleur générée par les occupants et le rayonnement solaire incident. Il est également possible de constater que la température sèche moyenne calculée au RDC demeure plus élevée que celle calculée pour l'étage. Ce résultat contre-intuitif (notamment engendré par la segmentation des différents étages du logement dans le modèle numérique utilisé) peut à nouveau s'expliquer par le fait que les occupants sont davantage actifs dans cette section du logement où se retrouvent d'ailleurs de nombreux appareils électroménagers susceptibles de dégager de la chaleur (p. ex. sècheuse et cuisinière).

**Figure 3** Températures sèches moyennes, avant (prérénovation) et après les travaux de rénovation (postrénovation), unité P



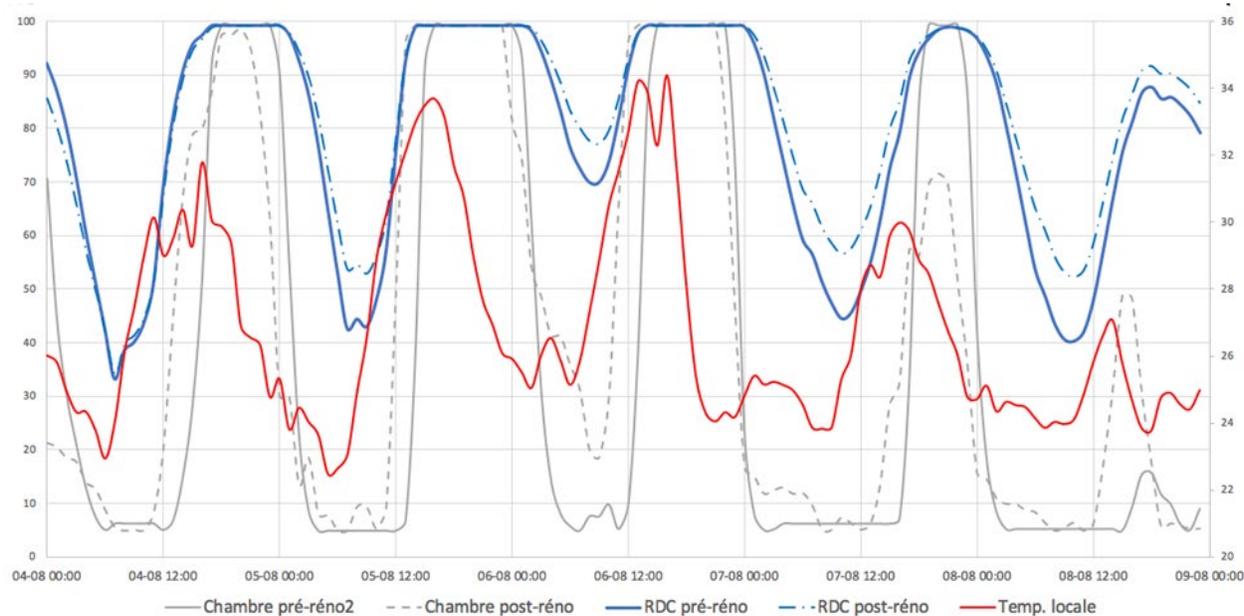
La figure 4 montre quant à elle que la température radiante est parfois plus élevée à l'étage qu'au niveau du RDC, et ce, même si la température de l'air (sèche) est plus faible. Ce résultat du modèle numérique est associé à la présence rapprochée du toit du bâtiment qui irradie l'énergie solaire absorbée par ce dernier vers le milieu intérieur (chambre de l'étage).

**Figure 4** Températures radiantes moyennes, avant (prérénovation) et après les travaux de rénovation (postrénovation), unité P



En complément de la présentation des résultats associés à l'analyse des flux de chaleur, la figure 5 (p. 29) présente le PPD. Ce résultat suggère que la mise en œuvre des travaux de rénovation est responsable d'une détérioration du confort de ces derniers. En effet, tant au RDC qu'à l'étage, la période horaire quotidienne durant laquelle l'ensemble des occupants sont susceptibles d'éprouver des inconforts s'est allongée alors que les périodes durant lesquelles plus de 50 % des occupants éprouvent des inconforts sont plus fréquentes.

Figure 5 Pourcentage prévisible d'insatisfaits, unité P



### 4.3.3 Simulations horaires selon divers scénarios hypothétiques

Les résultats présentés dans cette section portent sur la caractérisation des bénéfices, en matière de réduction de l'exposition à la chaleur en milieu intérieur et de confort pour les occupants, que pourrait engendrer le déploiement de différentes mesures complémentaires appliquées au bâtiment. Ces mesures, soit l'ajout de pare-soleil, de mur végétal et de toit blanc, sont dites passives, car elles ne dépendent pas du concours des occupants et ne consomment pas d'énergie (INSPQ, 2021). Les figures illustrant les résultats de la modélisation de mesures passives additionnelles sont présentées à l'annexe 2.

#### Ajout de pare-soleil du côté sud du bâtiment

Cette simulation porte sur la caractérisation des bénéfices découlant de l'installation de pare-soleil au-dessus des fenêtres situées sur le mur du bâtiment orienté vers le sud (orientation davantage sous l'influence du soleil de midi). Les pare-soleil considérés sont théoriquement conçus et installés pour projeter une ombre sur l'entièreté de la surface vitrée des fenêtres, alors que leur impact sur la partie opaque du mur concerné est considéré négligeable. En utilisant la même approche que celle précédemment décrite, les résultats des simulations numériques effectuées montrent que l'ajout de tels pare-soleil favorise une tendance à la baisse de la température sèche moyenne tant à l'étage qu'au RDC, et ce, tout au long de la période d'investigation. Alors que la baisse de température sèche observée au RDC à l'aide du modèle serait de l'ordre d'environ 1 °C, la température radiante moyenne du logement ne semble avoir diminué que très légèrement suivant l'ajout de pare-soleil. Il en va de même pour le PPD, bien que l'impact de cette mesure seule sur les inconforts pouvant être ressentis par les occupants du

logement semble insignifiant (tant au RDC qu'aux chambres situées à l'étage) (voir annexe 2, figure A2-1).

### **Ajout de mur végétalisé**

À l'instar de la précédente simulation numérique, la présente section porte sur l'évaluation de l'impact d'une mesure complémentaire passive d'atténuation de la chaleur, soit la présence de mur végétalisé. Contrairement aux pare-soleil qui ne sont pleinement efficaces que lorsqu'installés au-dessus de fenêtres orientées vers le sud, les murs végétalisés peuvent être aménagés sur les façades est, ouest et sud, dépendamment de la résistance au soleil, à la chaleur et à la sécheresse des espèces végétales implantées (INSPQ, 2021). Les structures végétales aériennes se développant sur un tel type de mur pourront atténuer le rayonnement solaire atteignant ce dernier. Aux fins de la présente simulation, seule la fraction non fenestrée (ou opaque) des trois murs extérieurs exposés au soleil est considérée protégée du rayonnement solaire. Dans ce contexte, il est considéré que « la notion de mur végétal peut être étendue à une haie ou un arbre assez volumineux, pourvu que ceux-ci procurent un ombrage sur toute la face concernée de l'immeuble » (Écohabitation, 2019a). La figure A2-2 de l'annexe 2 montre les résultats de cette simulation et permet d'observer que la température intérieure sèche n'a que très légèrement été affectée par la présence de murs végétalisés. Par ailleurs, la température radiante modélisée dans ce même logement a, quant à elle, enregistré une baisse de plusieurs degrés (jusqu'à 4 °C au RDC et 5 °C à l'étage) se transposant par une légère diminution concomitante du PPD.

### **Ajout d'un toit blanc**

Dans la foulée des démarches de caractérisation de l'efficacité des mesures passives d'atténuation de la chaleur, les bénéfices pouvant théoriquement être engendrés par le remplacement de revêtements de toit traditionnels (bardeau d'asphalte noir) par un toit blanc<sup>12</sup> ont également été simulés (tout en maintenant l'ensemble des autres caractéristiques du toit). Cette simulation, dont les résultats sont rapportés de façon schématique à la figure A2-3 de l'annexe 2, montre que l'implantation de cette mesure passive de gestion de la chaleur affecterait davantage la température des aires habitables situées à l'étage que celle du RDC. À cet égard, on observe une légère diminution de la température sèche et de la température radiante dans les chambres situées à l'étage, se traduisant par une diminution concomitante de l'insatisfaction des occupants.

### **Mise en place simultanée des trois mesures passives complémentaires (pare-soleil, mur végétalisé et toit blanc)**

En marge de l'évaluation des retombées spécifiquement associées à l'implantation de chacune des trois précédentes mesures de gestion passive de la chaleur en milieu intérieur, des simulations ont été réalisées afin d'évaluer l'effet concourant de ces dernières. Comme le suggèrent les résultats des simulations présentées à la figure A2-4 de l'annexe 2, l'effet combiné

---

<sup>12</sup> Généralement constitué d'une membrane élastomère.

de ces mesures s'avère davantage substantiel au regard des divers paramètres investigués que celui associé à l'application de ces mesures sur une base individuelle. Une diminution de la chaleur sèche et radiante d'environ de 2 °C et de 4 °C est respectivement observée ainsi qu'une diminution du PPD. Le PPD demeure néanmoins très élevé (100 %) pour une fraction substantielle des jours de canicule, bien que cette simulation ne considère pas l'application de mesures d'atténuation de la chaleur par les occupants, telle que l'usage de la ventilation mécanique.

### **Atténuation de l'effet « îlot de chaleur urbain »**

Il est reconnu que les milieux bâtis dépourvus de végétation (surtout d'arbres matures supportant une certaine canopée) et caractérisés par la présence abondante de matériaux imperméables présentant un faible albédo (tels le bitume, la brique ou le béton) peuvent présenter des températures extérieures moyennes supérieures à celles observées dans les zones périphériques rurales, et ce, surtout en période nocturne. Ce phénomène d'îlot de chaleur urbain favorise l'accumulation de chaleur et une dissipation plus lente de celle-ci après la tombée du jour. Une variété de mesures d'atténuation des îlots de chaleur est documentée dans la littérature (INSPQ, 2017, 2021; Santé Canada, 2020), incluant le verdissement, la réduction des espaces bétonnés ou asphaltés, ainsi que l'installation de surfaces réfléchissantes (comme les toits blancs). La figure A2-5 de l'annexe 2 présente l'effet de l'atténuation théorique de l'îlot de chaleur urbain sur la température intérieure pour l'unité P. Selon les résultats obtenus, cette mesure pourrait engendrer une atténuation de la température sèche et radiante d'environ 3 °C sur toute la durée de la période de canicule modélisée.

## **4.4 Résultats sommaires de la revue de la littérature**

Sur 931 articles initialement recensés par la stratégie de recherche, quatre articles canadiens pertinents ont été retenus : deux à Montréal (Mirzaei *et al.*, 2012; Suerich-Gulick *et al.*, 2022), un à Toronto (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018) et un dans 10 grandes villes québécoises (Valois *et al.*, 2017). Deux revues de littérature issues de cette recherche littéraire ont également été jugées pertinentes (Collins et Dempsey, 2019; Gronlund, 2014). Certains groupes d'auteurs ont documenté l'enjeu de la chaleur en milieu résidentiel au moyen de simulations numériques (Mirzaei *et al.*, 2012; Suerich-Gulick *et al.*, 2022), de questionnaires (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018; Valois *et al.*, 2017) ou de données expérimentales (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018; Mirzaei *et al.*, 2012). En somme, les résultats de ce survol de la littérature montrent notamment que les données présentées dans le présent rapport revêtent un aspect novateur, considérant qu'aucune des études canadiennes identifiées par l'entremise de cette démarche complémentaire ne portait sur le suivi des paramètres de confort avant et après la mise en œuvre de travaux de rénovation sur un bâtiment existant.

## 5 DISCUSSION

Les résultats assemblés dans le cadre du présent projet ont permis d'identifier d'intéressantes pistes de réflexion concernant le maintien du confort thermique et les pratiques de rénovation habituellement promues dans les bâtiments québécois. Les prochaines sections portent sur une analyse sommaire des données générées lors de la réalisation de la présente étude, leurs implications sur les enjeux du contrôle du confort thermique dans le bâtiment résidentiel public existant ainsi que les principaux biais et limites de cette dernière.

### 5.1 Variabilité des paramètres environnementaux

D'entrée de jeu, il est important de rappeler que le portrait comparatif des paramètres physico-chimiques de l'air intérieur investigués dans le cadre de cette étude (température, humidité relative, CO<sub>2</sub> et PM<sub>2,5</sub>) ne permet pas de dégager de changements significatifs entre les phases pré- et post-rénovation considérant l'ensemble des biais et des limites inhérentes au projet (voir section 5.6).

En ce qui a trait aux températures intérieures moyennes mesurées, les données colligées fluctuaient généralement dans l'intervalle des plages de valeurs recommandées par l'ASHRAE (Standard 55) pour le confort (soit entre 22 °C et 27 °C en fonction de l'habillement et de l'intensité des activités des occupants) (ASHRAE, 2021). Les valeurs moyennes calculées pour les logements investigués étaient également comprises dans la fourchette des seuils recommandés par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) au regard de la chaleur en milieux intérieurs (moins de 24 °C) (OMS, 2018) et par le Toronto Public Health (26 °C) applicable dans les immeubles résidentiels à logements multiples (Medical officer of Health Toronto, 2015). Ces résultats peuvent notamment s'expliquer par le fait que le projet n'a pu être réalisé durant des vagues de chaleur et que la majorité des ménages a utilisé des appareils de climatisation durant les périodes de mesures. En guise de comparaison, les valeurs moyennes de température mesurées dans des logements sociaux de Toronto au cours de l'été 2015 étaient parfois supérieures aux plages de températures rapportées dans la présente étude pour atteindre, dans certains cas, plus de 28 °C, et ce, même en absence de vague de chaleur (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018).

En ce qui concerne le CO<sub>2</sub>, la concentration moyenne évaluée sur une période de sept jours, tous participants confondus, était de 791,2 ppm lors de la première phase et de 731,0 ppm lors de la seconde phase. Il importe tout de même de relever que lors des deux phases d'investigation, un nombre important (allant jusqu'à la moitié des participants) a été exposé, à au moins une reprise, à des concentrations de CO<sub>2</sub> dépassant le seuil de 1 000 ppm durant la semaine de mesures. Malgré cela, les valeurs moyennes se situaient sous la limite d'exposition de 1 000 ppm recommandée par Santé Canada, seuil généralement considéré par certains organismes comme la limite indiquant un besoin accru de ventilation dans les bâtiments (Anses, 2013; Santé Canada, 2021). Les valeurs mesurées dans le cadre de la présente étude sont également comparables aux taux moyens de CO<sub>2</sub> obtenus par l'Observatoire de la qualité de

l'air intérieur lors de sa campagne effectuée sur 567 résidences situées sur le territoire français, lesquels dépassaient les 750 ppm dans 50 % des logements échantillonnés (OQAI, 2006). À titre comparatif, les concentrations de CO<sub>2</sub> détectées dans les logements sociaux de Toronto étaient légèrement moindres, la plupart d'entre elles étant inférieures à 700 ppm (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018).

Malgré ces résultats relativement satisfaisants, ceux-ci ne peuvent à eux seuls témoigner du fonctionnement adéquat du système de ventilation mécanique, puisque l'air pourrait également s'infiltrer par les interstices de l'enveloppe du bâtiment. Il est possible que les taux de CAH plus élevés observés dans certains logements par le biais des tests d'infiltrométrie après les travaux de rénovation puissent expliquer ces différences. En effet, l'analyse des données d'étanchéité et de consommation énergétique n'a pas permis de démontrer que les travaux de rénovation effectués ont été en mesure de rendre les logements investigués plus étanches aux infiltrations d'air, mieux isolés dans leur ensemble ou encore moins énergivores en saison hivernale. La réduction de cette efficacité observée dans certains logements pourrait également avoir été causée par la présence de discontinuités dans l'enveloppe du bâtiment (p. ex. qui n'ont pu être complètement colmatées ou réparées) ou encore une installation inadéquate de certains appareils (p. ex. climatiseurs portatifs) pouvant occasionner des bris ou des fuites au niveau des portes et des fenêtres. Un suivi longitudinal des logements (c'est-à-dire sur plusieurs années) avant et après la tenue des travaux de rénovation aurait peut-être permis d'identifier une tendance quant à la consommation énergétique pour des ménages dont la constitution et les habitudes sont comparables.

Enfin, pour ce qui est des PM<sub>2,5</sub>, Santé Canada recommande que les concentrations de ce type de contaminant soient maintenues aussi basses que possible en milieu intérieur, car il n'existe aucune valeur seuil concernant leurs effets sur la santé des occupants de bâtiments (Santé Canada, 2012). Par ailleurs, l'OMS propose des lignes directrices pour la qualité de l'air extérieur (qui visent à réduire l'exposition globale à la pollution atmosphérique), dont un seuil pour les PM<sub>2,5</sub> de 15 µg/m<sup>3</sup> sur 24 heures<sup>13</sup>. Il semble que les résultats moyens obtenus dans la présente étude soient généralement supérieurs à cette valeur guide au cours des semaines de mesures. Une faible diminution des concentrations moyennes de particules fines à chacune des périodes du jour et de la nuit considérées a tout de même été observée à la suite de la réalisation des travaux de rénovation. Il est d'ailleurs intéressant de souligner que l'atténuation des concentrations moyennes de ces contaminants pourrait notamment être associée à l'installation de VRC ou d'échangeur d'air dans les logements qui en étaient préalablement dépourvus (appartements de deux chambres à coucher; n = 24). Bien entendu, il est possible que la variabilité des conditions environnementales extérieures prévalentes au cours de chacune des deux phases d'échantillonnage (à l'instar des comportements des occupants) soit au moins partiellement responsable de ces variations.

---

<sup>13</sup> <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>

## PRINCIPAUX CONSTATS

Les travaux de rénovation ne semblent pas avoir soutenu de manière significative l'amélioration des principaux paramètres de qualité de l'air intérieur et du confort thermique des occupants.

Plusieurs limites méthodologiques inhérentes à l'étude menée, notamment l'utilisation répandue de la climatisation par les occupants, sont susceptibles d'avoir modulé ce constat.

L'analyse des données d'étanchéité et de consommation énergétique n'a pas permis de démontrer que les travaux de rénovation effectués ont été en mesure de rendre les logements investigués plus étanches aux infiltrations d'air ou encore moins énergivores.

### 5.2 Variabilité des mesures comportementales

Certains comportements sont reconnus pour leur potentiel d'atténuation de la chaleur des milieux intérieurs lorsqu'ils sont appliqués en temps opportun et de façon assidue (p. ex. fermer les fenêtres et les rideaux exposés au soleil durant le jour, ouvrir les fenêtres la nuit lorsque la température de l'air extérieur est plus fraîche que celle de l'air intérieur, utiliser un ventilateur électrique et réduire les sources de chaleur issues d'équipements ménagés). Les résultats assemblés par le biais du journal d'activités montrent à cet égard une certaine constance des habitudes des ménages participants d'une phase à l'autre; l'utilisation des ventilateurs électriques et de la ventilation naturelle (aération) comptant parmi les comportements d'adaptation à la chaleur ayant été davantage adoptés lors de la seconde phase du projet. La température moyenne des logements abritant les ménages ayant adopté de tels comportements n'était toutefois pas significativement plus basse que celle des autres ménages et il en va de même pour le confort perçu par ces derniers. Ce résultat n'est pas surprenant, dans la mesure où ce type de ventilateur mélange l'air sans le refroidir et que l'effet de rafraîchissement engendré s'appuie essentiellement sur l'évapotranspiration. Il est à noter que les bénéfices pouvant être engendrés par l'utilisation de tels ventilateurs (p. ex. la diminution de la chaleur corporelle interne et la limitation de l'augmentation de la fréquence cardiaque) sont observés pour la population en générale dans des conditions de température relativement élevée (35 °C) (Bröde et Kampmann, 2023), assumant que les utilisateurs s'hydratent adéquatement.

Certaines études ont exploré les comportements jugés efficaces pour mitiger les effets de la chaleur ou atténuer leurs effets négatifs sur la santé des occupants. À cet effet, Nour et Tardif (2022) ont évalué, auprès d'un échantillon d'individus de plus de 60 ans, les impacts sanitaires associés à la chaleur intérieure de 277 logements non climatisés de la Montérégie. Leur collecte de données a été réalisée en trois phases au cours de deux étés, soit en 2017 et en 2018, lors de périodes de temps frais (de 18 °C à 22 °C), de temps chaud (de 28 °C à 30 °C) et de temps très chaud (plus de 30 °C). Les résultats ont montré que bien que les effets sanitaires néfastes autorapportés augmentaient de façon concomitante avec la température intérieure mesurée, il n'a pas été possible d'observer une influence des comportements d'adaptation sur les symptômes ressentis par les participants (Nour et Tardif, 2022). De plus, les mesures d'adaptation comportementales les plus accessibles (p. ex. boire de l'eau, manger des aliments frais/froids et se rafraîchir avec une débarbouillette humide) n'étaient pas adoptées par une forte proportion de participants lors des périodes de chaleur, signifiant la pertinence d'accroître la sensibilisation à l'égard de l'application de ces mesures simples et efficaces. Les résultats de la présente étude n'ont pas permis de démontrer de relations statistiques entre la température intérieure du logement et l'adoption de certains comportements d'adaptation à la chaleur par les occupants<sup>14</sup>. Par ailleurs, Nour et Tardif soulignent que leurs observations « soulèvent un doute quant à l'efficacité des mesures passives pour rafraîchir le logement lorsque les températures extérieures demeurent chaudes ». Ils soulèvent également « la nécessité de considérer la climatisation pour certaines populations et certains types de bâtiments » (Nour et Tardif, 2022).

### **Appareils domestiques générant de la chaleur**

La réduction de l'utilisation des appareils produisant de la chaleur en période de chaleur importante (p. ex. cuisinière, sècheuse, lave-vaisselle) est souvent recommandée et constitue un des comportements inclus dans l'indice d'adaptation à la chaleur estivale développé au Québec (Valois *et al.*, 2017). Dans le cadre du présent projet de recherche, l'utilisation somme toute constante de ces appareils qui génèrent de la chaleur (telle la sècheuse) a été notée pour 79 % (2017) et 85 % (2019) des participants au cours des deux semaines d'investigation. Ainsi, les participants de l'étude n'ont, en grande partie, pas adopté ce comportement préventif. Il faut cependant rappeler que les deux phases de collecte de données n'ayant pu être réalisées pendant des périodes de canicules importantes, il est relativement attendu que les participants aient utilisé au moins une fois leurs appareils électroménagers au cours de la semaine de mesures.

### **Ventilation naturelle**

Parmi les mesures de gestion de la chaleur pouvant être déployées par les occupants, la ventilation naturelle nocturne gagnerait également à être davantage pratiquée (lorsque possible) par une plus large proportion de l'échantillon de participants. Toutefois, il semble que certaines contraintes puissent faire entrave à l'utilisation de cette mesure. En effet, il peut s'avérer complexe pour les occupants de présumer du meilleur moment pour ouvrir les fenêtres de leur logement (soit lorsque la température extérieure devient plus basse que la température

---

<sup>14</sup> Données non présentées.

intérieure). Le contexte d'îlot de chaleur urbain peut non seulement réduire la plage horaire d'utilisation de la ventilation nocturne en période de chaleur, mais peut engendrer des enjeux d'intimité, de sécurité et de quiétude une fois la nuit tombée. Des études ont montré que les problématiques de criminalité et de sécurité pouvaient constituer un frein à l'ouverture des fenêtres la nuit lors de vagues de chaleur (Gronlund, 2014; Klinenberg 2002 – tiré de Kenny *et al.* 2019). De plus, le fait d'ouvrir les fenêtres en période nocturne pour rafraîchir les lieux, une recommandation fréquente des autorités de santé publique, ne semble pas être soutenu par les résultats du projet de recherche mené en Montérégie (Nour et Tardif, 2022). Les températures moyennes étaient effectivement plus élevées dans les logements investigués lorsque les fenêtres étaient ouvertes la nuit. Il est possible que les logements bénéficiant de climatisation (activée ou non en période nocturne) aient ainsi laissé pénétrer la chaleur extérieure rémanente qui, dans un contexte d'îlot de chaleur, se dégage des matériaux du quartier (béton, asphalte, etc.) (Nour et Tardif, 2022). Il est également possible que le nombre de fenêtres ouvertes (ou l'emplacement de celles-ci) n'ait pas engendré un déplacement d'air suffisant pour favoriser la dissipation de la chaleur accumulée dans le milieu intérieur (Santamouris, 2004).

### **Ventilation mécanique**

Parmi les autres mesures pouvant influencer la gestion de la chaleur et la qualité de l'air intérieur, il importe de considérer la ventilation mécanique (ici l'usage d'unités VRC). La totalité des logements a été équipée de ces appareils au cours des travaux de rénovation. À cet effet, près de 20 % des participants n'ont pas utilisé leur échangeur d'air lors des périodes d'investigation de 2017 et de 2019. Ici encore, des efforts de sensibilisation au sujet de l'utilisation adéquate de ce type d'équipement, particulièrement en situation de vague de chaleur, seraient utiles. Contrairement à l'usage de la ventilation naturelle, l'utilisation combinée de la ventilation mécanique et de la climatisation s'avère une pratique pouvant allier gain de confort, atténuation des concentrations de contaminant des milieux intérieur et économie d'énergie (assumant que la climatisation est jugée nécessaire). Bien entendu, ces bénéfices sous-tendent un entretien régulier des VRC; élément qui constitue un autre enjeu de taille dans le logement locatif public.

### **PRINCIPAUX CONSTATS**

**L'adoption de comportements d'adaptation ne semble pas avoir modulé la température des logements, bien que plusieurs limites aient pu affecter ce résultat.**

### 5.3 Confort thermique

En dépit de la réalisation des travaux de rénovation et du niveau de satisfaction généralement élevé de la température de leur logement, les occupants ayant éprouvé au moins un épisode d'inconfort ont plus que doublé au cours de la seconde phase de mesure. Ce résultat est peut-être associé au fait qu'une moins grande proportion d'entre eux rapportait posséder au moins un climatiseur portatif au cours de cette seconde phase. Une autre hypothèse plausible est que les travaux de rénovation (et en particulier ceux portant sur l'isolation de l'enveloppe) aient pu engendrer ces inconforts, tels que suggérés par les résultats du modèle numérique. Des variations entre les perceptions des occupants des deux phases, dont seulement huit ont participé aux deux phases lors de la même période de mesures, ainsi que les différences entre les conditions climatiques de 2017 et de 2019 peuvent également expliquer les changements observés.

Bien que la température avec humidex n'ait pas été calculée systématiquement comme paramètre de l'étude, les températures moyennes d'humidex oscillaient autour de 28 °C à 30 °C, alors même qu'il ne s'agissait pas d'une vague de chaleur et que plusieurs participants possédaient des climatiseurs. Il est donc possible de penser que les inconforts puissent être dus en partie à ce facteur.

Plus de la moitié des participants rapportaient être physiquement affectés (un peu, moyennement ou beaucoup) par la chaleur de leur logement en période estivale (environ le tiers rapportant être moyennement ou beaucoup affecté). Un constat similaire peut être articulé pour ceux rapportant que leur santé mentale est négativement affectée lorsqu'il fait très chaud et très humide l'été (près de 50 % indiquant subir un peu d'impact, mais un cinquième seulement rapportant subir moyennement ou beaucoup d'effets). Ces chiffres semblent un peu plus élevés que ceux rapportés dans deux sondages réalisés par l'Observatoire québécois de l'adaptation aux changements climatiques en 2015 et en 2016 (Valois *et al.*, 2018). Ces résultats indiquent qu'environ 45 % des individus interrogés en 2016 percevaient un impact de la chaleur sur leur santé physique, tandis que 20 % percevaient de tels impacts sur leur santé mentale (Valois *et al.*, 2018). Ces différences pourraient suggérer la présence d'une vulnérabilité accrue de la population spécifique étudiée dans le cadre du présent projet de recherche; que cette vulnérabilité découle de facteurs de défavorisation individuels, environnementaux ou spécifiquement associés au logement.

D'après les hypothèses rapportées par certains auteurs, l'impossibilité de contrôler la température intérieure des logements au moyen d'un thermostat, d'un climatiseur ou d'un système de chauffe semblait accentuer le sentiment d'insatisfaction des occupants, même si ces derniers ont la possibilité d'ouvrir les fenêtres (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018). Par conséquent, le fait de pouvoir maintenir la température intérieure au niveau désiré pourrait favoriser la perception de confort (Nicol et Humphreys 2002 – tiré de Kenny *et al.* 2019), et ce, même si cette température s'avère élevée. Cette quête de satisfaction et de confort thermique peut nécessairement avoir contribué à stimuler l'achat d'un ou de plusieurs climatiseurs destinés à

rafraîchir les logements, la proportion de participants possédant des dispositifs (74 %; toutes phases confondues). Bien que l'acquisition de tel système soit onéreuse pour des ménages à faible revenu, leur efficacité est très largement reconnue alors qu'en contrepartie, la méconnaissance de l'accessibilité et l'efficacité perçue ou avérée des moyens de rafraîchissement alternatifs pourrait également avoir favorisé ce choix. Soulignons au passage qu'un supplément de 5 \$ par climatiseur par mois est demandé au locataire pour couvrir les frais d'électricité associés à l'usage de climatiseurs, le montant peu élevé ayant de surcroît pu contribuer à étendre cette pratique.

## PRINCIPAUX CONSTATS

**Les occupants semblent rechercher une forme de confort thermique en utilisant des dispositifs de climatisation pour moduler, au besoin, la température de leur logement, et ce, même hors des vagues de chaleur.**

### 5.4 Perspectives complémentaires issues de la modélisation

Les données modélisées offrent un éclairage complémentaire aux données empiriques assemblées. D'emblée, l'ensemble des logements modélisés présentait des températures sèches supérieures lors de la phase de postrénovation. Cette différence était d'ailleurs plus marquée au RDC en raison des spécificités du modèle utilisé (de type segmenté) qui ne considérait pas les flux de chaleur entre les étages d'un même logement. Il est ainsi possible de présumer que des différences de température encore plus importantes auraient pu être modélisées à l'étage (c'est-à-dire dans les chambres à coucher). En plus de la diffusion de l'énergie radiante qui affecte préférentiellement les chambres de l'étage en raison de la proximité du toit, l'air chaud du RDC pourrait s'engouffrer à l'étage en période de vague de chaleur pour ainsi rendre les conditions encore plus inconfortables pour les occupants. Bien que les données assemblées ne puissent pas témoigner de cet enjeu, cela a été démontré par d'autres auteurs.

En effet, dans un projet d'évaluation des impacts sanitaires associés à la chaleur intérieure pour des individus de plus de 60 ans en Montérégie, il a pu être constaté que l'environnement bâti a une influence notable sur les températures à l'intérieur du domicile, celles-ci étant plus élevées dans les logements situés dans des bâtiments de 24 logements et plus, ceux situés sous le toit et ceux situés dans un îlot de chaleur. Les auteurs concluent notamment que « ces éléments devraient être pris en compte dans les projets de constructions d'habitations, particulièrement dans le contexte de densification du territoire favorisé ces dernières années, lequel privilégie les bâtiments de très grande taille » (Nour et Tardif, 2022). Kenny *et al.* (2019) abondent dans le même sens et rapportent que certains auteurs considèrent que l'urbanisation (Smoyer *et al.*, 2000; Stone et Rodgers, 2001; Medina-Ramon et Schwartz, 2007 – tirés de [Kenny *et al.*, 2019]) et la présence d'îlots de chaleur urbains provoque des augmentations de températures intérieures, puisque les bâtiments ne peuvent, dans de telles conditions, évacuer les charges thermiques excédentaires en période nocturne (Rogot *et al.* 1992 – tiré de [Kenny *et al.*, 2019]).

Si les travaux d'isolation et d'étanchéification avaient apporté les résultats escomptés (tels que prédits par le modèle), les inconforts ressentis par les occupants en période de vague de chaleur auraient présumément été plus marqués chez les occupants ne bénéficiant pas de la climatisation ou ne faisant pas usage de la ventilation naturelle ou mécanique de façon appropriée. Le calcul du PPD généré à partir des résultats du modèle rapporte que, tant au RDC qu'à l'étage, la période horaire quotidienne durant laquelle les occupants sont susceptibles d'éprouver des inconforts pourrait s'allonger considérablement en période de vague de chaleur à la suite de la mise en œuvre des travaux appliqués à l'enveloppe du bâtiment. En effet, le calcul du PPD qui, lorsqu'assujéti à des conditions caniculaires, s'est avéré plus élevé à la suite de la mise en œuvre des travaux de rénovation pour atteindre 100 % lorsque la température extérieure atteignait plus de 30 °C. Soulignons au passage que l'ASHRAE considère qu'un milieu intérieur est confortable lorsque 80 % des occupants sont satisfaits des conditions ambiantes (ASHRAE, 2020). Selon cette approche, il ne s'avère donc pas opportun d'atteindre une satisfaction généralisée, mais en dépit du caractère approximatif de cette dernière, le manque à gagner demeure préoccupant. En effet, rappelons que les résultats des travaux de la modélisation appliqués aux unités locatives investiguées suggéraient l'atteinte d'un taux d'insatisfaction de 100 % en contexte de vague de chaleur (T. int. > de 36 °C) dans des logements rénovés non climatisés.

En l'absence de dispositif de climatisation, une isolation et une étanchéité à l'air accrue pourraient donc contribuer à la surchauffe des milieux intérieurs lorsque des mesures de ventilation adéquates ne sont pas mises en place pour évacuer les charges thermiques qui s'accumulent dans les logements au cours des journées chaudes. Plusieurs études relevées dans la revue de littérature de Laouadi *et al.* (2018) ont également réalisé des simulations pour évaluer le potentiel de mesures d'adaptation à réduire les risques de surchauffe. Les résultats de diverses études semblent confirmer que l'isolation intérieure des murs peut accroître le risque de surchauffe des milieux intérieurs associés (Porritt *et al.*, 2012; Pyrgou *et al.*, 2017; – tiré de Laouadi *et al.*, 2018). À l'inverse, l'usage de pare-soleil et le contrôle de la ventilation (visant à limiter l'introduction d'air chaud en provenance de l'extérieur) comptaient parmi les mesures jugées plus efficaces (Porritt *et al.*, 2012; Ascione *et al.*, 2015; – tiré de Laouadi *et al.*, 2018). Un éventail de mesures pourrait donc être mis en œuvre pour prévenir la surchauffe des milieux résidentiels rénovés, dont la priorisation de certaines mesures de rénovation pour éviter d'exacerber les problèmes de surchauffe intérieure (Collins et Dempsey, 2019). Tel que montré par les travaux de modélisation effectués, l'application de mesures passives comme les toits blancs ou les murs végétalisés, particulièrement lorsque combinés, peuvent présenter un potentiel de réduction de la chaleur intérieure mesurable.

## PRINCIPAUX CONSTATS

Les résultats de la modélisation suggèrent une perte potentielle de confort encore plus importante en période de canicule pour les occupants des logements du complexe Raymond-Brunet ne bénéficiant pas de la climatisation. Par ailleurs, la réalisation des travaux de modélisation a permis de constater que l'application de mesures passives de gestion de la chaleur, et ce, tant sur une base individuelle que combinée, peut contribuer à l'amélioration du confort thermique des occupants du complexe résidentiel investigué. L'application concourante de mesures passives pourrait, dans une certaine mesure, contribuer à limiter la surchauffe des bâtiments ou encore, limiter les besoins en climatisation des occupants de ces logements.

### 5.5 Intérêt de la méthodologie préconisée

Au moment de débiter le projet d'évaluation en 2017, aucune étude réalisée au Canada n'avait tenté d'explorer la contribution concourante et respective de mesures d'adaptation relatives à l'enveloppe, aux dispositifs de ventilation mécanique et aux comportements des occupants de bâtiments résidentiels après des travaux de rénovation. L'approche méthodologique pluridisciplinaire (c'est-à-dire la collecte de données environnementales, l'administration de questionnaires et le suivi de journaux d'activités, la modélisation des milieux investigués, l'interprétation des données par le biais d'approches statistiques et d'un survol de la littérature), développée et l'envergure du projet d'évaluation, réalisé avec plusieurs partenaires du milieu, en faisait également une initiative unique en son genre au Québec. Tandis que bon nombre de démarches d'évaluations ou de certifications de bâtiments d'habitation neufs ont cours (p. ex. Novoclimat et LEED), peu d'information est disponible à l'heure actuelle quant à l'efficacité de mesures d'adaptation dans un contexte de rénovation de bâtiments existants. La méthodologie mise de l'avant dans la présente étude intégrait d'ailleurs diverses approches complémentaires (expérimentale et mathématique) qui permettaient aux auteurs de multiplier les occasions d'assembler des informations pertinentes pour répondre à la question de recherche.

#### Approche expérimentale

L'approche expérimentale avait pour but de procéder à l'évaluation de différents paramètres de la qualité de l'air intérieur (dont la température, l'humidité relative, les concentrations de CO<sub>2</sub> et les concentrations de PM<sub>2,5</sub>) des bâtiments à l'étude, et ce, tant avant qu'après les rénovations dans un contexte de vague de chaleur. Des tests d'infiltrométrie ainsi qu'une évaluation de la consommation énergétique ont également été intégrés afin de compléter l'analyse comparative de la performance des logements rénovés. La participation active des occupants par le biais des questionnaires et des journaux d'activités a également permis de soulever le rôle important de ceux-ci dans la gestion de la chaleur intérieure. De plus, diverses mesures passives d'atténuation de la chaleur, généralement promues par les organismes sanitaires, ne sont pas toujours mises en place et ne sont pas nécessairement efficaces en toutes circonstances (p. ex. fermeture des

fenêtres pour éviter l'entrée d'air chaud durant la journée et ouverture des fenêtres la nuit pour rafraîchir).

Bien que la réalisation de cette analyse ait permis de constater une importante variabilité des données pour chaque période de collecte et entre les périodes de collecte (c'est-à-dire importante variabilité intraphases et interphases), celle-ci témoigne de l'hétérogénéité des sources de contaminants de l'air intérieur, tant au regard de leur nature que de leur intensité, ainsi que de la variabilité de l'efficacité des mesures d'atténuation appliquées ou soutenues par les occupants. L'approche expérimentale préconisée a d'ailleurs permis de mettre en lumière des interactions complexes entre la présence de contaminants en milieu intérieur, l'étanchéité de l'enveloppe des logements et la consommation électrique des ménages concernés. En revanche, puisque ces travaux n'ont pu être réalisés en contexte de vague de chaleur et que les données empiriques obtenues étaient très largement influencées par la présence de climatiseurs, le recours à la modélisation a permis de pallier ces contraintes et d'obtenir des informations complémentaires d'intérêt.

### **Approche mathématique**

De façon complémentaire, l'application du volet de modélisation, bien qu'assujéti à de nombreux biais (les systèmes complexes étant réduits à des calculs mathématiques et dépendant des variables intégrées au modèle), offre une option de solution pour généraliser les différents cas de figure et permet d'apprécier l'influence des différents éléments contributifs à la surchauffe des logements dans une perspective générale. Cette approche permet d'établir un bilan thermique des logements étudiés en période de chaleur, de simuler le confort d'occupants types au regard des conditions ambiantes résultantes, d'évaluer théoriquement l'apport de mesures passives additionnelles et, ultimement, de porter un regard quantitatif sur l'efficacité des travaux de rénovation réalisés.

Cette approche a également permis d'uniformiser l'influence des comportements des occupants dont la portée s'est avérée aussi importante que variable. L'évaluation de l'efficacité théorique de certaines mesures d'adaptation (ajout de pare-soleil, de murs végétaux et de toitures blanches) constitue un atout non négligeable pour accroître la compréhension du phénomène de la gestion de la chaleur intérieure dans un contexte réel de bâtiment en rénovation.

## **5.6 Biais et limites de l'étude**

Les approches méthodologiques complémentaires appliquées à la présente étude ont permis d'assembler un éventail de données d'intérêt. Toutefois, les différentes limites et contraintes d'interprétation qui sont présentées dans les paragraphes suivants réduisent les possibilités d'articuler une analyse davantage étayée des résultats obtenus. Les comparaisons avec les données issues de la littérature sont également limitées par le fait que peu d'études canadiennes ont exploré les impacts de travaux de rénovations sur le confort et la surchauffe des bâtiments.

### 5.6.1 Recrutement

La principale limite du projet relève du petit effectif de participants et de leur diversité limitée (âge, sexe, taille du ménage, etc.). Cette dernière fait en sorte que bien que des comportements d'intérêt aient pu être relevés, aucune association significative entre ceux-ci et la température des logements n'a pu être identifiée par l'entremise des analyses statistiques réalisées. De plus, l'un des éléments critiques du devis du projet d'étude relevait de la participation des mêmes ménages volontaires aux deux phases d'investigation successives. Considérant qu'il s'est écoulé deux années complètes entre ces différentes phases du projet et qu'une fraction des participants de la première phase avait déménagé, ou n'était plus encline à poursuivre leur implication dans la seconde phase, cet aspect est susceptible d'avoir engendré des biais rendant la comparaison des résultats interphases difficile. De nouveaux participants ont finalement dû être recrutés pour compléter la seconde cohorte pour pallier partiellement ce problème. Ainsi, l'échantillon de convenance assemblé, bien que diversifié, n'était pas représentatif de l'ensemble de la population du complexe Raymond-Brunet. L'échantillon n'est pas non plus représentatif de la population en général, puisqu'il visait un groupe particulier dans un complexe de logements à loyer modique.

En outre, la très importante proportion de participantes féminines à cette étude a pu engendrer une surreprésentation de certains comportements et de perception en lien avec la chaleur. En effet, les conclusions d'une récente méta-analyse suggéraient que les femmes sont moins vulnérables que les hommes à la chaleur, tant pour les problèmes de santé qu'au regard de la mortalité due à la chaleur, et ce, en bas âge, mais également jusqu'à l'âge de 80 ans (Gifford *et al.*, 2019). La plus grande surface corporelle des femmes par rapport à leur masse serait notamment associée à une plus grande potentialité de dissipation de la chaleur (Shapiro *et al.*, 1980), ce qui en retour pourrait moduler la tolérance à la chaleur des femmes ainsi que les aspects associés documentés dans la présente étude.

De même, il est également important de souligner que l'origine des participants – environ la moitié étant nés à l'extérieur du Canada – ait pu contribuer à moduler les perceptions et les comportements des répondants au regard des enjeux que sont les conditions de logement confortables et la résilience aux vagues de chaleur. Il en va de même avec les hétérogénéités dans la composition des ménages (nombre et âge des occupants) qui ont également pu contribuer à faire varier les perceptions d'un ménage à un autre, de même que les comportements et les habitudes de ces derniers. Ces variations dans les perceptions de la chaleur et l'adoption de comportements visant à atténuer les effets liés aux températures élevées en milieux intérieurs ont également été notées chez les participants d'autres études canadiennes (Diaz Lozano Patiño *et al.*, 2018; Valois *et al.*, 2017). Il a d'ailleurs été noté que les participants qui perçoivent davantage l'inconfort lorsqu'exposés à de hautes températures sont généralement moins adaptés à la chaleur et plus enclins à adopter des comportements préventifs lors de vagues de chaleur; la perception du risque étant une dimension psychologique importante de l'adaptation (Valois *et al.*, 2017).

### 5.6.2 Données structurales

L'acquisition des données dites structurales (c'est-à-dire l'ensemble des données descriptives rattachées aux bâtiments) était insuffisante pour documenter les spécificités de chacun des logements, et ce, tant en amont qu'en aval des travaux réalisés (p. ex. orientation géographique, positionnement du logement dans le complexe, influence des logements adjacents et de l'environnement limitrophe). Celles-ci offraient cependant une idée des caractéristiques générales de leur enveloppe (p. ex. matériaux composant les murs et niveau d'isolation générique), mais ne précisait pas si des problèmes ou des défaillances étaient présents au niveau de cette dernière, si les travaux de mise à niveau étaient parvenus à pallier ces irrégularités et, surtout, si ces travaux ont été exécutés de façon uniforme et optimale à l'échelle du bâtiment. De plus, seul un nombre ciblé de mesures d'adaptation à la chaleur ont pu être implantées dans le projet de rénovation, tant à l'intérieur des logements que dans la périphérie de celui-ci. Bien que leur efficacité ait été démontrée (INSPQ, 2021), le financement pour le projet de rénovation ne pouvait inclure toutes les mesures souhaitées par les gestionnaires de l'OHO.

### 5.6.3 Données environnementales

La présente étude a également engendré des incertitudes quant à l'évaluation de l'efficacité des travaux de rénovation, et ce, essentiellement en raison de l'utilisation fort répandue de la climatisation. En effet, l'importante proportion de ménages ayant recours à l'usage de climatiseurs portatifs a contribué à atténuer la température moyenne des logements investigués de même que les inconforts ressentis par ces derniers. Les visites à domicile ont permis de constater que les ménages participants avaient recours à une variété d'appareils (bien que non inspectés systématiquement; la puissance semblait varier entre 5 000 et 10 000 BTU pour la plupart des appareils observés) et que ceux-ci étaient installés et utilisés de façon plus ou moins optimale, ce qui rendait l'application de facteur de correction pour la chaleur en milieu intérieur impossible.

De plus, la température, les niveaux d'humidité relative et les contaminants mesurés dans les logements investigués peuvent, dans une certaine mesure, avoir été influencés par les infiltrations en provenance des logements mitoyens ou de l'extérieur (p. ex. l'utilisation d'un barbecue, de feux de foyer extérieurs ou la présence de véhicule[s] à l'arrêt, mais dont le moteur est maintenu en fonction). L'évaluation de l'indice humidex (qui combine la température et l'humidité en un seul déterminant reflétant la température perçue) n'a pas non plus été considérée dans le cadre de cette étude.

Bien que les conditions environnementales extérieures aient été approximées à l'aide de la station météo d'Environnement Canada la plus proche (soit celle située à l'aéroport d'Ottawa), des variations à l'échelle locale ont pu contribuer à engendrer certaines divergences avec ces mesures de référence. Un facteur de correction a tout de même été appliqué au regard de la température extérieure afin de tenir compte de l'effet d'îlot de chaleur. Cette correction de la

température sèche n'est peut-être pas parfaitement représentative des conditions locales, puisque celle-ci s'appuie sur un nombre limité de mesures.

Enfin, en dépit du fait que la première phase de collecte de données prérénovation ait été repoussée à la fin de la période estivale de 2017 afin d'augmenter les chances de rencontrer une canicule, il n'a pas été possible de réaliser les mesures en période de vague de chaleur. Il est à noter que les mêmes contraintes ont été rencontrées lors de la phase de collecte post-rénovation. Ainsi, bien que ces deux phases de mesures – menées à deux ans d'intervalle – aient été réalisées au cours de la même période de l'année (soit entre le 20 et le 28 août environ), celles-ci ne correspondaient toutefois pas à des épisodes de chaleur extrême, ce qui influence très certainement la collecte et l'interprétation des données. L'influence des conditions environnementales sur les participants (dont la température de l'air ambiant) observées durant les jours et les semaines précédant la collecte de données peut également avoir eu une certaine influence sur les données relevant des perceptions et des comportements des occupants. Encore une fois, cet aspect n'a pas été considéré.

#### **5.6.4 Consommation électrique et mesure d'étanchéité**

Comme précédemment mentionné, l'utilisation de la climatisation par une forte proportion des ménages participants a contribué à accroître la variabilité de la consommation énergétique de ces derniers assumant qu'en période estivale, l'utilisation de ce type d'appareil engendre une consommation électrique non négligeable. D'autres comportements ont pu influencer la consommation électrique des logements tels que la présence d'un nouveau membre de la famille ou le départ de l'un d'entre eux, une présence plus importante au domicile en raison de la maladie, du télétravail, l'installation ou le retrait d'électroménagers plus ou moins énergivores, l'utilisation variable du système de chauffage et des dispositifs de ventilation, etc. En ce qui concerne les données d'étanchéité, il est important de souligner que celles-ci ont été assemblées lors des deux phases du projet par deux firmes distinctes. Alors que l'évaluation des logements en 2019 a été réalisée par une firme différente<sup>15</sup>, ce type d'essai doit être réalisé selon un protocole standardisé, ce qui devrait théoriquement aplanir les sources de variabilité. Il est donc impossible de garantir la qualité et la standardisation des résultats obtenus (p. ex. vérification du retrait des climatiseurs portatifs ou de fenêtre avant de procéder aux tests). Ici encore, le comportement de certains occupants aurait pu altérer certains résultats.

#### **5.6.5 Données comportementales**

Le suivi et la caractérisation des comportements adoptés par les occupants des logements investigués, traduit dans un journal d'activités, s'est avéré l'une des tâches les plus difficiles à réaliser dans le cadre de ce projet. Afin de favoriser le remplissage de ces journaux et après l'avoir validé auprès de sujets tests, l'équipe de recherche a été contrainte de limiter le nombre de questions. Ce faisant, certaines questions d'intérêt pour caractériser le confort réel et perçu

---

<sup>15</sup> Bien que la firme engagée lors de la seconde phase de mesures ne soit pas la même qu'en 2017, la méthode de mesure par infiltrométrie (« porte soufflante » ou *blow-air door*) est standardisée, quoique des variations puissent être occasionnées par l'application plus ou moins rigoureuse de la méthode par le technicien.

n'ont pu être adressées, limitant l'interprétation des aspects liés au confort (p. ex. niveau d'activité à l'intérieur et à l'extérieur, type d'habillement, mode d'utilisation de la climatisation, etc.). Bien que l'échantillon de participants fût composé de ménages volontaires, ceux-ci ont été sectionnés parmi un petit groupe de répondants éligibles, mais qui ne percevaient sans doute pas toutes les exigences associées à la participation à une telle étude et plus spécifiquement, celles en lien avec le remplissage du journal d'activités. Ainsi, cet outil de collecte de données ne s'est pas avéré aussi utile et efficace qu'envisagé au départ. En effet, certains participants ont complété le journal seulement une fois la semaine de mesures terminée, démarche engendrant des biais de mémoire, de confirmation et de désirabilité lorsque finalisé en présence d'un membre de l'équipe de projet.

Bien que le projet ne visât pas à sensibiliser les occupants à adopter des comportements adaptés, il importe de noter que les ménages participants étaient potentiellement exposés, à l'instar de l'ensemble de la population, aux recommandations de santé publique à appliquer en période de chaleur. En participant à l'étude (dont certains aux deux phases de celle-ci), il est possible de présumer que les ménages volontaires ont été davantage enclins à suivre ces recommandations, même si cette hypothèse ne peut être validée par les données assemblées par l'entremise du journal d'activités. Les biais de désirabilité souvent évoqués dans ce type d'étude ne semblent pas avoir incité les occupants à modifier leurs comportements et leurs habitudes, mais l'effet Hawthorne aurait pu les inciter à être plus vigilants dans leur gestion de la chaleur. En effet, il est possible de constater une certaine uniformité des actions menées par les occupants d'une phase à l'autre, notamment en ce qui a trait à celles visant à assurer le confort thermique.

### **5.6.6 Données modélisées**

L'approche de modélisation du projet était également sujette à plusieurs biais et contraintes qui, de façon individuelle et concourante, peuvent avoir influencé la validité externe des résultats générés. Puisque la réalisation de simulations numériques implique l'application d'hypothèses simplificatrices qui permettent d'aborder des phénomènes physiques complexes à l'aide d'équations mathématiques, la robustesse de certains postulats de départ doit également être considérée lors de l'interprétation des résultats. Ainsi, à des fins de calcul, l'air du milieu intérieur considéré (soit les pièces du RDC dans le cas présent) est présumé non climatisé, bien mélangé et sa température est assumée être uniforme. Cette même contrainte s'applique également à l'enveloppe du bâtiment. Par exemple, les caractéristiques d'un mur sont considérées homogènes et isotropes sur toute sa surface, et ce, en dépit de la présence potentielle d'éclairage ou d'ombrage. Ainsi, chaque surface est considérée comme possédant : 1) une température uniforme; 2) une irradiation uniforme; 3) un rayonnement uniforme et diffus conduisant à un transfert de chaleur unidimensionnel. Qui plus est, le modèle n'assume aucun échange de chaleur (convectif ou radiatif) entre les différents étages d'un même logement ni entre les différents logements du complexe résidentiel. L'habillement des fenêtres demeure

inchangé et maintenu en position fermée en tout temps<sup>16</sup>. Le modèle utilisé assume également que les occupants sont exposés à des flux d'air de très faible vitesse alors que les courants d'air générés par la ventilation naturelle, les ventilateurs électriques sur pied ou les climatiseurs ne sont pas considérés par le modèle.

De plus, les simulations effectuées assument que les occupants mènent leurs activités selon un horaire prédéterminé et reproductible sans ajuster les paramètres de confort de leur logement (p. ex. ouverture de fenêtre, mise en marche ou ajustement de la température de réglage d'un climatiseur). Le comportement des occupants et les appareils ménagers associés sont considérés identiques d'un logement à l'autre ainsi qu'avant et après les travaux de rénovation. Le nombre d'occupants considéré pour chaque logement correspond au nombre de chambres plus un et le métabolisme de ces derniers est assumé comme étant faible (occupants au repos).

## 5.7 Pistes de réflexion

L'étude de l'efficacité des mesures passives d'atténuation à la chaleur appliquées dans un contexte de mise à niveau de logements a permis de mettre en lumière un enjeu qui jusque-là ne semblait pas être suffisamment considéré. En effet, et tenant compte des limites inhérentes au projet de recherche, les résultats assemblés suggèrent que les travaux de rénovation n'ont pas permis de pallier la surchauffe des logements du complexe investigué et soulèvent qu'ils pourraient l'accroître dans certaines circonstances. Cela a permis de mettre de l'avant la tension entre le besoin de bien isoler les bâtiments pour limiter les pertes de chaleur en saison hivernale et la nécessité d'évacuer les charges thermiques excédentaires de ces derniers en saison estivale. De plus, il a été montré, par modélisation, que l'application de mesures passives d'atténuation de la chaleur (toit blanc, mur végétalisé et pare-soleil) peut engendrer des effets bénéfiques notables sur la chaleur intérieure, particulièrement lorsque ces dernières sont implantées de façon combinée. À cela s'ajoute la démonstration par le biais de la modélisation que la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain peut avoir un effet notable à l'intérieur des logements à proximité, cette mesure ne relevant toutefois pas de la responsabilité des occupants de ce complexe sous l'égide de l'OHO (p. ex. la réduction des surfaces asphaltées et la plantation d'arbres).

Les résultats issus des simulations numériques suggèrent que l'application de toutes ces mesures ne peut, sur une base individuelle, être suffisante pour assurer le confort thermique des occupants au cours d'une vague de chaleur, particulièrement lorsque celles-ci se prolongent sur plusieurs jours. Cela est d'autant plus important dans le contexte où les projections climatiques des prochaines décennies prévoient un allongement de la période estivale et une augmentation importante de la fréquence et de l'intensité des épisodes de chaleur extrême.

Non seulement les bâtiments doivent-ils être construits ou rénovés adéquatement, mais ils devraient autant que possible prévoir l'ajout de mesures passives pour limiter l'introduction et la

---

<sup>16</sup> L'habillement considéré est constitué de stores à persiennes horizontales ayant une réflectance de 50 % en position fermée.

rétenion de la chaleur à l'intérieur. Des mesures visant la réduction de l'effet d'îlot de chaleur à proximité des habitations devraient également être favorisées, tant par la ville que par les gestionnaires de bâtiments, pour les portions qui concernent leurs terrains, que les occupants par leur emploi des espaces extérieurs individuels. De plus, tous les acteurs impliqués dans la conception, la construction, l'exploitation et la rénovation des bâtiments résidentiels doivent agir de façon cohérente afin que ces derniers puissent prendre en charge les exigences actuelles de leur clientèle tout en considérant leurs besoins futurs.

Comme le précisait le plus récent rapport du Groupe de travail sur l'adaptation de l'Alliance mondiale pour les bâtiments et la construction :

« La législation, et en particulier les normes de construction et d'urbanisme, ne tiennent actuellement pas compte de ces risques climatiques futurs. L'incertitude climatique est parfois invoquée comme raison pour retarder l'action. [...]. Le coût de l'inaction dépassera largement le coût de l'action. En effet, les dommages causés par le changement climatique coûteront plus cher demain que la mise en œuvre de leurs actions préventives respectives dès aujourd'hui. » (GlobalABC, 2021)

Comme en témoigne la présente étude d'évaluation, les différentes mesures d'adaptation à la chaleur peuvent être implantées pendant la phase d'exploitation d'un bâtiment résidentiel. En revanche, il semblerait plus opportun de concevoir ces derniers en tenant compte de ce contexte d'adaptation aux changements climatiques, et ce, dès les premières étapes de conception d'un nouveau projet de constructions résidentielles, dans une perspective globale, en mobilisant tous les acteurs susceptibles d'intervenir tout au long du cycle de vie du bâtiment. De plus, afin d'assurer une meilleure résilience des bâtiments au regard des changements climatiques, le développement d'une culture de gestion du risque et l'amélioration des pratiques de construction au-delà des exigences prescrites dans l'actuel cadre réglementaire pourrait s'avérer nécessaire. Il serait donc opportun de réfléchir à l'optimisation des politiques publiques portant sur la construction de bâtiments résidentiels ainsi qu'en matière d'aménagement du territoire. Il est entendu que les budgets autorisés et les limites administratives peuvent contraindre les organismes publics à prioriser certaines mesures jugées plus efficaces ou accessibles et en délaissier d'autres. La réalisation d'analyses coût-efficacité portant sur les mesures proposées (p. ex. pare-soleil) pourrait également contribuer à orienter les décisions à cet effet.

Ensuite, et même si toutes ces mesures sont implantées, celles-ci peuvent s'avérer peu efficaces si les comportements des occupants ne sont pas adaptés et contribuent au maintien ou à l'augmentation de la température intérieure. Il semble donc que l'implication et la sensibilisation des occupants soit une avenue à emprunter en concomitance avec des changements à l'environnement bâti afin notamment de s'assurer que les appareils (p. ex. VRC) et les lieux sont utilisés de la manière la plus optimale possible au cours des épisodes de chaleur extrême. Considérant la large adhésion à la climatisation au sein du complexe Raymond-Brunet, il pourrait s'avérer opportun de sensibiliser, voire de soutenir les occupants aux meilleures pratiques d'installation des unités de climatisation mobiles, et ce, tant pour optimiser le

rafraîchissement des occupants et l'efficacité énergétique que pour limiter les bris au niveau de l'enveloppe du bâtiment. Il serait également opportun de mieux communiquer aux occupants les multiples avantages de l'utilisation adéquate de la ventilation mécanique. Par exemple, l'utilisation de la climatisation devrait s'accompagner de l'usage du VRC considérant les avantages associés à ce type de système (renouvellement constant, filtration, préconditionnement et distribution de l'air).

De plus, dans une perspective de maintien de la qualité de l'air intérieur et d'évacuation des charges excédentaires de chaleur et de vapeur d'eau, une meilleure promotion de l'utilisation adéquate des extracteurs de cuisine et de salle de bain et de la ventilation naturelle nocturne pourrait constituer des avenues de gestion simples et efficaces. Parmi les conseils généralement promulgués par les instances de santé publique, rappelons la nécessité de se préparer aux vagues de chaleur extrême. Certains organismes recommandent de prévoir une trousse regroupant certains objets pouvant être utiles lors de chaleur extrême, tels que des bouteilles d'eau, des solutions de réhydratation, des brumisateurs, des serviettes qui pourront être humidifiées et conservées au réfrigérateur ou au congélateur, puis utilisées pour refroidir le corps, etc. (BC CDC, 2022). Il est également judicieux de se prémunir d'un thermomètre numérique afin de mesurer en temps réel la température du logement. Enfin, l'isolement social est souvent associé à des effets néfastes sur la santé, causés par la chaleur. Dans les études sur la mortalité associée aux vagues de chaleur, le fait d'être célibataire ou veuf, de vivre seul ou de ne pas quitter son domicile constituent des facteurs de risque non négligeables (Gronlund, 2014). À cet égard, le principal conseil du British Columbia Centre for Disease Control (BC CDC) implique de rester en contact avec les personnes vulnérables de l'entourage pour s'assurer de leur bien-être et pour effectuer un suivi de la température intérieure avec celles-ci, l'isolement étant un des facteurs de risque de problèmes liés à la chaleur (BC CDC, 2022).

Bien que le caractère essentiel de la climatisation pour assurer le confort thermique des occupants ne semble pas faire consensus, certains auteurs rapportent que la climatisation peut néanmoins s'avérer indispensable dans les milieux intérieurs occupés par des personnes vulnérables qui ne parviennent pas à s'adapter à la chaleur (Vardoulakis *et al.*, 2015; – tiré de Laouadi *et al.*, 2018; INSPQ, 2022; Kenny *et al.*, 2019). Ainsi, la climatisation pourrait s'avérer une mesure utile, voire essentielle, pour limiter la morbidité et la mortalité associées à l'exposition à la chaleur dans un contexte de changements climatiques, et ce, pour certains groupes de la population. À cet égard, Kenny *et al.* (2019) ont réalisé des travaux visant à évaluer les risques physiologiques de l'exposition à la chaleur intense et prolongée. Leurs résultats montrent que l'exposition à une seule journée « à des températures de 26 °C est peu susceptible d'entraîner des problèmes chez les personnes âgées. Toutefois, la recherche montre qu'une exposition prolongée à des températures supérieures à 26 °C, mais inférieures à 31 °C, peut représenter un danger chez certains adultes. La recherche montre également qu'une exposition prolongée à des températures de 31 °C ou plus doit être évitée chez les personnes sensibles à la chaleur » (Gouvernement du Canada, 2022; Meade *et al.*, 2023). De ce fait, la climatisation pourrait constituer un moyen efficace d'abaisser la température au-delà de ces seuils, alors que les mesures passives pourraient être promues pour gérer la température intérieure en-deçà de ces

derniers. La promotion de telles orientations pourrait nécessiter d'importants ajustements dans les comportements individuels et populationnels, qui doivent venir de pair avec des campagnes informationnelles et une sensibilisation accrue face à ces nouvelles réalités climatiques et les options de gestion à considérer.

### **Avenues de recherche**

Le recours à des systèmes de ventilation et de conditionnement de l'air dits « intelligents » semble une avenue d'intérêt, surtout dans les milieux où les occupants sont peu enclins, disposés ou capables d'appliquer de telles mesures. D'après le Air Infiltration and Ventilation Centre, ces systèmes sont notamment en mesure :

« [...] [d']ajuste[r] les débits de ventilation d'un bâtiment dans le temps ou selon l'emplacement en réagissant à un ou plusieurs des éléments suivants : présence d'occupants, conditions thermiques et qualité d'air extérieures, besoins du réseau électrique, détection directe de polluants, fonctionnement d'autres systèmes de mise en mouvement de l'air et d'épuration de l'air. » (AIVC, 2018)

Le maintien de la qualité de l'air intérieur et du confort thermique serait ainsi plus aisé pour les occupants, en plus de générer des économies énergétiques potentiellement substantielles. Il faut toutefois considérer le coût d'achat et d'installation qui peut être important. La pertinence du déploiement de tels équipements dans les milieux accueillant des clientèles vulnérables pourrait faire l'objet d'une analyse coût-bénéfice, assumant que des économies encore plus substantielles pourraient être observées en saison hivernale. Le recours à des équipements de ventilation et de conditionnement de l'air dotés d'interface de contrôle dit intelligent sous-tend également de repenser la gestion de l'offre de climatisation qui s'articule présentement – au complexe Raymond-Brunet – autour d'équipements portatifs personnels installés, entretenus et utilisés selon les préférences de l'utilisateur. Le recours à des unités fixes de plus grande puissance (c'est-à-dire pouvant subvenir aux besoins de plusieurs ménages) permettrait de limiter la portée de certains de ces problèmes tout en minimisant les démarches d'entretien. De plus, il existe présentement sur le marché des thermopompes qui peuvent à la fois climatiser les logements tout en offrant un chauffage d'appoint à moindre coût. Jumelée à la ventilation mécanique, la disponibilité de tels équipements pourrait offrir une solution versatile aux conditions climatiques changeantes auxquelles doivent faire face les populations vulnérables, bien que l'efficacité de telles mesures devrait faire l'objet d'études plus approfondies. À cet égard, le projet La conviviale à Rimouski s'avère un projet inspirant dont certaines des technologies déployées pourraient être utiles dans une perspective de mise à niveau de bâtiments existants (Lessard, 2021). De plus, d'autres options technologiques pourraient être explorées, comme la ventilation intensive d'été (*freecooling*) (Alam *et al.*, 2017), la conception d'un bâtiment en cascades (ou faisant appel au concept d'imbrication thermique; Suerich-Gulick *et al.*, 2022) ou encore la géothermie.

Il serait intéressant de suivre davantage les températures intérieures dans les prochaines années, voire de les utiliser comme outil de prévention, une approche proposée par Mirzaei *et al.* (2012). Ces auteurs ont employé la modélisation afin d'évaluer le contrôle de la température de certains bâtiments. Ils ont développé des modèles permettant d'établir une corrélation entre différents paramètres météorologiques enregistrés à l'aéroport de Montréal (Pierre-Elliott Trudeau) et la température de 55 bâtiments résidentiels situés dans des zones plus vulnérables à la surchauffe, notamment dans des îlots de chaleur (Mirzaei *et al.*, 2012). Cette corrélation pourrait ensuite servir à identifier, à l'aide du suivi des températures enregistrées à l'aéroport, les moments de l'année où certains logements seraient plus à risque de surchauffer et de déployer des mesures appropriées de prévention des risques associés à la chaleur intérieure. Smargiassi *et al.* (2008) ont également développé un modèle prédictif de la température intérieure à partir de mesures réalisées dans 75 habitations de Montréal durant l'été 2005. Le modèle permettrait d'expliquer 54 % de la variabilité des températures intérieures horaires mesurées, le reste pouvant s'expliquer par les comportements individuels affectant la température. Un tel modèle pourrait donc être utile pour mieux planifier les projets de développement urbain et de construction de logements ainsi que pour orienter les interventions de santé publique en cas d'événement de chaleur intense (Smargiassi *et al.*, 2008).

Enfin, l'OMS suggère également d'orienter la recherche future sur la relation directe entre la température intérieure et les effets à la santé plutôt que sur la relation indirecte entre la température extérieure, la température intérieure et les effets à la santé (WHO, 2018).

## 6 CONCLUSION

En somme, le présent projet a permis de jeter un regard critique sur les pratiques de rénovation généralement employées dans les bâtiments québécois. Cette étude a notamment montré les impacts potentiels de l'isolation accrue de l'enveloppe de bâtiments existants soumis à des vagues de chaleur. Ce projet a également permis de démontrer l'utilité de réaliser des évaluations sur le terrain, en contexte réel, pour prévoir les impacts des augmentations de température sur le milieu bâti existant et sur les occupants.

Dans le contexte québécois, l'intégration de certaines mesures passives de gestion de la chaleur aux travaux de rénovation peut s'avérer intéressante, mais elles ne seraient à elles seules en mesure d'endiguer les effets indésirables des vagues de chaleur, surtout lorsque celles-ci se prolongent sur plusieurs jours. Par ailleurs, l'adaptation de la population québécoise aux températures élevées peut être différente d'une région à l'autre en fonction du nombre et de l'intensité des vagues de chaleur estivales, lesquelles deviendront de plus en plus fréquentes dans un contexte de changements climatiques. La gestion du milieu bâti en amont de tels événements revêt donc un grand intérêt afin d'accroître la résilience de la population. Les personnes vulnérables seraient particulièrement sensibles au stress thermique; leur capacité de thermorégulation et d'adaptation étant limitée, elles doivent donc pouvoir compter sur des mesures de réduction des risques.

Il demeure ainsi souhaitable que la rénovation de logements sociaux hébergeant des populations vulnérables se transpose par une amélioration du confort thermique en saison estivale, particulièrement dans un contexte de changements climatiques, et ce, même si cette cible se traduit par la mobilisation de ressources et de moyens additionnels. À cet effet, la plupart des investissements et des subventions accordés pour rénover les bâtiments québécois visent surtout à en accroître l'étanchéité, en plus d'augmenter l'efficacité énergétique dans une perspective de diminuer les coûts de chauffage. Une réflexion s'impose donc afin de considérer d'un même élan les besoins de conservation et d'évacuation de la chaleur, voire du refroidissement, en fonction de la période de l'année.

Cette étude exploratoire constitue un premier pas dans la compréhension de la nature complexe des interactions entre les occupants d'un milieu résidentiel et l'environnement que constitue leur logement et des facteurs qui peuvent influencer les échanges thermiques. La réalisation de ce projet constitue une étape additionnelle d'une démarche collective visant à définir les orientations techniques à privilégier pour offrir des logements à loyer modique de qualité et résiliant aux vagues de chaleur.

## BIBLIOGRAPHIE

- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2013). *Concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'air intérieur et effets sur la santé – Avis de l'Anses: rapport d'expertise collective*. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012sa0093Ra.pdf>
- Air Infiltration and Ventilation Centre. (2018). *Qu'est-ce que la ventilation intelligente (smart ventilation)?* [https://www.aivc.org/sites/default/files/VIP38\\_french.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/VIP38_french.pdf)
- Alam, M., Sanjayan, J., Zou, P. X. W., Ramakrishnan, S. et Wilson, J. (2017). Evaluating the passive and free cooling application methods of phase change materials in residential buildings : A comparative study. *Energy and Buildings*, 148, 238-256. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.018>
- Alliance mondiale pour les bâtiments et la construction. (2021). *Bâtiments et adaptation au changement climatique : un appel à l'action*. <https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/A%20Call%20to%20Action%20VF.pdf>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2020). *ANSI/ASHRAE Addendum d to ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. [https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/55\\_2017\\_d\\_20200731.pdf](https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/55_2017_d_20200731.pdf)
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- Beaudoin, M. et Levasseur, M.-E. (2017). *Verdir les villes pour la santé de la population*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2265>
- British Columbia Centre for Disease Control. (2022). *Preparing for Heat Events*. <http://www.bccdc.ca/health-info/prevention-public-health/preparing-for-heat-events>
- Bröde, P. et Kampmann, B. (2023). Temperature–humidity-dependent wind effects on physiological heat strain of moderately exercising individuals reproduced by the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Biology*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/biology12060802>
- Bustinza, R. et Lebel, G. (2012). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2011*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/1508>
- Bustinza, R., Lebel, G. et Dubé, M. (2014). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec : bilan de la saison estivale 2013*. Bulletin d'information en santé environnementale – Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/bise/article-principal-surveillance-des-impacts-sanitaires-des-vagues-de-chaleur-extreme-au-quebec-bilan-de-la-saison-estivale-2013>

- Bustinza, R., Lebel, G. et Dubé, M. (2015). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – bilan de la saison estivale 2014*. Bulletin d'information en santé environnementale – Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/bise/surveillance-des-impacts-sanitaires-des-vagues-de-chaleur-extreme-au-quebec-bilan-de-la-saison-estivale-2014>
- Bustinza, R., Lebel, G. et Dubé, M. (2020). *Surveillance des impacts des vagues de chaleur extrême sur la santé au Québec à l'été 2019*. Bulletin d'information en santé environnementale – Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/bise/surveillance-impacts-vagues-chaleur-extreme-sur-sante-quebec-l-ete-2019>
- Collins, M. et Dempsey, S. (2019). Residential energy efficiency retrofits : Potential unintended consequences. *Journal of Environmental Planning & Management*, 62(12), 2010-2025. <https://doi.org/10.1080/09640568.2018.1509788>
- Díaz Lozano Patiño, E., Vakalis, D., Touchie, M., Tzekova, E et Siegel, J. A. (2018). Thermal comfort in multi-unit social housing buildings. *Building & Environment*, 144, 230-237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.024>
- Données Climatiques Canada. (2021). *Emplacement – Données Climatiques Canada*. <https://donneesclimatiques.ca/explorer/emplacement/>
- Drapeau, L.-M., Beaudoin, M., Vandycke, L. et Brunstein, M. (2021). *Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains : mise à jour 2021*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2839>
- Écohabitation. (2018a). *Méthode d'analyse – Description de la méthode d'analyse de l'impact des conditions extérieures et de la satisfaction des occupants d'un HLM de Gatineau*.
- Écohabitation. (2018b). *Rapport d'analyse – Corrélation entre la température d'Environnement Canada et la température locale d'un HLM de Gatineau*.
- Écohabitation. (2019a). *Simulations pré et post rénovation – Évaluation de la consommation annuelle de chauffage et de climatisation et estimation des conditions horaires au cours d'une vague de chaleur dans le cadre du projet d'adaptation aux vagues de chaleur d'un HLM de Gatineau*.
- Écohabitation. (2019b). *Typologie des logements – Description des logements soumis à la simulation dans le cadre du projet d'adaptation aux vagues de chaleur d'un HLM de Gatineau*.
- Écohabitation. (2019c). *Typologie des occupants – Description des occupants typiques des logements soumis à la simulation dans le cadre du projet d'adaptation aux vagues de chaleur d'un HLM de Gatineau*.
- Gifford, R. M., Todisco, T., Stacey, M., Fujisawa, T., Allerhand, M., Woods, D. R. et Reynolds, R. M. (2019). Risk of heat illness in men and women : A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 171, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.020>

- Gosselin, P., Campagna, C., Demers-Bouffard, D., Qutob, S. et Flannigan, M. (2022). *Chapitre 3 – Aléas naturels*. Dans *La santé des Canadiens et des Canadiennes dans un climat en changement : faire progresser nos connaissances pour agir*. P. Berry et R. Schnitter. <https://changingclimate.ca/health-in-a-changing-climate/fr/chapter/3-0/>
- Gouvernement du Canada. (2022). *Il commence à faire chaud ici! – Protéger les personnes plus vulnérables contre la chaleur extrême à l'intérieur*. <https://science.gc.ca/eic/site/063.nsf/fra/98416.html>
- Gronlund, C. J. (2014). Racial and socioeconomic disparities in heat-related health effects and their mechanisms : A review. *Current epidemiology reports*, 1(3), 165-173.
- Kenny, G. P., Flouris, A. D., Yagouti, A. et Notley, S. R. (2019). Towards establishing evidence-based guidelines on maximum indoor temperatures during hot weather in temperate continental climates. *Temperature*, 6(1), 11-36. <https://doi.org/10.1080/23328940.2018.1456257>
- Laouadi, A., Gaur, A. et Bartko, M. (2018). Climate resilience of buildings : Overheating in buildings – Literature review. Conseil national de recherches Canada. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=d83bf020-3ae4-4ee8-8d06-af0f49d9eedb>
- Lebel, G. et Bustinza, R. (2011). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2010*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/1275>
- Lebel, G. et Bustinza, R. (2013). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2012*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/1688>
- Lebel, G., Bustinza, R. et Dubé, M. (2016). *Surveillance des impacts sanitaires des vagues de chaleur extrême au Québec – Bilan de la saison estivale 2015*. Bulletin d'information en santé environnementale – Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/bise/surveillance-des-impacts-sanitaires-des-vagues-de-chaleur-extreme-au-quebec-bilan-de-la-saison-estivale-2015>
- Lebel, G., Bustinza, R. et Dubé, M. (2017). *Analyse des impacts des vagues régionales de chaleur extrême sur la santé au Québec de 2010 à 2015*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2221>
- Lebel, G., Dubé, M. et Bustinza, R. (2019). *Surveillance des impacts des vagues de chaleur extrême sur la santé au Québec à l'été 2018*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/surveillance-impacts-vagues-chaleur-extreme-sur-sante-quebec-l-ete-2018>
- Lefebvre, M.-C. et Leclerc, J.-M. (2022). *Impacts de la climatisation des milieux intérieurs sur la santé et le confort thermique*. <https://www.inspq.qc.ca/publications/3251>
- Lessard, G. (2021). *La Conviviale (II) | Un système de ventilation (très) intelligent!* Écohabitation. <https://www.ecohabitation.com/guides/3380/la-conviviale-un-systeme-de-ventilation-tres-intelligent/>

- Meade, R. D., Notley, S. R., Akerman, A. P., McCormick, J. J., King, K. E., Sigal, R. J. et Kenny, G. P. (2023). Efficacy of cooling centers for mitigating physiological strain in older adults during daylong heat exposure : A laboratory-based heat wave simulation. *Environmental Health Perspectives*, 131(6), 67003. <https://doi.org/10.1289/EHP11651>
- Medical officer of Health Toronto. (2015). *Update on Extreme Heat and Maximum Indoor Temperature Standard for Multi-unit Residential Buildings*. Toronto Public Health. <https://www.toronto.ca/legdocs/mmis/2015/hl/bgrd/backgroundfile-85835.pdf>
- Ministère de la Santé et des Services sociaux. (2019). *Systèmes d'alerte et de surveillance – Chaleur extrême*. <https://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/sante-environnementale/chaleur-extreme/systemes-d-alerte-et-de-surveillance/>
- Mirzaei, P. A., Haghghat, F., Nakhaie, A. A., Yagouti, A., Giguère, M., Keusseyan, R. et Coman, A. (2012). Indoor thermal condition in urban heat Island – Development of a predictive tool. *Building & Environment*, 57, 7-17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.018>
- Nour, K. et Tardif, I. (2022). *Vague de chaleur, santé, température intérieure de logements en Montérégie : mieux comprendre pour mieux intervenir*. Centre intégré de santé et de services sociaux de la Montérégie-Centre. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2023-02/proj-201419-sante-552019-rapportfinal.pdf>
- Observatoire de la qualité de l'air intérieur. (2006). *Campagne nationale Logements – État de la qualité de l'air dans les logements français – Rapport final*. <https://www.oqai.fr/fr/media/rapports/1-log-cnl1-etat-qai>
- Organisation mondiale de la Santé. (2018). *Lignes directrices de l'OMS relatives au logement et à la santé : résumé d'orientation*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/279601>
- Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 2: vulnérabilités, impacts et adaptation aux changements climatiques*. Édition 2015. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/proj-201419-synthese2015-rapportcomplet.pdf>
- Santamouris, M. (2004). *Stratégies de ventilation nocturne*. Air Infiltration and Ventilation Centre. [https://www.aivc.org/sites/default/files/members\\_area/medias/pdf/VIP/VIP04\\_Night%20ventilation.fr.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP04_Night%20ventilation.fr.pdf)
- Santé Canada. (2012). *Document de conseils sur les particules fines (PM<sub>2,5</sub>) dans l'air intérieur résidentiel*. Gouvernement du Canada. <http://canadiensensante.gc.ca/publications/healthy-living-vie-saine/fine-particulate-particule-fine/alt/fine-particulate-particule-fine-fra.pdf>
- Santé Canada. (2020). *Réduire les îlots de chaleur urbains pour protéger la santé au Canada – Introduction pour les professionnels de la santé publique*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/services/sante/publications/vie-saine/reduire-ilots-chaleur-urbains-protger-sante-canada.html>

- Santé Canada. (2021). *Lignes directrices sur la qualité de l'air intérieur résidentiel : dioxyde de carbone*. Gouvernement du Canada. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/lignes-directrices-qualite-air-interieur-residentiel-dioxyde-carbone.html>
- Shapiro, Y., Pandolf, K. B., Avellini, B. A., Pimental, N. A. et Goldman, R. F. (1980). Physiological responses of men and women to humid and dry heat. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 49(1), 1-8. <https://doi.org/10.1152/jappl.1980.49.1.1>
- Smargiassi, A., Fournier, M., Griot, C., Baudouin, Y. et Kosatsky, T. (2008). Prediction of the indoor temperatures of an urban area with an in-time regression mapping approach. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 18(3), 282-288. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500588>
- Suerich-Gulick, F., Halepaska, A. et Craig, S. (2022). Cascading temperature demand : The limits of thermal nesting in naturally ventilated buildings. *Building & Environment*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108607>
- Valois, P., Talbot, D., Caron, M., Carrier, M. P., Morin, A. J. S., Renaud, J. S., ... et Gosselin, P. (2017). Development and validation of a behavioural index for adaptation to high summer temperatures among urban dwellers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 820. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070820>
- Valois, P., Talbot, D., Renaud, J.-S., Caron, M. et Bouchard, D. (2018). *Suivi de l'adaptation à la chaleur chez les personnes habitant dans les dix villes les plus peuplées du Québec (OQACC-008)*. Observatoire québécois de l'adaptation aux changements climatiques. [http://www.monclimatmasante.qc.ca/Data/Sites/1/publications/OQACC-008\\_Rapport\\_etude\\_1.2\\_T2.pdf](http://www.monclimatmasante.qc.ca/Data/Sites/1/publications/OQACC-008_Rapport_etude_1.2_T2.pdf)
- World Health Organization. (2018). *WHO housing and health guidelines*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/276001>
- Zhang, X., Flato, G., Kirchmeier-Young, M., Vincent, L., Wan, H., Wang, X., ... et Kharin, V. V. (2019). *Chapitre 4 – Rapport sur le climat changeant du Canada*. Dans *Les changements de température et de précipitations pour le Canada*. (p. 113-193). E. Bush et D.S. Lemmen. <https://changingclimate.ca/CCCR2019/fr/chapitre/4-0/>

## ANNEXE 1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Les principaux volets méthodologiques présentés dans les sections qui suivent incluent les démarches de recrutement des participants lors des deux phases de collecte de données (1.1), la démarche de collecte de diverses données, soit les données structurales des bâtiments et logements ciblés par le projet (1.2), les données comportementales associées aux occupants (1.3) et les données environnementales intérieures et extérieures (1.4). Les précisions méthodologiques concernant la modélisation (section 2) et les analyses statistiques réalisées (section 3) sont également présentées ci-après.

### 1 Comparaisons avant et après rénovations

#### 1.1 Démarche de recrutement (phases 1 et 2)

Le recrutement des participants a été effectué par l'équipe communautaire de l'OHO en collaboration avec la Maison de l'Amitié de Hull, à deux reprises, soit avant chacune des deux phases de mesures.

Pour être éligible à participer au projet, les participants (un seul par ménage) devaient rencontrer l'ensemble des critères d'inclusion suivants :

- Être majeur (18 ans et plus);
- Ne pas projeter un déménagement durant la période du projet;
- Parler français ou anglais;
- Être disponible pour les deux phases consécutives du projet (été 2017 et été 2019);
- Être présent<sup>17</sup> dans le logement au moment des investigations (août 2017 et août 2019);
- Être en mesure de compléter les journaux d'activités et le questionnaire général;
- Être ouvert à accueillir un professionnel à quatre reprises au cours des deux années associées au projet pour l'installation et le retrait d'appareils de mesures;
- Accepter que des équipements de mesures soient déployés dans le salon.

Au cours des deux phases de collecte de données, Santé Canada a mis à disposition de l'équipe de recherche 30 appareils de mesures de la chaleur et de l'humidité relative, en plus d'autres équipements qui seront décrits à la section 3.1.4., limitant donc le nombre de participants recrutés à ce nombre. Sur les 29 participants impliqués lors de la première phase en 2017, seulement huit ont pu participer à la semaine de mesures du mois d'août 2019. Une neuvième personne a participé aux deux phases, mais a accepté que les mesures se fassent en juillet 2019

---

<sup>17</sup> Que le participant occupe le logement au moins 6 heures par jour, soit l'une des périodes temporelles utilisées dans le journal d'activités. Ainsi, le participant ne doit pas envisager de s'absenter de manière prolongée durant la semaine de mesures afin de pouvoir compléter une grille quotidienne du journal d'activités.

lors d'une réelle canicule. Afin de comparer des périodes et des températures similaires (août), les données de ce participant sont parfois exclues des analyses.

Les raisons pouvant expliquer l'abandon du projet par les participants incluent notamment un déménagement, une absence du domicile lors du passage de l'équipe de recherche ou une incapacité à compléter les documents et autres questionnaires d'acquisition de données (p. ex. grossesse, maladie, caractère invasif du projet). De plus, certains d'entre eux n'ont pu être rejoints pour confirmer leur participation à la seconde phase du projet (aucune réponse téléphonique ou à la porte après de multiples tentatives, mauvais numéro de téléphone, etc.).

À la suite de l'obtention de l'autorisation du Comité d'éthique pour mener une seconde campagne de recrutement, 20 nouveaux participants ont été sélectionnés pour compléter la collecte de données de la seconde phase. Huit individus occupaient un logement investigué lors de la première phase du projet\*. Le tableau A1-1 présente les échantillons des deux phases de mesures.

**Tableau A1-1** Caractérisation des échantillons de participants aux deux phases du projet

	Phase prérenovation 2017	Phase postrénovation 2019
Participants	29	-
Participants aux deux phases	-	8*
Nouveaux participants	-	20
<b>Total</b>	29	28

\* Un autre participant a accepté d'installer les équipements de mesures durant une semaine du mois de juillet 2019, lors d'une période de canicule, mais les données n'ont pas été conservées aux fins de l'analyse finale.

## 1.2 Données structurales (bâtiments)

Le complexe Raymond-Brunet est constitué de 124 logements à loyer modique (maisonnettes de deux étages en rangée) regroupés en 12 bâtiments. Érigées en 1969, ces habitations comprennent des logements comportant d'une à quatre chambres à coucher. Des travaux de rénovation ont été effectués en quatre phases successives entre 2016 et 2018, la dernière ayant été complétée à l'automne 2018.

Les travaux visaient essentiellement à effectuer une mise à niveau de différentes constituantes de l'enveloppe du bâtiment (voir tableau A1-2 p. 59), de ses dispositifs de ventilation et d'extraction d'air mécaniques afin d'offrir à la clientèle concernée des logements de qualité supérieure. L'optimisation de l'efficacité énergétique du bâtiment figurait également parmi les cobénéfices attendus. Il est à noter que de telles mesures de mise à niveau (ou à valeur ajoutée) sont déjà prescrites dans le cadre normatif de rénovation de la Société d'habitation du Québec (p. ex. isolation accrue de l'entretoit, bardeaux de toiture de couleur pâle, dispositifs pare-soleil, etc.), mais leur application demeure facultative et est laissée à la discrétion des gestionnaires des offices d'habitation en fonction des ressources financières disponibles.

**Tableau A1-2 Caractéristiques des logements avant et après les travaux de rénovation (changements)**

Caractéristiques avant rénovation	Caractéristiques après rénovation
<p><b>Murs avec revêtement de brique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brique d'argile, couleur rouge standard</li> <li>• Espace d'air avec fourrures</li> <li>• Papier de construction</li> <li>• Contreplaqué 9,5 mm (3/8 »)</li> <li>• Montants de 38,1 mm x 88,9 mm (1½" x 3½") et laine collée sur papier noir (≈ R8)</li> <li>• Gypse 12,7 mm (½")</li> </ul>	<p><b>Murs avec revêtement de brique*</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brique d'argile, couleur rouge standard (ancienne brique conservée)</li> <li>• Espace d'air avec fourrures</li> <li>• Papier de construction</li> <li>• Contreplaqué 9,5 mm (3/8 »)</li> <li>• Montants de 38,1 mm x 88,9 mm (1½" x 3½") et laine collée sur papier noir (≈ R8)</li> <li>• Gypse 12,7 mm (½")</li> </ul>
<p><b>Mur avec revêtement métallique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminium préfini</li> <li>• Contreventement de contreplaqué 8 ou 9,5 mm (5/16 » ou 3/8 »)</li> <li>• Montants de 38,1 mm x 88,9 mm (1½" x 3½") et laine collée sur papier noir (≈ R8)</li> <li>• Gypse 12,7 mm (½")</li> </ul>	<p><b>Mur avec revêtement James Hardie (fibrociment)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement de fibrociment</li> <li>• Espace d'air avec fourrures</li> <li>• Pare-air de type Tyvek</li> <li>• Isolant rigide EPS 50,8 mm (2")</li> <li>• Contreventement de contreplaqué 9,5 mm (3/8 »)</li> <li>• Montants de 38,1 mm x 88,9 mm (1½" x 3½") avec laine isolante</li> <li>• Pare-vapeur</li> <li>• Gypse 12,7 mm (½")</li> </ul>
<p><b>Toit plat</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Couverture d'asphalte et gravier</li> <li>• Revêtement de contreplaqué 12,7 mm (½")</li> <li>• Solives en bois @ 406 mm (16") c/c</li> <li>• Isolation en laine 152 mm (6")</li> <li>• Pare-vapeur</li> <li>• Espace d'air</li> <li>• Gypse 16 mm (5/8 »)</li> </ul>	<p><b>Toit plat</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Couverture d'asphalte et gravier</li> <li>• Revêtement de contreplaqué 12,7 mm (½")</li> <li>• Solives en bois @ 406 mm (16") c/c</li> <li>• Isolation en laine 260 mm (10 ¼")</li> <li>• Pare-vapeur</li> <li>• Espace d'air</li> <li>• Gypse 16 mm (5/8 »)</li> </ul>

**Tableau A1-2 Caractéristiques des logements avant et après les travaux de rénovation (changements) (suite)**

Caractéristiques avant rénovation	Caractéristiques après rénovation
<p><b>Toit en pente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bardeaux d'asphalte</li> <li>• Revêtement de contreplaqué 9,5 mm (3/8 »)</li> <li>• Fermes de toit @ 610 mm (24") c/c</li> <li>• Isolation en laine 152 mm (6")</li> <li>• Pare-vapeur</li> <li>• Espace d'air</li> <li>• Gypse 16 mm (5/8 »)</li> </ul>	<p><b>Toit en pente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bardeaux d'asphalte (même couleur)</li> <li>• Revêtement de contreplaqué 9,5 mm (3/8 »)</li> <li>• Fermes de toit @ 610 mm (24") c/c</li> <li>• Isolation en laine 260 mm (10 1/4")</li> <li>• Pare-vapeur</li> <li>• Espace d'air</li> <li>• Gypse 16 mm (5/8 »)</li> </ul>
<p><b>Plancher</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tuiles de vinyle</li> <li>• Contreplaqué 6,4 mm (1/4")</li> <li>• Contreplaqué 19 mm (3/4")</li> </ul>	<p><b>Plancher*</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tuiles de vinyle 2,5 mm</li> <li>• Contreplaqué 6,4 mm (1/4")</li> <li>• Contreplaqué 19 mm (3/4")</li> </ul>
<p><b>Plafonds</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gypse 16 mm (5/8 »)</li> </ul>	<p><b>Plafonds</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gypse 12,7 mm (1/2")</li> </ul>
<p><b>Fenestration</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminium</li> <li>• Deux couches de vitrages simples coulissants</li> <li>• Performance énergétique estimée selon ASHRAE UW ≈ 4,3 W/m<sup>2</sup> K</li> </ul>	<p><b>Fenestration</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Deux vitrages coulissants, le côté extérieur étant lui-même composé d'une unité scellée double remplie d'un mélange air-argon et munie d'une pellicule faible émissivité, alors que le volet intérieur est muni d'un verre clair simple.</li> <li>• Uw = 1,53 W/m<sup>2</sup> K</li> </ul>
<p><b>Portes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Partie opaque estimée R = 0,7 m<sup>2</sup> K/W (R4)</li> <li>• Partie vitrée idem que fenêtres</li> </ul>	<p><b>Portes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Partie opaque : valeur R = 1,47 m<sup>2</sup> K/W (R8,4)</li> <li>• Vitrage thermos double avec un Low-E sur la face 3 et de l'argon entre les vitres.</li> <li>• Vitrage avec un Low-e de marque Guardian Climaguard avec un intercalaire de 12,7 mm.</li> </ul>
<p><b>Parement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parement jaune</li> <li>• Brique brune</li> </ul>	<p><b>Parement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revêtement de fibrociment beige ou brun</li> <li>• Brique brune</li> </ul>
<p><b>Ventilation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• VRC dans les logements de 3 chambres et plus, aucun système dans les logements de 2 chambres.</li> </ul>	<p><b>Ventilation</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajout d'un VRC dans les logements de 2 chambres.</li> </ul>

\* Aucune modification apportée.

Les données structurales ont été obtenues par le biais de l'OHO qui a fourni les informations concernant les matériaux en place ainsi que les plans du complexe avant les rénovations. Les caractéristiques des matériaux employés par l'entrepreneur pour effectuer les rénovations (isolation, épaisseur, type de revêtement, modèles de fenêtres et portes, etc.) ont également été obtenues grâce au concours de l'OHO. Une partie des fiches techniques des produits de construction utilisés a été transmise à l'équipe de recherche alors que les rapports d'infiltrométrie pré- et post-rénovation ainsi que les rapports de consommation énergétique pour chaque logement ont tous été obtenus grâce à l'OHO, et ce, pour les deux phases du projet.

### **1.3 Données comportementales (occupants)**

Afin de documenter les comportements des participants durant la semaine de mesures s'échelonnant sur sept jours consécutifs, ces derniers devaient compléter un journal d'activités quotidiennes. Ce journal de format concis présentait des repères visuels simples (icônes représentant différentes activités ou appareils tels que la climatisation) et visait à documenter tous les comportements, les pratiques et les activités susceptibles d'influencer positivement ou négativement le confort thermique des occupants, la température et la qualité de l'air intérieur. Les participants étaient invités à cocher les cases correspondant aux activités réalisées ainsi que le moment de la journée où elles étaient pratiquées (p. ex. ouverture des fenêtres en avant-midi pour ventiler le logement). Une évaluation du confort thermique perçu devait être effectuée tous les jours et être notée dans le journal d'activités. Chaque journée était divisée en quatre périodes d'activités distinctes : la nuit (de minuit à 6 h), l'avant-midi (de 6 h à midi), l'après-midi (de midi à 18 h) et la soirée (de 18 h à minuit). Afin d'assurer l'intelligibilité et la compréhension du journal d'activités, ce dernier a été préalablement testé avant le début du projet par une douzaine de résidents du complexe Raymond-Brunet, et ce, par l'intermédiaire des partenaires de la Maison de l'Amitié de Hull. De plus, l'équipe de projet a volontairement limité le nombre de questions présentées dans ce journal afin de favoriser son remplissage par les répondants. Il est à noter que l'ensemble des questions adressées aux participants ne sont néanmoins pas rapportées dans la section des résultats ou encore discuté dans le présent document (p. ex élément de contrôle de la chaleur et de rafraîchissement) afin de limiter l'ampleur et la portée de l'analyse effectuée. Tous les journaux d'activités ont été récupérés à la fin de la période de mesures. Le tableau A1-3 (p. 62) présente les comportements évalués.

**Tableau A1-3 Comportements et confort perçu évalués tous les jours pendant la semaine de mesures par les participants**

<b>Ventilation</b>
Ouverture des fenêtres pour faire circuler l'air
Fonctionnement du VRC ou de l'échangeur d'air (c.-à-d. système de ventilation central)
<b>Appareils utilisés</b>
Utilisation d'un ventilateur électrique (sur pied, de plafond, etc.)
Utilisation d'un déshumidificateur
Utilisation d'un humidificateur
Utilisation d'un appareil de filtration de l'air
Utilisation de la hotte de la cuisinière
Utilisation de l'extracteur de la salle de bain
Utilisation de l'air climatisé (si disponible)
Utilisation du four de la cuisinière (poêle) ou autres appareils de cuisson (grille-pain, mijoteuse, réchaud électrique, micro-ondes, appareil à fondue ou raclette, etc.)
Utilisation de la sècheuse
<b>Contrôle de la chaleur</b>
Fermeture des rideaux ou des stores
Prise de douches ou de bains, s'éponger ou se vaporiser avec de l'eau fraîche plus souvent qu'à l'habitude
Consommation d'eau ou de breuvages frais (jus, boissons gazeuses, etc.) ou consommation d'aliments glacés comme des <i>popsicles</i> ou de la crème glacée
Baignade ou rafraîchissement (dans une piscine municipale ou privée, jeu d'eau, lac, rivière, etc.)
Fréquentation d'un lieu climatisé autre que le logement (centre commercial, automobile, bibliothèque, voisin, amis, salle commune climatisée, etc.)
Installation à l'ombre sur la terrasse, le patio ou dans un parc ou un jardin
<b>Confort</b>
État de confort dans le logement

En complément, les participants devaient remplir un questionnaire général portant sur les caractéristiques sociodémographiques ainsi que certains facteurs de risques (état de santé, handicap, etc.), qui pourraient potentiellement moduler l'application de mesures d'adaptation à la chaleur) ainsi que sur les équipements ménagés détenus et utilisés dans leur logement respectif (p. ex. climatisation, cuisinière, sècheuse).

#### 1.4 Données environnementales

Au cours de chaque phase de collecte de données, divers appareils de mesures en continu ont été déployés dans les logements des participants pour évaluer la fluctuation de certains paramètres clés de l'air intérieur. Alors que des appareils de type HOBO étaient destinés à la mesure de la température (T) et de l'humidité relative (HR), des sondes destinées à la mesure des concentrations de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pouvaient être connectées aux HOBO pour enregistrer les données associées. Enfin, les concentrations de particules fines (PM<sub>2.5</sub>) ont été

mesurées à l'aide de dispositifs de marque DustTrack. Le tableau A4-1 présente les appareils mis à la disposition de l'équipe de recherche pour mener à bien les deux phases de mesures.

**Tableau A1-4 Appareils disponibles au cours des deux phases de mesures**

Type d'appareil (paramètres mesurés)	Nombre d'appareils prêtés	
	2017	2019
HOBO (T et HR)	30	30
Sondes à CO <sub>2</sub> (2 000 ppm max.)	15	8
Sondes à CO <sub>2</sub> (5 000 ppm max.)	0	12
DustTrack (PM <sub>2,5</sub> )	10	10

Les logements étant configurés de façon similaire, tous les appareils de mesures ont été installés dans le salon (salle de séjour), la pièce la plus centrale de l'habitation, le plus loin possible des fenêtres et des sources de chaleur. Ils ont généralement été installés sur une table à café ou encore placés sur une étagère, à une hauteur de 1 à 2 mètres du sol, idéalement hors de la portée des enfants et des animaux domestiques.

Les logements dotés d'une sonde à CO<sub>2</sub> devaient idéalement être occupés par des locataires non fumeurs afin d'éviter de saturer le détecteur et obtenir des données comparables entre elles. En ce qui a trait aux appareils destinés à l'évaluation des concentrations de PM<sub>2,5</sub> (DustTrack), il était également souhaitable de cibler des logements non-fumeurs et exempts d'animaux domestiques pour limiter les biais au niveau des mesures. Or, vu les difficultés à recruter des participants, il n'a pas été possible de remplir ces critères de sélection pour tous les appareils déployés.

Tous les appareils ont subi une première étape de calibration et de validation du fonctionnement dans les locaux de la DSPublique de l'Outaouais immédiatement après la récupération de ceux-ci auprès de Santé Canada.

Pour la température et l'humidité relative à l'extérieur, les données d'Environnement Canada à la Station Ottawa CDA RCS n° 6105978 ont été utilisées au cours des deux phases. Cette station était la plus proche du site de mesures et offrait des données horaires pour toute la période de mesures. Lors de la première phase, une valise imperméable avait été déposée sur un balcon d'un des logements du complexe résidentiel pour mesurer les paramètres de l'air extérieur sur le site même du projet d'évaluation. Toutefois, la surchauffe des HOBO et des sondes disposées dans la valise (malgré une conception prévue à cet effet) a faussé les données de température et d'humidité relative. Ainsi, afin de caractériser les températures extérieures sur le site du complexe Raymond-Brunet, les données météorologiques d'Environnement Canada pour la station la plus proche ont été utilisées.

## 2 Analyses statistiques

### 2.1 Analyse descriptive générale

Une première série d'analyses descriptives des différentes séries de données assemblées a été réalisée afin de dresser un portrait descriptif des conditions environnementales et des comportements des occupants pour chacune des deux phases du projet. Les données moyennes, minimales et maximales ont été présentées pour la température, l'humidité relative, les concentrations de PM<sub>2,5</sub> et de CO<sub>2</sub> tandis que des fréquences ont été présentées pour les variables qualitatives (catégorisées ou discrètes) documentées à l'aide des questionnaires et des journaux d'activités complétés par les participants.

Puis, pour chaque phase, certaines variables ont été croisées pour vérifier si certaines associations pouvaient être observées. Une attention particulière a été portée aux associations entre la température intérieure et les variables comportementales présentant un fort potentiel d'adhésion en raison de la nécessité de détenir des effectifs suffisamment importants pour procéder à des analyses statistiques de type paramétrique. Des tests de Student et l'application de modèles de type ANOVA à mesures répétées ont été utilisés pour vérifier la significativité statistique au seuil de 5 % de telles associations.

### 2.2 Analyse croisée des données de température intérieure

Un plan d'analyses croisées des données empiriques obtenues au cours des deux phases de mesures pré- et postoptimisation a été développé par l'équipe de recherche. Pour les données assemblées par l'entremise des questionnaires et des journaux d'activités, les proportions de participants répondant à certaines caractéristiques et ayant adopté certains comportements (au moins une fois durant les semaines d'investigation) ont été comparées selon la phase de l'étude. Les données sont présentées de manière descriptive, aucun test statistique n'ayant été réalisé pour comparer les deux échantillons.

L'analyse visait principalement à vérifier l'impact de l'intervention sur le confort thermique (les perceptions, les comportements et les habitudes associés) des participants. Ainsi, des analyses de type ANOVA à mesures répétées permettant de tenir compte de la dépendance entre les mesures effectuées chez un même participant ont été réalisées sur les séries de données de températures intérieures quotidiennes moyennes assemblées pour chacun des logements à l'étude<sup>18</sup>. Lors de l'application de ces modèles, la phase de l'étude a été utilisée comme variable indépendante d'intérêt et la température extérieure a, quant à elle, été utilisée comme variable d'ajustement. Des modèles statistiques complémentaires ont été développés et utilisés en considérant les données quotidiennes moyennes (intégrées sur des périodes de 24 h) ainsi que les données moyennes associées à différentes périodes de la journée (nuit, avant-midi, après-midi et soirée intégrées sur les périodes de 6 h).

---

<sup>18</sup> Sept mesures de température intérieure moyenne sont considérées par participants, et ce, pour chacune des phases de l'étude, aux fins de cette série d'analyses.

L'analyse principale, visant à vérifier l'impact des variables comportementales sur la température intérieure du logement, a été effectuée en considérant seulement les huit logements occupés par des participants impliqués dans les deux phases de collecte de données. Le modèle d'ANOVA utilisé a permis de considérer une corrélation distincte selon le cas où les mesures associées à un même participant aient été effectuées lors d'une même phase de l'étude ou dans le contexte des deux phases successives. En analyse secondaire, l'ensemble des données associées aux participants ayant été impliqués dans au moins une des phases du projet a été utilisé pour réaliser la seconde série d'analyses ANOVA. Rappelons que cette seconde série d'analyses visait à documenter l'impact de l'intervention sur la température intérieure des logements. Seule la dépendance entre les mesures assemblées lors d'une même phase a été prise en compte dans cette seconde série d'analyses. Le niveau de signification statistique a été fixé à 0,05.

### 3 Modélisation

Le volet de modélisation de ce projet d'étude a été développé par un partenaire compétent, Écohabitation, qui a proposé une approche d'évaluation théorique du confort thermique pour les occupants, basé sur la méthode des séries temporelles radiantes (*Radiant Time Series Method*, RTSM) et sur la norme ASHRAE 55 sur le confort thermique (voir détails plus bas) (Écohabitation, 2018a). L'application de cette méthode nécessitait la prise en charge d'une série de calculs successifs qui s'appuie sur des équations thermodynamiques prédéterminées.

Un certain nombre de logements ont été ciblés pour réaliser de telles simulations numériques, soit les unités P, Q, R, C, G et H. À l'exception de l'unité Q qui contient deux chambres à coucher et de l'unité G qui en contient quatre, les autres logements considérés possèdent trois chambres à coucher. Ces unités ont notamment été sélectionnées afin d'obtenir un échantillon représentatif des différents types de logements constituant le complexe résidentiel, mais également en raison du fait que des résultats de mesures empiriques étaient disponibles, et ce, pour les deux phases de l'étude. De plus, ces six unités ont été choisies pour assurer une certaine représentativité des divers contextes d'exposition à la chaleur pouvant être rencontrés à l'intérieur des unités du complexe résidentiel. Ainsi, certains logements étaient davantage exposés au rayonnement solaire incident du fait de l'orientation de leur façade et de leur position au sein du complexe (p. ex. unité de coin, unité centrale possédant davantage de murs mitoyens).

**Tableau A1-5 Orientation des façades**

Unité	Avant	Arrière	Côté gauche	Côté droit
<b>Q</b>	241°	S. O.	S. O.	151°
<b>P</b>	151°	331°	S. O.	S. O.
<b>R</b>	331°	151°	S. O.	241°
<b>C</b>	241°	61°	S. O.	S. O.
<b>H</b>	241°	61°	331°	S. O.
<b>G</b>	331°	151°	S. O.	S. O.

Source : Écohabitation, 2019b.

**Tableau A1-6 Ombrage des façades (présence de structure ou de végétation portant ombrage à chaque façade)**

Unité	Avant	Arrière	Côté gauche	Côté droit
<b>Q</b>	Petit arbre	S. O.	S. O.	-
<b>P</b>	-	S. O.	S. O.	S. O.
<b>R</b>	S. O.	-	S. O.	Bâtiment
<b>C</b>	Grand arbre	Petit arbre	S. O.	S. O.
<b>H</b>	Petit arbre	Petit arbre	S. O.	S. O.
<b>G</b>	S. O.	Petit arbre	S. O.	S. O.

Source : Écohabitation, 2019b.

### 3.1 Étalonage de la température ambiante sur le site à l'étude

La première étape de cette démarche consistait à calculer le facteur de corrélation linéaire entre les données météorologiques enregistrées à l'aéroport international d'Ottawa (soit la station météorologique la plus proche du site à l'étude) et les données récoltées sur le site du complexe Raymond-Brunet à Gatineau (Écohabitation, 2018b). De façon plus spécifique, une sonde de température a été installée dans la cour avant de l'unité S, à environ 1,50 mètre du sol. Une analyse de la course du soleil a permis de s'assurer que le rayonnement solaire incident n'exposait pas la sonde de façon directe. La définition d'un tel facteur était importante pour définir l'ampleur de l'îlot de chaleur urbain affectant le complexe résidentiel à l'étude afin de permettre de recréer les conditions de température et d'humidité sur le site à partir de données antérieures de la station d'Ottawa. Cette étape a ainsi permis d'appliquer un facteur de correction à la série de données issues de la station météorologique de l'aéroport international d'Ottawa pour qu'elles soient représentatives de la température et de l'humidité relative prévalentes à l'extérieur du complexe Raymond-Brunet. De plus, ces mesures ont permis de confirmer que le complexe se trouvait bien au sein d'un îlot de chaleur avec un écart moyen de +4° C vers 4 h du matin et de +1 °C en milieu de journée (12 h) avec un maximum observé de 7 °C entre les deux sites (complexe et aéroport) (Écohabitation, 2018b).

### 3.2 Calibration du modèle

La modélisation des flux de chaleur dans un milieu intérieur donné impliquait une évaluation de la somme des contributions concourantes de nombreux phénomènes afin de définir un bilan d'énergie, lequel a permis de calculer l'écart de température à chaque pas de temps considéré par le modèle (0,25 heure ou 15 minutes). Certains des paramètres considérés ont été déterminés sur la base de valeurs dites raisonnables, mais celles-ci doivent être ajustées lors de tests préliminaires afin que la température générée à chaque pas de temps soit conforme à celles documentées lors du premier volet de l'étude; soit durant la période du 22 au 29 août 2017. C'est dans cette optique que chacun des six logements investigués modélisés a été calibré individuellement de manière à obtenir des courbes d'évolution des températures intérieures modélisées comparables à celles mesurées. Cette procédure de calibration a été effectuée en deux phases distinctes, soit l'une menée au RDC et l'autre à l'étage (Écohabitation, 2019a).

### 3.3 Description sommaire de la simulation numérique

Les partenaires d'Écohabitation ont par la suite appliqué la méthode RTSM pour évaluer l'impact des périodes de canicule sur le confort thermique des occupants du complexe résidentiel investigué à l'aide de simulations numériques. Il a été convenu d'évaluer le niveau de confort ressenti par un occupant à un instant donné, notamment sur la base de son environnement, de son habillement, de son métabolisme, de son niveau d'activité et, dans une certaine mesure, de sa perception individuelle de confort (Écohabitation, 2019c). Les gains de chaleur instantanés<sup>19</sup> pour un environnement intérieur donné (ou gains internes) intègrent :

- Les gains solaires transmis à travers les parois transparentes (fenêtres);
- Les gains transmis par conduction à travers les parois de l'enveloppe;
- Les gains internes associés à la chaleur générée dans la zone par les occupants, l'éclairage et les autres appareils électriques (équipements électroniques et électroménagers);
- Les gains générés par les échanges d'air extérieur avec la zone (infiltration/exfiltration passive et ventilation mécanique et naturelle volontaire).

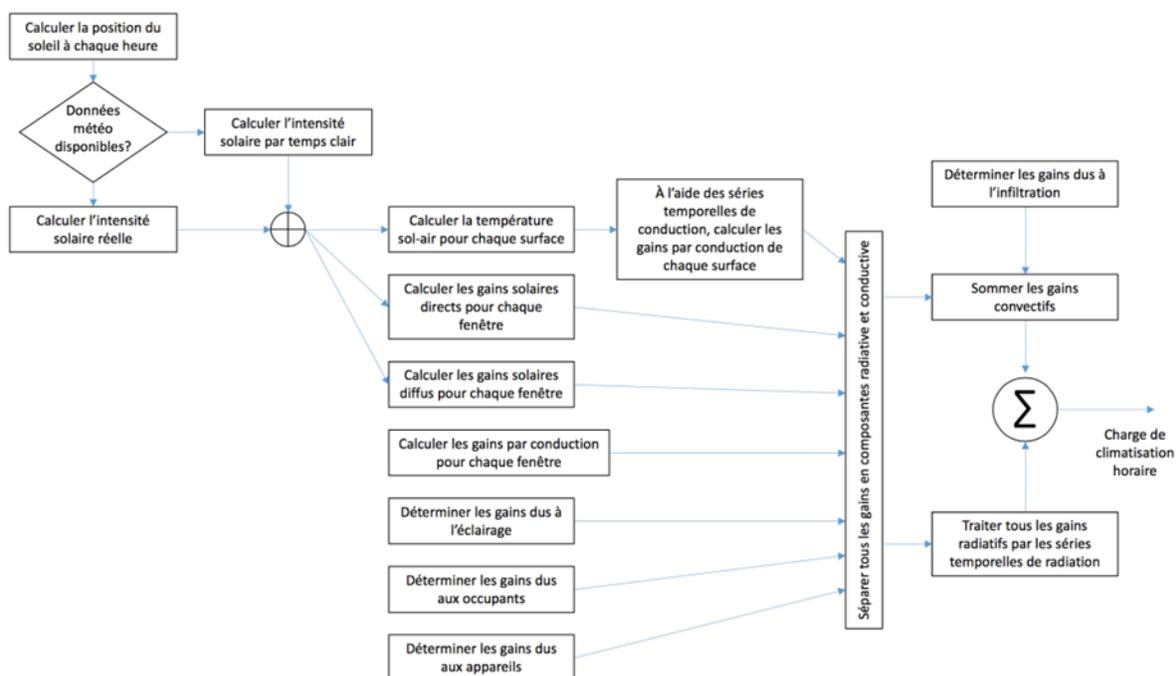
La première étape dans l'application de la méthode RTSM consistait à effectuer le bilan thermique des surfaces extérieures (dont celles exposées au soleil en tenant compte de sa déclinaison et de son déplacement diurne) et de calculer les gains par conduction qui en résultaient. Ces gains ont été calculés au moyen de facteurs de réponse entre l'extérieur et l'intérieur du milieu étudié par des séries temporelles de conduction (*Conduction Time Series*, CTS). Les gains par conduction et les gains internes ont ensuite été traités de façon compartimentée, soit au regard de leur fraction convective et de leur fraction radiative. Alors

---

<sup>19</sup> Il est à noter que ces gains de chaleur se divisent également en une fraction sensible et une fraction latente. D'une part, il est assumé que la chaleur sensible se propage dans le milieu modélisé par conduction, convection et par rayonnement. D'autre part, la partie latente est quant à elle issue de l'ajout d'humidité dans le milieu intérieur (p. ex. vapeur d'eau générée par les occupants ou humidité entrant par ventilation naturelle).

que l'ensemble des fractions convectives a été instantanément converti en chaleur, les fractions radiatives associées aux gains par conduction<sup>20</sup>, aux gains solaires ainsi qu'aux gains internes ont été converties au moyen des séries temporelles radiantes (*Radiant Time Series, RTS*). Les RTS ont permis de déterminer le moment où les gains radiatifs instantanés devaient être convertis en chaleur sensible (ou en charge de climatisation). Les gains de chaleur sensible (de même que la charge de climatisation associée) ont ensuite été obtenus en additionnant la somme des fractions radiatives à une heure donnée à la fraction convective calculée pour ce même moment. Le schéma suivant (figure A1-1) donne un aperçu de la méthode des séries temporelles radiantes.

Figure A1-1 Aperçu de la méthode des séries temporelles radiantes (RTSM)



Source : Écohabitation, 2018a.

<sup>20</sup> Selon les paramètres de la méthode RTSM, les gains radiatifs sont d'abord absorbés par les surfaces du milieu concerné : lorsque ces surfaces deviennent plus chaudes que l'air de la zone, une partie de cette chaleur est ensuite retransmise à l'air par convection. Ce phénomène est influencé par la capacité de stockage des différents éléments en présence et la partie des gains radiatifs qui influence la température intérieure est appelée à fluctuer dans le temps et dans l'espace.

Sur la base des informations assemblées aux étapes précédemment décrites, l'organisme Écohabitation a ensuite procédé à une évaluation théorique du confort thermique des occupants des logements concernés du complexe Raymond-Brunet. En dépit du caractère subjectif de cet aspect, il demeurerait possible d'évaluer le confort ressenti, dans une perspective populationnelle, à partir d'équations déterministes qui intègrent les facteurs présentés dans le tableau ci-dessous (tableau A1-7).

**Tableau A1-7 Facteurs influençant le confort thermique des occupants des logements considérés dans la modélisation**

Facteurs associés aux logements	Facteurs associés aux individus
Température sèche (°C)	Habillement (CLO)
Humidité relative (%)	Métabolisme (MET)
Vitesse de l'air (m/s)	-
Rayonnement thermique (°C)	-

Il est important de souligner que la température sèche correspond à la température de l'air intérieur du logement calculée à l'aide de la méthode RTS à chaque pas de temps considéré par le modèle. Le taux d'humidité relative du milieu a été déterminé de façon simultanée en tenant compte de l'humidité absolue de l'air extérieur ainsi que des gains en énergie latente associés aux activités des occupants. Par ailleurs, il a été assumé que la vitesse de l'air intérieur était faible en tout temps.

Le rayonnement thermique a été considéré par l'entremise de la température radiante moyenne, laquelle a été calculée en fonction de la température assignée aux surfaces dans le calcul de la température de l'air. Ce calcul supposait que la température de chacune des surfaces considérées est uniforme (bien que la température d'une surface puisse être différente de celle d'une autre).

De plus, à des fins de simplification des calculs, le modèle intégrait la présence d'un seul occupant installé en position assise au milieu de la pièce centrale, soit le salon. L'habillement (CLO) et l'activité métabolique (MET) de ce dernier ont été définis selon les paramètres retenus par l'ASHRAE. De façon plus spécifique, le CLO est défini comme l'habillement correspondant à une résistance thermique  $R = 0,155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ . À titre d'exemple, une tenue légère compatible avec les conditions estivales serait de l'ordre de 0,5 clo. Le MET est le niveau d'activité correspondant à l'énergie émise par un adulte sédentaire (assis et calme) et celui-ci correspond à une puissance de  $58,1 \text{ W/m}^2$  (ASHRAE, 2017).

Enfin, ces informations ont été utilisées pour calculer le vote moyen prévisible (*Predictable Mean Vote*, PMV) (Écohabitation, 2018a). Le PMV a ensuite été utilisé pour déterminer la probabilité qu'un occupant soit incommodé par l'environnement thermique de son logement en ayant recours au pourcentage de PPD; approche proposée par l'ASHRAE (2017) et présentée dans le livrable précisé ci-haut. Il est opportun de souligner que lors de l'atteinte d'un PMV neutre (égal à zéro), le PPD atteignait toujours 5 % d'insatisfaits. De ce fait, il s'avérait donc improbable, en

vertu de cette approche, d'éliminer complètement l'inconfort thermique des occupants, et ce, peu importe les particularités du milieu et de ses occupants.

### **3.4 Principales étapes associées à l'application du modèle numérique**

Puisque le projet visait à évaluer l'impact des vagues de chaleur sur le confort des occupants, il a d'abord été convenu de mener les simulations numériques en appliquant des conditions météorologiques dites caniculaires. Comme les deux campagnes de mesures sur le terrain n'ont pas été réalisées en contexte de vagues de chaleur (en raison des aléas météorologiques), il a été convenu d'appliquer les paramètres environnementaux associés à la vague de chaleur observée entre le 4 et le 8 août 2018 au modèle numérique développé. Il est à noter que le réel épisode de vague de chaleur considéré aux fins des travaux de modélisation correspond à la même période de l'année lors desquelles les phases de mesures pré- et postrénovation ont été réalisées (soit en 2017 et en 2019, respectivement). Ainsi, la trajectoire solaire considérée était sensiblement la même pour ces différentes périodes calendaires.

La simulation de six unités associées au complexe Raymond-Brunet (P, Q, R, C, G et H) a été réalisée en cinq grandes étapes (résumées ci-dessous) réalisées successivement :

1. Simulation de l'enveloppe prérénovation pour un occupant au niveau du RDC (position assise);
2. Simulation de l'enveloppe prérénovation pour un occupant au niveau de l'étage (position couchée dans la chambre principale);
3. Simulation de l'enveloppe postrénovation pour un occupant au niveau du RDC (position assise);
4. Simulation de l'enveloppe postrénovation pour un occupant au niveau de l'étage (position couchée dans la chambre principale);
5. Simulations selon divers scénarios, pour l'unité P (au niveau du RDC et de la chambre principale à l'étage) :
  - I. Ajout de pare-soleil sur la façade sud,
  - II. Ajout d'un mur végétal<sup>21</sup> (p. ex. vigne) ou d'un arbre en façade bloquant le soleil sur les façades exposées (excluant les fenêtres),
  - III. Ajout d'un toit blanc,
  - IV. Ajout simultané de pare-soleil, d'un mur végétal et d'un toit blanc,
  - V. Réduction de l'îlot de chaleur local (température ambiante supposée égale à la température de la station météorologique d'Ottawa).

---

<sup>21</sup> Les bénéfices des murs végétaux associés à la biodiversité et l'humidité ou à la gestion des eaux de pluie ne sont pas considérés dans cette modélisation.

## ANNEXE 2 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DE MESURES PASSIVES ADDITIONNELLES

Tirés du rapport final produit pour l'INSPQ de Écohabitation.

Figure A2-1 Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie de pare-soleil

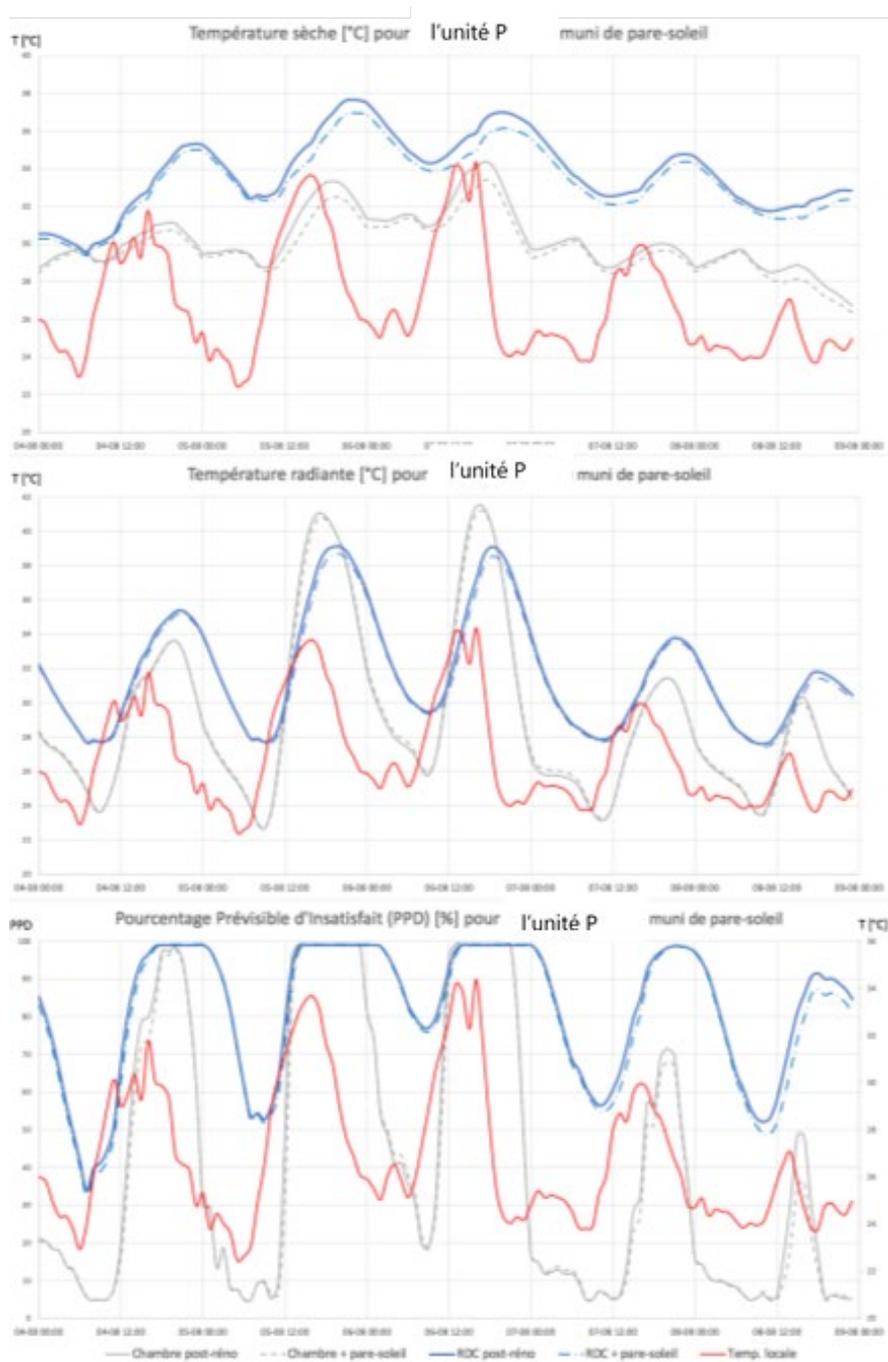


Figure A2-2 Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie d'un mur végétalisé

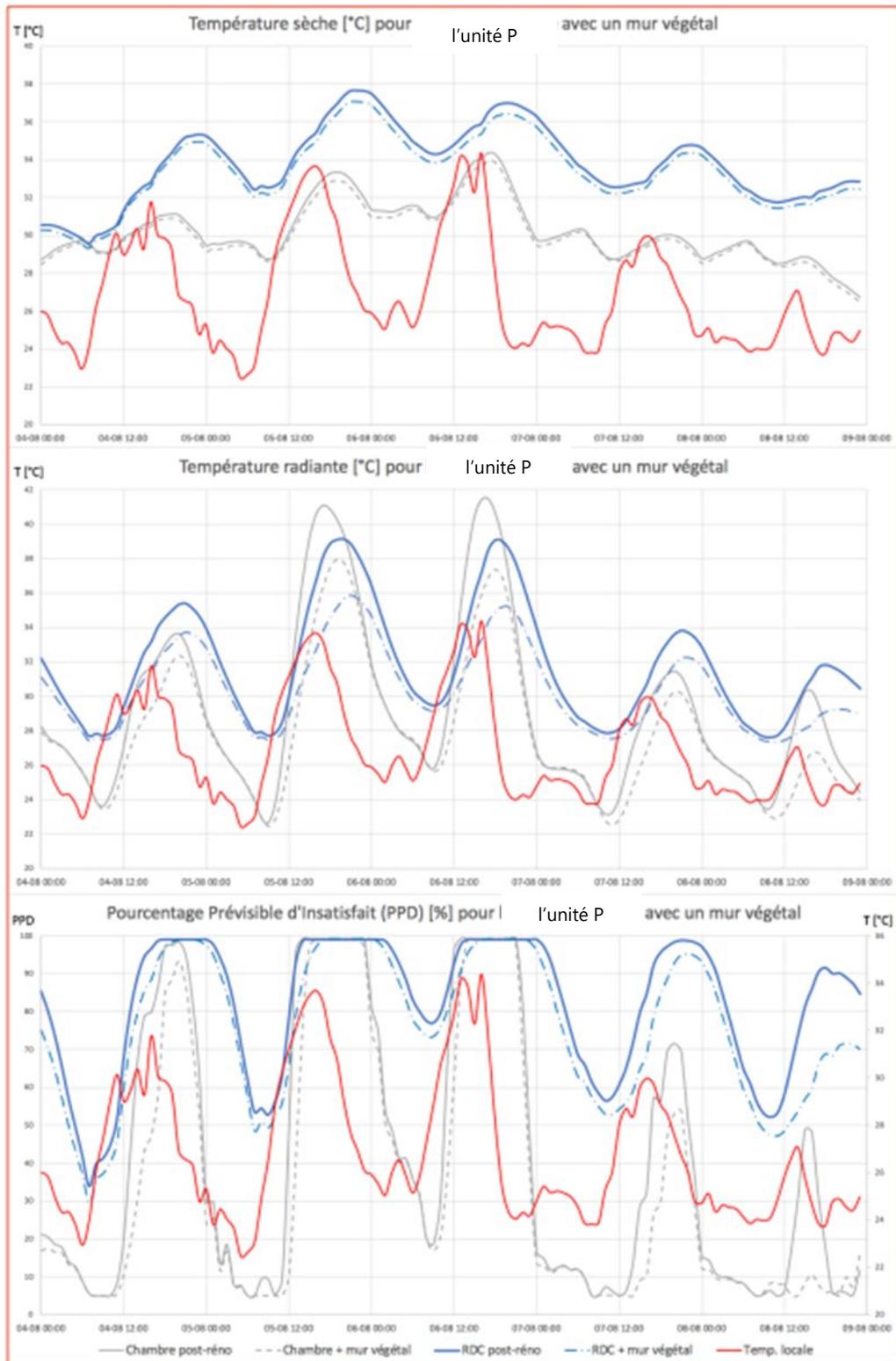


Figure A2-3 Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie d'un toit blanc

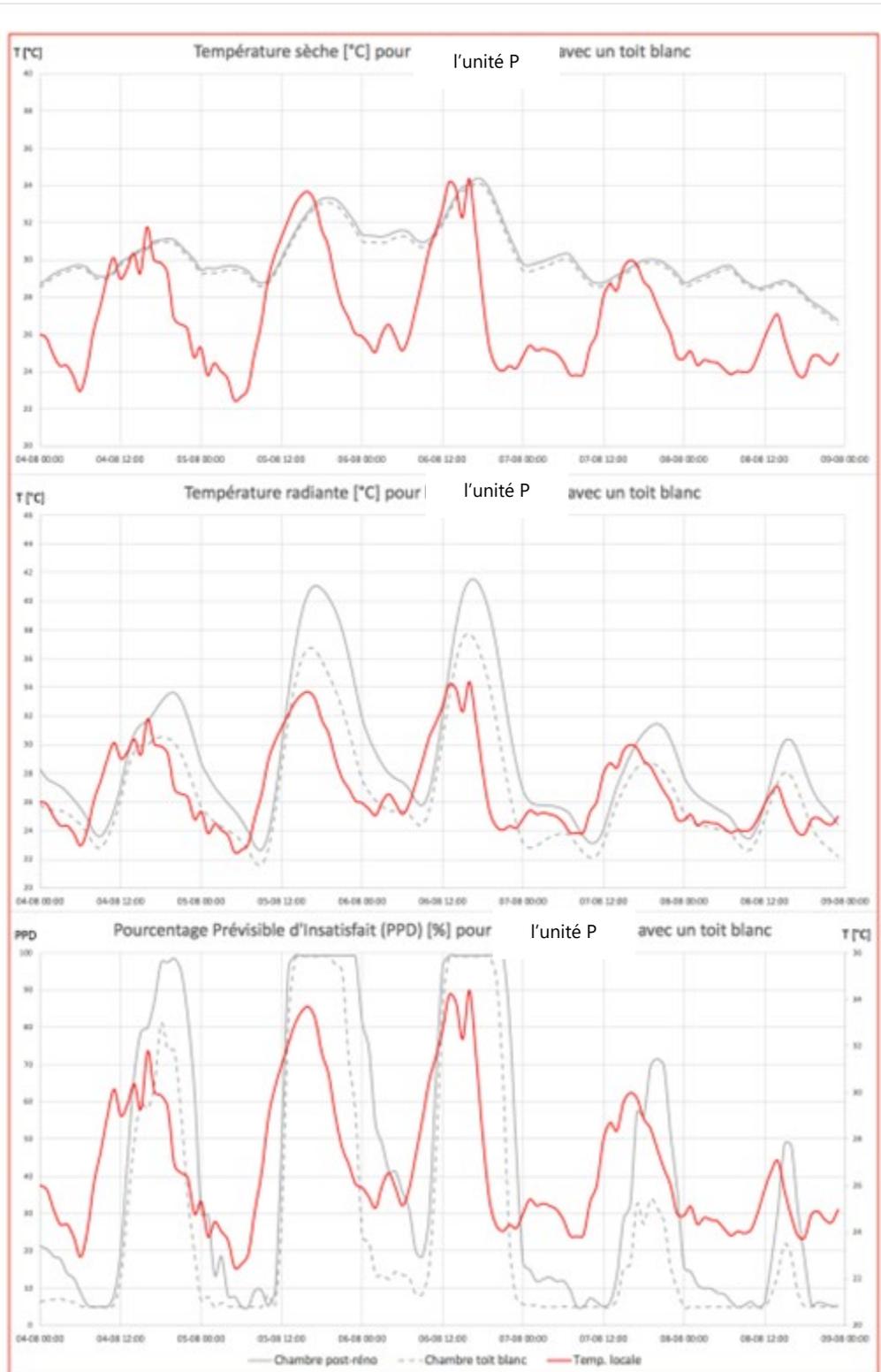


Figure A2-4 Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P munie de pare-soleil, de mur végétal et de toit blanc

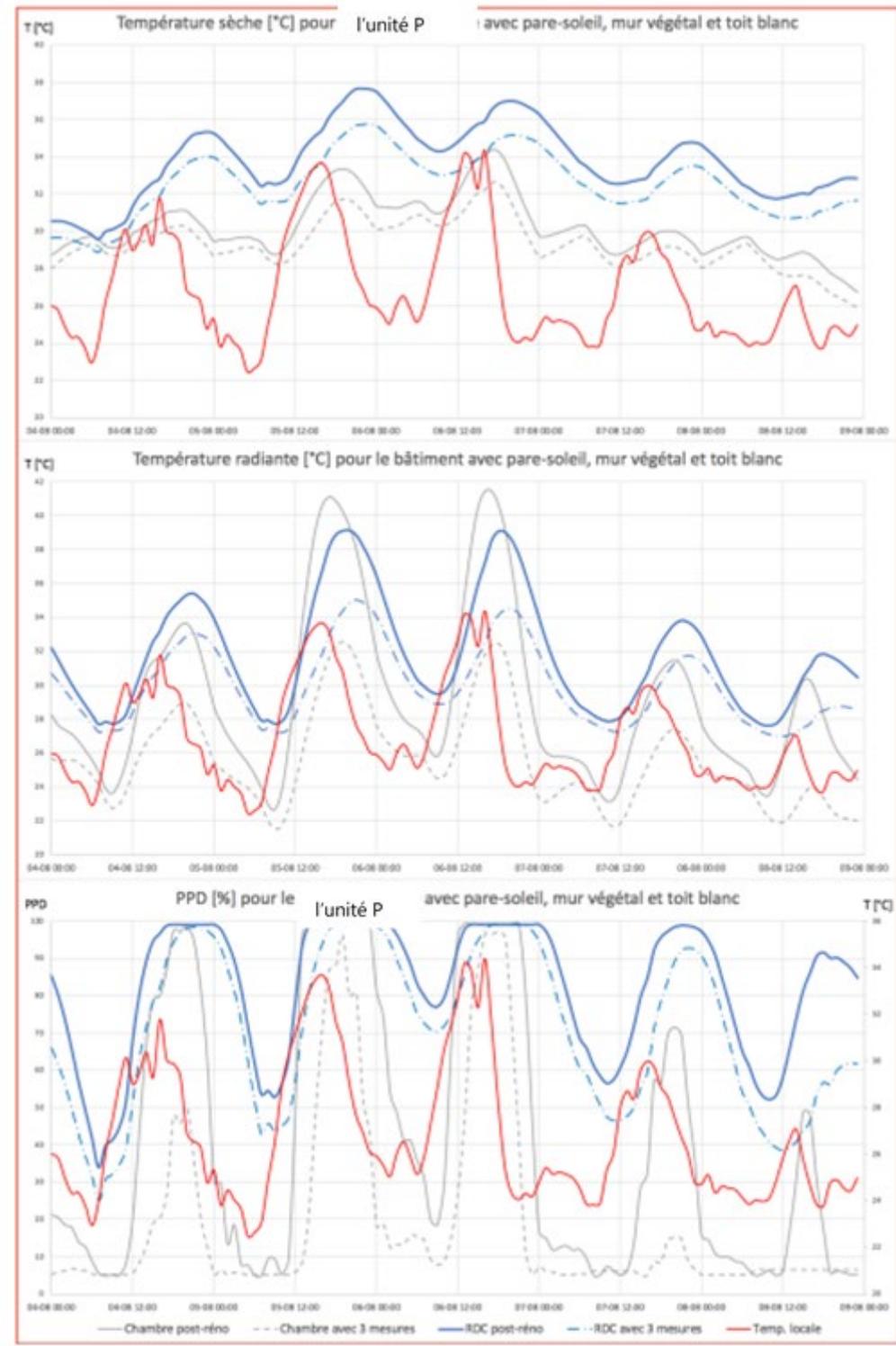
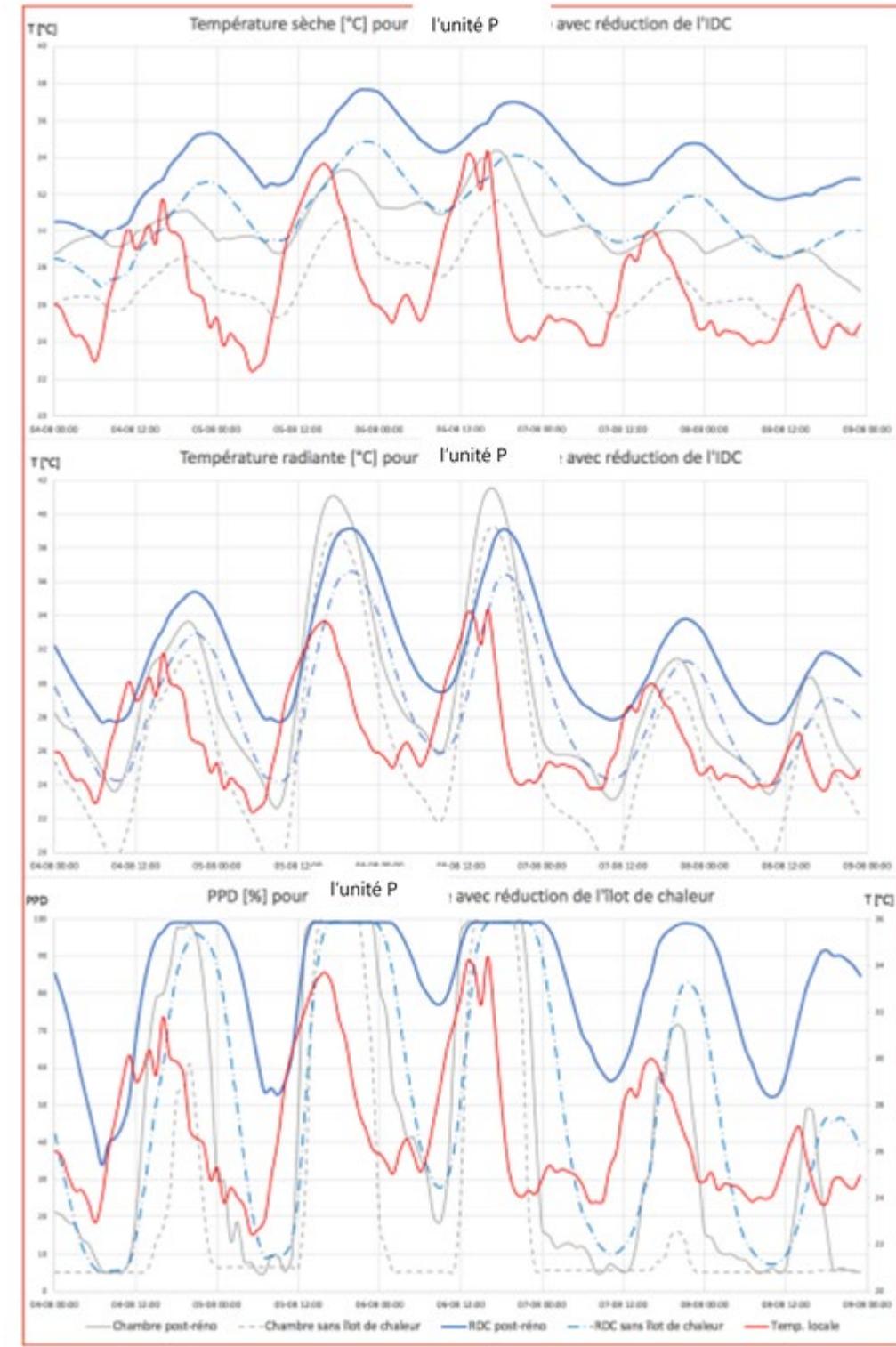
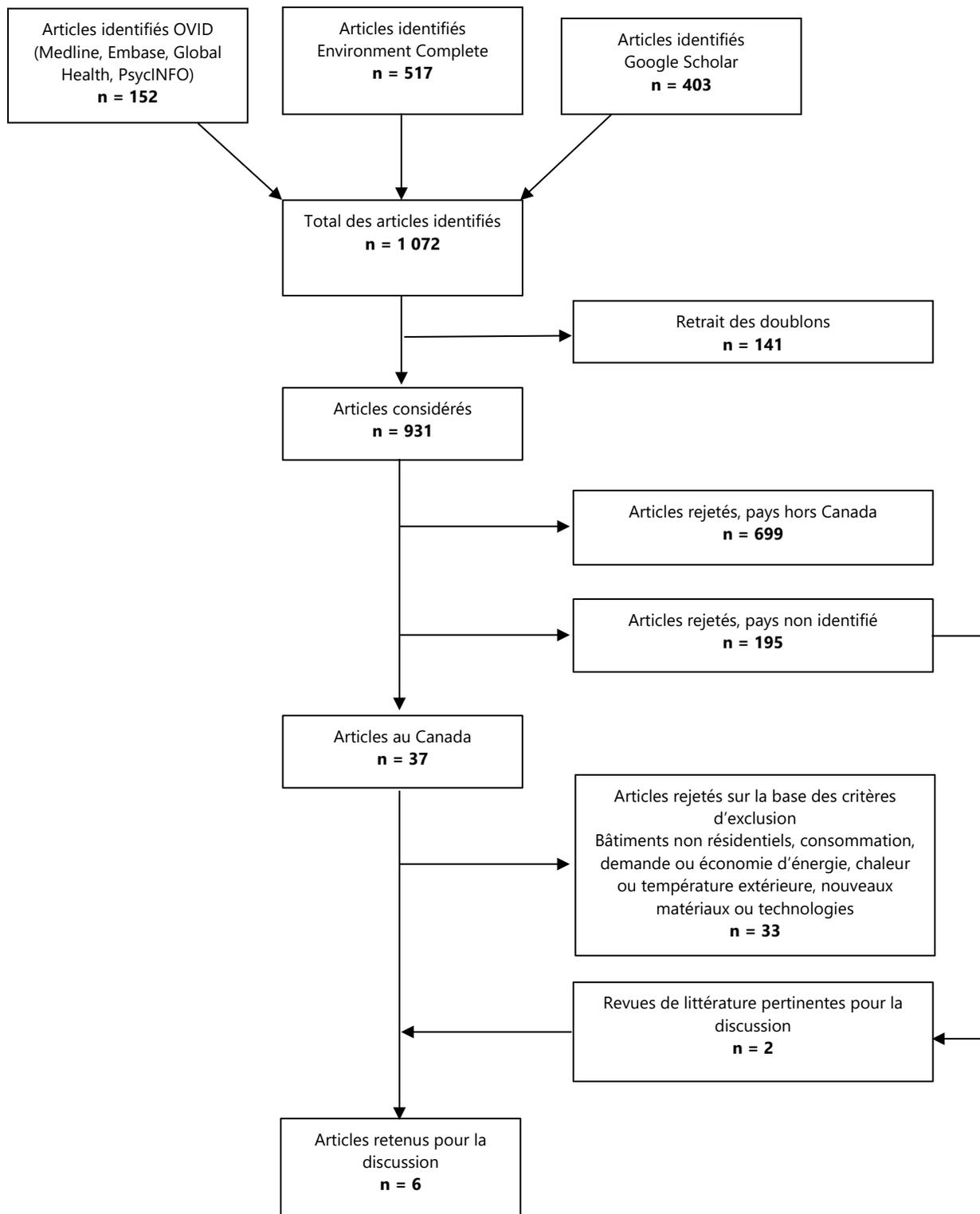


Figure A2-5 Température sèche moyenne, température radiante moyenne et PPD pour l'unité P en condition d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain



## ANNEXE 3 DIAGRAMME DE FLUX DE TYPE PRISMA





Centre d'expertise et  
de référence en santé publique

[www.inspq.qc.ca](http://www.inspq.qc.ca)