

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Résilience climatique des bâtiments : lignes directrices en matière de gestion des risques de surchauffe dans les bâtiments résidentiels
Laouadi, A.; Bartko, M.; Gaur, A.; Lacasse, M. A.

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

<https://doi.org/10.4224/40003840>

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=9b03f727-4397-493f-b75f-fa494ddac636>
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=9b03f727-4397-493f-b75f-fa494ddac636>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at <https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site <https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

NRC-CNRC CONSTRUCTION

Résilience climatique des bâtiments :

Lignes directrices en matière de gestion des risques de surchauffe dans les bâtiments résidentiels

Auteurs : Laouadi A., Bartko M., Gaur A., Lacasse M.A.

N° de rapport : CRBCPI-Y4-10

Date du rapport : 1^{er} avril 2021

Date de révision : 10 janvier 2022

N° de contrat : A1-012020-05

Date de l'entente : 29 novembre 2016





Résilience climatique des bâtiments :

Lignes directrices en matière de gestion des risques de surchauffe dans les bâtiments résidentiels

Auteur

Laouadi, Abdelaziz. Agent principal de recherche

Coauteurs

Bartko M., Gaur A., Lacasse M.A.

Approuvé

Armstrong, Marianne

Directrice de programme

Environnement bâti résilient aux changements climatiques

CNRC Centre de recherche en construction

N° du rapport : CRBCPI-Y4-10

Date du rapport : 1^{er} avril 2021

Date de révision : 10 janvier 2022

N° de contrat : A1-012020-05

Date d'accord : 29 novembre 2016

Programme : EBRCC

147 pages

Copie n°1/5

Le présent rapport ne peut en aucun cas être reproduit en tout ou en partie sans le consentement écrit du Conseil national de recherches du Canada et du Client.

(Page laissée intentionnellement en blanc)



TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	xii
Remerciements.....	xiv
Exonération de responsabilité	xv
Introduction	1
À qui s’adressent ces lignes directrices?.....	3
1 Objet.....	4
2 Portée.....	4
3 Définitions.....	5
4 Effets de la chaleur sur la santé humaine	7
4.1 Réponse du corps à la chaleur	7
4.2 Adaptation à la chaleur	8
4.3 Maladies liées à la chaleur.....	9
4.4 Prévention des maladies liées à la chaleur	10
4.5 Personnes vulnérables à la chaleur	11
5 Confort thermique et stress thermique	14
5.1 Indices PMV-PPD	15
5.2 Confort thermique adaptatif.....	15
5.3 Température effective standard	17
5.4 Indices CNRC améliorés pour PMV et SET	17
5.5 Exigences de confort des jeunes adultes	19
5.6 Exigences de confort des personnes âgées.....	20
5.7 Exigences de confort en matière de sommeil.....	22
5.8 Niveau de stress thermique des jeunes et des personnes âgées.....	23
6 Surchauffe dans les bâtiments.....	28
6.1 Introduction.....	28
6.2 Définition de la surchauffe	28
6.3 Caractérisation des événements de surchauffe	31

6.4	Choix des valeurs seuils	32
6.5	Critères de surchauffe.....	34
7	Facteurs de risque de surchauffe.....	40
7.1	Environnement extérieur.....	40
7.2	Bâtiment	41
7.3	Occupants du bâtiment.....	42
7.4	Communauté	43
8	Environnement extérieur	44
8.1	Introduction.....	44
8.2	Effets du changement climatique	45
8.3	Données climatiques de référence.....	47
8.3.1	Données climatiques de référence pour la période historique	47
8.3.2	Données climatiques de référence pour les projections climatiques futures.....	48
8.3.3	Précision des données de modélisation climatique	48
8.4	Définition des événements de chaleur extrême.....	49
8.5	Caractérisation des événements de chaleur extrême.....	53
8.6	Procédure d'extraction des années aux conditions météorologiques estivales extrêmes 54	
8.7	Cartes des vagues de chaleur pour une exposition extérieure	55
8.7.1	Période d'observation historique.....	56
8.7.2	Projections climatiques futures	56
9	Évaluation de la surchauffe	56
9.1	Procédure d'évaluation	56
9.2	Exigences relatives à la simulation informatique.....	57
9.2.1	Logiciel de simulation	57
9.2.2	Modèle de simulation de bâtiment	57
9.2.3	Étalonnage d'un modèle de simulation de bâtiment.....	57
9.3	Surveillance sur place.....	58
9.3.1	Protocole de mesure.....	58
9.3.2	Zonage thermique des espaces occupés.....	59
10	Mesures d'atténuation pour réduire le risque de surchauffe	60

10.1	Types de fenêtres	60
10.2	Dispositifs d'ombrage.....	60
10.3	Ventilation naturelle	60
10.4	Ventilation au moyen de ventilateurs	60
10.5	Ventilation mécanique.....	61
10.6	Refroidissement mécanique.....	61
10.7	Enveloppes de bâtiment réfléchissantes	61
11	Surchauffe dans les maisons individuelles.....	63
11.1	Effet des types de fenêtres	63
11.2	Effet des dispositifs d'ombrage	66
11.3	Effet de la ventilation des maisons.....	69
11.4	Effet du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé.....	74
11.5	Effet du type de construction.....	75
11.6	Consommation énergétique et risque de surchauffe des bâtiments	76
11.7	Effet du réchauffement planétaire sur le risque de surchauffe et l'énergie	78
12	Surchauffe dans les maisons en rangée	84
12.1	Effet des types de fenêtres	84
12.2	Effet des dispositifs d'ombrage	87
12.3	Effet de la ventilation des maisons.....	90
12.4	Effet du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé.....	92
12.5	Effet du type de construction.....	94
12.6	Consommation énergétique et risque de surchauffe des bâtiments	95
12.7	Effet du réchauffement planétaire sur le risque de surchauffe et l'énergie	97
13	Surchauffe dans les IRLM de moyenne hauteur	96
13.1	Effet des types de fenêtres	96
13.2	Effet des dispositifs d'ombrage	99
13.3	Effet de la ventilation de la suite	104
13.4	Effet du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé.....	114
13.5	Effet du type de construction.....	115
13.6	Effet des toits réfléchissants	117
13.7	Consommation énergétique et risque de surchauffe des IRLM.....	118

13.8 Effet du réchauffement planétaire sur le risque de surchauffe et l'énergie	120
Lignes directrices sur la surchauffe associées	125
Références bibliographiques.....	125
Appendix A - Modèles de simulation de bâtiment.....	128
A.1 Logiciel de simulation.....	128
A.2 Modèles de bâtiments.....	128
A.2.1 Bâtiments types (archétypes).....	128
128	
A.2.2 Caractéristiques du modèle de bâtiment.....	130
A.2.3 Systèmes CVCA de bâtiment.....	131
A.2.4 Réseau de flux d'air dans les bâtiments.....	132
A.3 Étalonnage des modèles de simulation de bâtiment	135
A.4 Stratégies de ventilation.....	136
A.5 Dispositifs d'ombrage.....	138
A.6 Types de fenêtres	139
A.7 Constructions murales des modèles de maisons	140
A.8 Murs de soubassement et hourdis des modèles de maisons	143
A.9 Constructions murales des modèles d'IRLM	144
A.10 Constructions des toitures des modèles de maisons	147
A.11 Constructions des toitures des modèles d'IRLM	148

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Température effective du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE-55 dans des espaces intérieurs ventilés naturellement (avec la permission d'ASHRAE, 2017)	16
Figure 2. Comparaison de l'indice PMV de Fanger et du nouvel indice amélioré (MPMV) avec les votes de sensation thermique mesurés (TSV) dans des chambres climatiques (Laouadi, 2022).....	18
Figure 3. Comparaison des températures corporelles et cutanées des jeunes et personnes âgées avec les données de mesure de Stapleton et coll. (2014).....	19
Figure 4. Zone de confort thermique des jeunes adultes (valeurs MPMV et SET).....	20
Figure 5. Zone de confort thermique des personnes âgées présentant un taux métabolique équivalent et inférieur de 30 % à celui des jeunes adultes	21
Figure 6. Relation entre les indices PMV pour les jeunes et les personnes âgées avec un taux métabolique équivalent ou inférieur de 30 %	22
Figure 7. Exigences de confort pendant le sommeil des jeunes et des personnes âgées calculées en fonction de la SET pour de jeunes adultes éveillés mais avec un taux métabolique équivalent à celui pendant le sommeil (0,7 met). On considère que les personnes âgées endormies ont un taux métabolique inférieur de 20 % (0,56 met)..	23
Figure 8. Comparaison des températures corporelle et cutanée, des échanges de chaleur sèche et par évaporation de la peau, de la mouillure cutanée et de la perte d'eau corporelle (sur une durée de 3 heures) de personnes âgées par rapport à des jeunes dans des conditions intérieures typiques, en considérant que le taux métabolique des personnes âgées est identique à celui des jeunes.	26
Figure 9. Comparaison des températures corporelle et cutanée, des échanges de chaleur sèche et par évaporation de la peau, de la mouillure cutanée et de la perte d'eau corporelle (sur une durée de 3 heures) de personnes âgées par rapport à des jeunes dans des conditions intérieures typiques, en considérant que le taux métabolique des personnes âgées est inférieur de 30 % à celui des jeunes.....	27
Figure 10. Gravité des événements de surchauffe (°C*h) par rapport à la perte d'eau corporelle cumulative (%) pour de jeunes adultes	37
Figure 11. Intensité des événements de surchauffe (°C) par rapport à la température corporelle maximale (°C) pour de jeunes adultes	38
Figure 12. Gravité des événements de surchauffe (°C*h) par rapport à la perte d'eau corporelle (%) des personnes âgées en bonne santé.....	38
Figure 13. Intensité des événements de surchauffe (°C) par rapport à la température corporelle maximale (°C) (jeunes adultes) des personnes âgées en bonne santé.....	39

Figure 14. Séries chronologiques des changements projetés en termes de températures moyennes annuelles au Canada. Ces changements ont été calculés en prenant comme référence la période allant de 1986 à 2005 (Source : http://climate-scenarios.canada.ca/index.php?page=download-cmip5)	46
Figure 15. Cartes des caractéristiques des vagues de chaleur extrême (données climatiques observées historiques).....	57
Figure 16. Cartes des caractéristiques moyennes de toutes les vagues de chaleur (données climatiques observées historiques)	58
Figure 17. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques des vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 2,0°C (2034 - 2064).....	59
Figure 18. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques moyennes de toutes les vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 2,0°C (2034 - 2064)	60
Figure 19. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques des vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 3,0°C (2053 - 2083).....	61
Figure 20. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques moyennes de toutes les vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 3,0°C (2053 - 2083)	62
Figure 21. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles, bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	64
Figure 22. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons individuelles de construction légère actuelle	65
Figure 23. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement de maisons individuelles, bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr).....	66
Figure 24. Effet des dispositifs d'ombrage sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)	68
Figure 25. Effet des dispositifs d'ombrage sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons individuelles de construction légère actuelle avec des fenêtres types (Dclear+eH)	68
Figure 26. Effet des dispositifs d'ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement dans des maisons individuelles avec des fenêtres	

types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)69

Figure 27. Effet de la ventilation à l'échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)	70
Figure 28. Effet des stratégies de ventilation à l'échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types (Dclear+eH) et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles	71
Figure 29. Effet de la ventilation au moyen de ventilateurs sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles.....	73
Figure 30. Effet de la stratégie d'ouverture des fenêtres sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles.....	73
Figure 31. Effets du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	74
Figure 32. Effets du type de construction sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec fenêtres types ouvertes protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	75
Figure 33. Relation entre la consommation énergétique (électricité et gaz) totale et le risque de surchauffe dans des maisons individuelles non ventilées naturellement et bâties selon quatre pratiques de construction locales différentes (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr).....	77
Figure 34. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons individuelles modernisées avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées)	79
Figure 35. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons individuelles neuves avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).....	80
Figure 36. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons individuelles ENZr avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).....	81

Figure 37. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur les variations relatives de consommation énergétique en matière de chauffage, de refroidissement et totale des maisons individuelles avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs	82
Figure 38. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée, bâties selon des pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	85
Figure 39. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons en rangée de construction légère	86
Figure 40. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement de maisons en rangée de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	86
Figure 41. Effet des dispositifs d'ombrage sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec fenêtres types et bâties selon des pratiques de construction légère (ancienne : Dclear; modernisée : Dclear+eH; actuelle : Dclear+eH; et ENZr : Tclear+eH).....	88
Figure 42 : effet des dispositifs d'ombrage sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons en rangée de construction légère actuelle avec des fenêtres types	89
Figure 43. Effet des dispositifs d'ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement dans des maisons en rangée avec des fenêtres types et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)	89
Figure 44. Effet de la ventilation à l'échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)	91
Figure 45. Effet des stratégies de ventilation à l'échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec des fenêtres types et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles	91
Figure 46. Effets du refroidissement mécanique avec température du point de consigne abaissé sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	93
Figure 47. Effets du type de construction sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée ventilées naturellement avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	94

Figure 48. Relation entre la consommation énergétique totale et le risque de surchauffe dans des maisons en rangées non ventilées naturellement et bâties selon quatre pratiques de construction locales différentes (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr).....	96
Figure 49. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons en rangée modernisées avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).....	98
Figure 50. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons en rangée neuves (actuelles) avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).	99
Figure 51. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons en rangée ENZr avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).....	100
Figure 52. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur les variations relatives de consommation énergétique en matière de chauffage, de refroidissement et totale des maisons en rangée avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs	101
Figure 53. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la gravité maximale de la surchauffe dans les suites d'IRLM bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	97
Figure 54. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM de construction légère actuelle	98
Figure 55. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement d'IRLM de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	99
Figure 56. Effet des dispositifs d'ombrage sur la gravité de la surchauffe (valeurs maximale et minimale) dans des suites d'IRLM avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH).....	101
Figure 57. Effet des dispositifs d'ombrage sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types (Dclear+eH) et de construction légère actuelle	102
Figure 58. Effet des dispositifs d'ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement d'IRLM avec fenêtres types et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr).....	103

Figure 59. Effet du débit d'air des extracteurs de la suite au cours de la ventilation de nuit (de 22 h 00 à 9 h 00) sur la température de la chambre d'une suite située à l'extrémité ouest (SO) dans un IRLM (construction légère actuelle) au 4 ^e étage, pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010	105
Figure 60. Comparaison de la ventilation de nuit avec un VRC (fonctionnant en continu) et des extracteurs (fonctionnant de 22 h 00 à 9 h 00) sur la température de la chambre d'une suite située à l'extrémité ouest (SO) dans un IRLM (construction légère actuelle) au 4 ^e étage, pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010.	106
Figure 61. Effet des stratégies de ventilation sur la gravité de la surchauffe (valeurs maximale et minimale) dans des suites d'IRLM avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	108
Figure 62. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM ancien	109
Figure 63. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM modernisé	110
Figure 64. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM actuel	111
Figure 65. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM ENZr	112
Figure 66. Effet des stratégies de ventilation sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types et de construction légère actuelle	113
Figure 67. Profil de la température de la salle de séjour de la suite sud (S1) par étage du bâtiment pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types et de construction légère actuelle	113
Figure 68. Effets du refroidissement mécanique avec température du point de consigne abaissé sur la gravité maximale de la surchauffe dans des suites d'IRLM avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	114
Figure 69. Effet des types de constructions sur la gravité maximale de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans des suites d'IRLM bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	116
Figure 70. Effets des toits réfléchissants sur la gravité maximale de la surchauffe dans des suites d'IRLM ventilées naturellement et bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)	117

Figure 71. Relation entre consommation énergétique totale (électricité et gaz) des bâtiments et gravité de surchauffe maximale dans les suites d'IRLM sans ventilation naturelle ..	119
Figure 72. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité maximale et l'intensité de la surchauffe dans les suites d'IRLM modernisés, avec et sans ventilation naturelle.....	121
Figure 73. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité maximale et l'intensité de la surchauffe dans les suites d'IRLM actuels, avec et sans ventilation naturelle.....	122
Figure 74. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité maximale et l'intensité de la surchauffe dans les suites d'IRLM ENZr, avec et sans ventilation naturelle.....	123
Figure 75. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur les variations relatives en matière de consommation énergétique liée au chauffage, au refroidissement et totale (chauffage + refroidissement) dans des IRLM.....	124
Figure 76. Modèle de maison individuelle type.....	128
Figure 77. Modèle de maison en rangée type	128
Figure 78. Modèle d'IRLM de moyenne hauteur type	129
Figure 79 : Vue en plan du modèle d'IRLM de moyenne hauteur avec zones thermiques et noms des suites. Remarque : la suite SE au premier étage est convertie en deux bureaux.....	129
Figure 80. Échanges horizontaux et verticaux du réseau de flux d'air pour un modèle de maison individuelle	132
Figure 81. Échanges horizontaux et verticaux du réseau de flux d'air pour un modèle de maison en rangée	133
Figure 82. Échanges horizontaux et verticaux du réseau de flux d'air pour un modèle d'IRLM	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Température corporelle et problèmes de santé associés (Pisacane et coll., 2007)...	8
Tableau 2. Répartition de la population canadienne – Données du recensement 2016 (Source : StatCan, 2016).....	13
Tableau 3. Températures effectives de confort adaptatif ASHRAE-55 (2017) des villes canadiennes choisies pour le mois de juillet. Les températures extérieures moyennes mensuelles proviennent des données climatiques historiques de 1981 à 2010 d'ECCC (2018a).....	16
Tableau 4. Échelle de sensation thermique SET.....	17
Tableau 5. Valeurs seuils suggérées de SET_d et SET_n pour des occupants non acclimatés (et acclimatés) selon le type de bâtiment, en évolution libre ou partiellement climatisés ⁺	34
Tableau 6. Utilisation de la climatisation dans les bâtiments résidentiels par province, enquête de 2011 de RNCAN sur les ménages (RNCAN, 2011).....	42
Tableau 7. Utilisation de la climatisation dans les bâtiments résidentiels par type de bâtiment, enquête de 2011 de RNCAN sur les ménages (RNCAN, 2011).....	42
Tableau 8. Changements moyens projetés en termes de températures moyennes, calculés par province et à l'échelle du Canada*	47
Tableau 9. Comparaison entre les données de simulation et d'observation de la température maximale annuelle pour la période historique 1986 – 2016 dans onze villes canadiennes	49
Tableau 10. Critères d'alerte de chaleur d'ECCC pour les avertissements publics (T_{max} et T_{min} sont respectivement les températures quotidiennes maximale et minimale)	52
Tableau 11. Valeurs de référence de SET_n pour le sommeil dans les villes canadiennes sélectionnées.....	53
Tableau 12. RSWY avec trois types de vagues de chaleur extrême pour la période historique (1986 - 2016) dans les villes canadiennes sélectionnées.....	55
Tableau 14. Taux de fuite d'air dans les bâtiments	130
Tableau 15. Systèmes CVCA de différents modèles de maison.....	131
Tableau 16. Systèmes CVCA de différents modèles d'IRLM	131
Tableau 17. Étalonnage d'un modèle de maison individuelle	135
Tableau 18. Étalonnage d'un modèle d'IRLM de moyenne hauteur	1
Tableau 19. Stratégies de ventilation de modèles de maisons individuelles et en rangée	136
Tableau 20. Stratégies de ventilation pour des modèles d'IRLM	137
Tableau 21. Types de dispositifs d'ombrage des modèles de bâtiments	138

Tableau 22. Types de fenêtres (ε désigne l'émissivité).....	139
Tableau 23. Types de constructions murales des modèles de maisons individuelles et en rangée	140
Tableau 24. Constructions des murs de soubassement et des hourdis des modèles de maisons	143
Tableau 25. Types d'ensembles muraux des modèles d'IRLM.....	144
Tableau 26. Constructions des toitures des modèles de maisons	147
Tableau 27. Constructions des toitures des modèles d'IRLM	148

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé par le Centre de recherche en construction du Conseil national de recherches du Canada grâce au financement d'Infrastructure Canada, afin d'appuyer le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques. Les auteurs les remercient très chaleureusement. Les auteurs souhaitent également remercier le Dr Mehdi Ghobadi pour avoir révisé ce document, ainsi que pour ses commentaires et suggestions qui se sont avérés très utiles.

EXONÉRATION DE RESPONSABILITÉ

Le présent document de lignes directrices, le premier d'une série de lignes directrices portant sur la surchauffe des bâtiments découlant des effets du changement climatique, a été élaboré à l'issue de nombreux projets de recherche dans le cadre de l'Initiative Bâtiments et infrastructures publiques de base résistants aux changements climatiques. Le contenu de ces lignes directrices se base sur les meilleures connaissances disponibles au moment de leur publication et les dernières recherches portant sur le stress et le confort thermiques des jeunes et des personnes âgées occupant des lieux de travail et des environnements domestiques. Des simulations de bâtiments ont été utilisées afin d'analyser le risque de surchauffe dans les bâtiments résidentiels types conformes aux pratiques de construction locales à Ottawa (Ontario). Le Conseil national de recherches du Canada et les auteurs de la présente publication n'assument aucune responsabilité quant aux informations publiées, ou ne pourront verser une quelconque indemnisation en cas de préjudice, perte ou blessure physique, de quelque nature que ce soit, résultant de l'utilisation de ces lignes directrices.

INTRODUCTION

Dans les climats froids aux étés tempérés, la surchauffe n'a jamais constitué un problème pour les bâtiments anciens et fragiles au cours des dernières décennies. Avec la menace croissante du réchauffement planétaire et des mesures très strictes pour réduire la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver, afin d'améliorer l'efficacité énergétique des maisons, la surchauffe est devenue une réelle préoccupation en matière de confort et de santé des occupants des bâtiments. Elle résulte de l'accumulation excessive de chaleur à l'intérieur des bâtiments et de la difficulté à dissiper avec efficacité cette chaleur vers l'extérieur.

L'environnement extérieur est la principale cause de cette chaleur excessive, en particulier au cours des vagues de chaleur extrême estivales. Cependant, les bâtiments peuvent aggraver la situation en générant une chaleur interne supplémentaire provenant des équipements, des éclairages, des occupants (densité) et, en outre, de la rétention de la chaleur, étant donné les niveaux d'isolation élevés, l'étanchéité supérieure des enveloppes et la ventilation inadéquate de l'espace.

La surchauffe dans les bâtiments fait encore l'objet de recherches intensives dans plusieurs pays. La surchauffe ne doit pas être confondue avec l'inconfort thermique, sujet déjà largement abordé dans le cadre des bâtiments climatisés ou naturellement ventilés. La différence fondamentale entre les deux notions tient au fait que l'inconfort thermique est une sensation instantanée ressentie par les occupants du bâtiment, exprimant leur insatisfaction dans leurs conditions environnementales. La surchauffe, quant à elle, désigne l'effet cumulatif sur plusieurs jours de conditions environnementales liées au confort et à la santé des occupants. En outre, le confort (ou l'inconfort) thermique se rapporte aux espaces occupés, alors que la surchauffe concerne les occupants eux-mêmes, qui peuvent modifier les espaces lorsqu'ils effectuent différentes activités ou s'adapter au stress thermique. Dans cette optique, et au sein de ces lignes directrices sur la surchauffe dans les bâtiments, une nouvelle approche a été introduite pour évaluer la surchauffe à partir des résultats en matière de santé liée à la chaleur, pouvant découler de la déshydratation et de l'augmentation de la température interne du corps avant la survenue d'une maladie liée à la chaleur.

Ce document comprend treize chapitres contenant des informations importantes sur la relation qui existe entre la chaleur et la réponse du corps humain, un cadre général permettant d'évaluer le risque de surchauffe dans les bâtiments et l'application du cadre aux bâtiments résidentiels au Canada. Les trois premiers chapitres présentent respectivement l'objet, le champ d'application et les définitions des termes figurant dans le document. Le Chapitre 4 contient des informations pertinentes se rapportant aux effets de la chaleur sur le corps humain, et la manière avec laquelle celui-ci y répond par thermorégulation et adaptation à la chaleur. Les maladies liées à la chaleur correspondant aux différents niveaux de défaillance des processus de thermorégulation sont présentées avec les principales mesures de prévention. Les informations du Chapitre 5 se basent sur de nouvelles recherches abordant le confort et le stress thermiques. Ce chapitre précise les améliorations apportées aux indices de confort et de stress thermiques actuellement disponibles afin de pouvoir surmonter leurs limites lorsqu'il

s'agit de couvrir des plages étendues de paramètres d'entrée, pour prévoir les besoins en matière de confort thermique des jeunes et personnes âgées (> 65 ans) sur les lieux de travail et dans l'environnement de sommeil. Les niveaux de stress thermique en termes de température corporelle et de la peau, de pertes thermiques cutanées sèches et par évaporation, et de perte d'eau du corps chez les jeunes et les personnes âgées sont présentés dans des conditions environnementales intérieures types. Les Chapitres 6 à 9 présentent un cadre général permettant d'évaluer le risque de surchauffe dans les bâtiments. Le Chapitre 6 détaille une nouvelle approche pour définir et caractériser les surchauffes et les critères de déclaration des surchauffes dans les bâtiments avec des occupants jeunes et âgés. Le Chapitre 7 énumère les facteurs pouvant augmenter le risque de surchauffe dans les bâtiments. Le Chapitre 8 décrit l'environnement extérieur comme facteur principal influençant la surchauffe. Ce chapitre s'intéresse aux nouvelles approches permettant de recueillir des données climatiques à long terme pour la période historique et les projections climatiques futures couvrant sept scénarios de réchauffement climatique d'ici la fin du 21^e siècle, ainsi que de définir et de caractériser des événements de chaleur extrême. Une procédure pour extraire les années aux conditions météorologiques estivales avec plusieurs types de vagues de chaleur extrême à partir des données climatiques à long terme est présentée afin de l'appliquer à n'importe quel climat local. Des cartes d'exposition spatiales des vagues de chaleur extrême sur des endroits sélectionnés au Canada ont également été ajoutées pour la période historique et les projections climatiques futures. Le Chapitre 10 énumère des mesures d'atténuation permettant de réduire le risque de surchauffe dans les bâtiments. Enfin, les Chapitres 11 à 13 présentent les résultats découlant de la surchauffe en appliquant le cadre des Chapitres 6 à 9 aux trois types de bâtiments résidentiels (maisons individuelles et contiguës et bâtiments résidentiels à logements multiples et de moyenne hauteur) dans le climat actuel et sept scénarios de projections climatiques futures.

À QUI S'ADRESSENT CES LIGNES DIRECTRICES?

Les présentes lignes directrices constituent un réservoir d'informations pour gérer le risque de surchauffe dans les bâtiments résidentiels situés dans des climats froids avec des étés tempérés, comme au Canada, et leurs projections climatiques futures. Elles sont destinées à informer les promoteurs immobiliers, concepteurs (architectes), modélisateurs et simulateurs de bâtiments, ainsi que les ingénieurs en CVC prenant part à la conception et à la modernisation de bâtiments à haut rendement énergétique et à la résilience climatique des bâtiments. Ces lignes directrices fournissent également des informations basées sur des recherches portant sur les exigences techniques et les moyens d'évaluation destinés à garantir le confort et la sécurité des occupants des bâtiments jugés vulnérables à la surchauffe, tels que les personnes âgées, et qui s'avèrent utiles pour élaborer des codes officiels applicables aux bâtiments afin de pouvoir intégrer la surchauffe aux codes de l'énergie pour les bâtiments et aux normes d'efficacité énergétique du bâtiment.

1 OBJET

L'objet des présentes lignes directrices est double : (i) Fournir un cadre pour évaluer le risque de surchauffe dans les bâtiments, en faisant appel à la simulation de bâtiment ou la surveillance sur place continue des conditions intérieures du bâtiment; (ii) Appliquer le cadre pour évaluer la pertinence des mesures d'atténuation choisies en vue de réduire le risque de surchauffe dans les bâtiments résidentiels anciens types, modernisés, neufs et à consommation énergétique nette zéro sous le climat local actuel d'Ottawa (Ontario), ainsi que des projections climatiques futures.

2 PORTÉE

Les présentes lignes directrices visent à répondre à l'évaluation du risque de surchauffe dans les bâtiments découlant des vagues de chaleur extrême des climats locaux sur place. Ces lignes directrices initiales comportent cependant des données sur le risque de surchauffe des bâtiments résidentiels, obtenues en appliquant le cadre présenté sur l'évaluation de la surchauffe pour la ville d'Ottawa (Ontario) comme moyen d'évaluation des mesures d'atténuation de la surchauffe choisies.

Les données climatiques locales sont extraites des observations climatiques historiques les plus récentes, effectuées au cours des trois dernières décennies. Les données de projection climatique future pour différents scénarios de changement climatique proviennent néanmoins de bases de données brutes de modélisation climatique d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). Les données climatiques brutes ont été biaisées et corrigées pour le lieu soumis à l'étude, mais sont toujours biaisées par rapport aux données d'observation climatiques historiques. Par conséquent, les données sur le risque de surchauffe obtenues dans le cadre des projections climatiques futures doivent être utilisées à des fins de comparaison relative, et ne sont pas destinées à servir de valeurs absolues. En outre, les facteurs responsables du changement climatique tels que les effets des îlots de chaleur urbains ne sont pas pris en compte dans les données climatiques locales ni dans les projections climatiques futures.

De nombreuses définitions de la surchauffe et se rapportant au confort sont utilisées par différents organismes et chercheurs du monde entier. Les lignes directrices du présent document adoptent cependant une toute nouvelle définition de la surchauffe liée au confort et aux effets de la chaleur sur la santé des adultes d'âge moyen ou personnes âgées en bonne santé occupant les bâtiments. Les occupants des bâtiments sont présumés aptes à tolérer un léger inconfort thermique sans effet négatif sur la santé, et pouvoir s'adapter de manière à retrouver simplement un confort thermique, par exemple en changeant de vêtements, en installant des ventilateurs portables, en ouvrant les fenêtres, en se déplaçant d'un espace chaud vers un espace plus frais, ou au moyen d'autres mesures d'adaptation. Les enfants (de moins de 15 ans) ou les adultes ayant des problèmes de santé n'ont pas été pris en compte dans ce document; seuls les jeunes adultes et les personnes âgées ont fait l'objet d'évaluation.

Enfin, ces lignes directrices s'appliquent aux bâtiments résidentiels comme les maisons individuelles et en rangée ainsi que les bâtiments résidentiels à logements multiples et de moyenne hauteur conformes aux pratiques de construction habituelles du Canada des années 80 (bâtiments anciens), au Code national du bâtiment – Canada actuellement en vigueur (CNRC, 2015) et à la future conception à consommation énergétique nette zéro (augmentation de la performance thermique de 30 %).

3 DÉFINITIONS

Les termes spéciaux utilisés dans les présentes lignes directrices sont définis ci-dessous.

Confort thermique adaptatif	Confort thermique dans un environnement construit non climatisé où les occupants ont la possibilité de s'adapter au chaud ou au froid.
Événement de chaleur intérieur quotidien	Événement de chaleur intérieur avec des températures chaudes qui survient quotidiennement pendant au moins un nombre d'heures déterminé au cours de la journée, et qui déclenche une réponse physiologique et une action des occupants du bâtiment afin de retrouver un confort thermique.
Événement de chaleur extérieur quotidien	Événement de chaleur extérieur avec des températures chaudes qui survient quotidiennement pendant au moins un nombre d'heures déterminé au cours de la journée, et qui déclenche une réponse physiologique et une action des personnes directement exposées à l'ombre afin de retrouver un confort thermique.
Vague de chaleur	Synonyme d'événement de chaleur extrême extérieur.
Vague de chaleur, durée (jours)	Nombre d'événements de chaleur extérieurs quotidiens en continu.
Vagues de chaleur, intensité (°C)	Correspond à la gravité / (durée * 24).
Vagues de chaleur, gravité (°C*h)	Ampleur d'une vague de chaleur donnée par l'Équation (1), et évaluée dans des conditions extérieures.
Occupant âgé d'un bâtiment	Occupant adulte de plus de 65 ans.
Événement de chaleur extrême extérieur	Événements de chaleur extérieurs quotidiens en continu affectant le confort extérieur des personnes exposées à ces événements de chaleur à l'ombre pendant au moins une journée.
Événement de surchauffe	Événements de chaleur intérieurs quotidiens en continu
Surchauffe	Effet cumulatif sur le confort thermique (ou le stress thermique) et la santé des occupants directement exposés à des événements de chaleur intérieurs quotidiens en continu.

Surchauffe, durée (jours)	Nombre d'événements de chaleur intérieurs quotidiens en continu.
Surchauffe, intensité (°C)	Correspond à la gravité / (durée * 24).
Surchauffe, gravité (°C*h)	Ampleur d'un événement de surchauffe donnée par l'Équation (1), et évaluée dans des conditions intérieures.
Température effective standard (SET), (°C)	Température d'équilibre d'air immobile d'un environnement intérieur imaginaire avec un taux d'humidité relative de 50 % et une température moyenne radiante égale à la température de l'air, dans lequel une personne imaginaire réalisant la même activité réelle et portant des habits normalisés pour le niveau d'activité présente une perte thermique cutanée, un stress thermique (température de la peau) et des contraintes thermiques (mouillure cutanée) identiques à ceux de la personne réelle dans un environnement réel (Parsons, 2014).
Stress thermique (chaud ou froid)	Modifications de la température du corps humain (parties internes et peau) et du débit cardiaque (volume de sang) dues aux conditions environnementales imposées et à l'activité de la personne, pouvant entraîner un inconfort, des problèmes de santé, des lésions aux organes, voire la mort.
Confort thermique	État d'esprit exprimant une satisfaction vis-à-vis de son environnement thermique (ASHRAE, 2017)
Température effective standard transitoire (t-SET), (°C)	Valeur SET évaluée à chaque intervalle de temps
Occupant jeune d'un bâtiment	Occupant adulte d'âge moyen (35 ans)

4 EFFETS DE LA CHALEUR SUR LA SANTÉ HUMAINE

Il a été démontré que l'exposition à la chaleur peut entraîner des maladies et des blessures, ou causer des lésions des tissus du corps humain (Yeo, 2004; SC, 2011; Parsons, 2014; EPA, 2016). Le corps humain maintient une température interne optimale de 37°C pour pouvoir réaliser ses fonctions physiologiques vitales. La combinaison des conditions thermiques environnementales imposées au corps humain et son niveau d'activité affectera la température du corps, et déclenchera en conséquence une réponse thermorégulatrice afin de le refroidir, en équilibrant les gains et les pertes de chaleur. Si le système thermorégulateur est surchargé par les conditions thermiques imposées, le corps humain souffrira alors de maladies plus ou moins graves en fonction du niveau de stress thermique. Les maladies liées à la chaleur apparaissent lorsque la température interne du corps est comprise entre 37°C et 40,6°C, les lésions ou la destruction des tissus surviennent à des températures internes encore supérieures (Yeo, 2004).

4.1 Réponse du corps à la chaleur

Le système physiologique du corps humain génère en continu de la chaleur métabolique afin de maintenir la température interne du corps dans une plage très serrée comprise entre 35°C et 41°C, autour d'une valeur neutre de 37°C (Periard et coll., 2015). L'excès de chaleur est dissipé dans l'environnement par la respiration, et dans le flux sanguin périphérique vers la peau. La surface de la peau échange avec l'environnement la chaleur transportée par le sang par rayonnement, convection et évaporation (sueur). Si la température du corps humain est supérieure à la valeur neutre, le système thermorégulateur fait appel à deux mécanismes pour dissiper la chaleur et refroidir le corps : (1) il augmente le flux sanguin périphérique en augmentant le débit cardiaque (débit sanguin cardiaque) et la vasodilatation des vaisseaux sanguins de la peau; et (2) il évacue de la sueur (eau et sel) à la surface de la peau pour le refroidissement par évaporation. Le premier mécanisme de refroidissement se déclenche lorsque les conditions thermiques environnementales sont proches des conditions neutres (légèrement chaud sur l'échelle du confort thermique) et que la température corporelle est comprise entre 36,8°C et 37,2°C (Rida et coll., 2014). Le deuxième mécanisme de refroidissement est le plus efficace; il se déclenche lorsque le premier mécanisme de refroidissement est insuffisant lorsque la température interne du corps est supérieure. L'efficacité de ce mécanisme de refroidissement peut cependant être compromise si le taux d'humidité relative ambiant et l'état de déshydratation du corps sont élevés. Dans des conditions chaudes et sèches, la chaleur peut facilement être extraite du corps à partir du sang, grâce au refroidissement par évaporation (sueur), jusqu'à atteindre le débit sudoral maximal des glandes sudoripares. La perte d'eau du corps par transpiration doit être compensée par un apport en liquide ou en électrolytes afin d'éviter la déshydratation. En cas de déshydratation du corps, le débit sanguin des muscles, le débit sudoral et la rétention de sels peuvent diminuer progressivement, entraînant une augmentation de la température corporelle et un risque de développement de maladies. Dans des conditions chaudes et humides, le refroidissement par évaporation de sueur peut être significativement réduit, et le corps peut ainsi accumuler de la chaleur, et le débit sanguin périphérique élevé vers la peau peut compromettre le débit sanguin et de nutriments vers d'autres organes vitaux du corps, entraînant éventuellement l'apparition

de maladies ou de lésions liées à la chaleur (SC, 2011). Le Tableau 1 résume les niveaux de température corporelle et les problèmes de santé associés.

Tableau 1. Température corporelle et problèmes de santé associés (Pisacane et coll., 2007)

Température corporelle (°C)	Problème de santé
> 44	Mort cérébrale certaine
41 – 44	Coup de chaleur
39 – 41	Épuisement par la chaleur
38 – 39	Crampes de chaleur, syncope due à la chaleur
36 – 38	Normal
35 – 36	Hypothermie légère avec frissons légers à importants
34 – 35	Hypothermie moyenne avec frissons intenses
32 – 34	Hypothermie sévère avec frissons violents
30 – 32	Hypothermie sévère sans frissons
28 – 30	Hypothermie sévère avec fibrillation cardiaque éventuelle
26 – 28	Hypothermie sévère avec mort éventuelle
< 26	Mort certaine

4.2 Adaptation à la chaleur

La capacité d'une personne à s'adapter à la chaleur est une défense naturelle importante permettant d'atténuer le risque de survenue d'une maladie liée à la chaleur. Dans des conditions naturelles, les personnes s'adaptent de manière à restaurer un confort thermique lorsqu'elles font face à un inconfort thermique, et ce grâce à plusieurs moyens d'adaptation, qui peuvent être physiologiques (acclimatation à la chaleur), comportementaux et psychologiques (Parsons, 2014).

L'**acclimatation à la chaleur** désigne l'adaptation physiologique en réponse à des expositions répétées à un environnement chaud sur une période de plusieurs semaines (SC, 2011; ISO, 2017), accroissant la capacité des personnes à devenir plus tolérantes aux températures plus élevées que dans des conditions neutres (Parsons, 2014). L'acclimatation implique diverses modifications physiologiques, comme l'abaissement du seuil de température corporelle pour la

transpiration et la circulation sanguine (la transpiration a par conséquent lieu plus tardivement), l'augmentation de la production de sueur diluée, la réduction du flux sanguin périphérique et la rétention du sel. L'acclimatation explique pourquoi les personnes vivant dans des climats chauds tolèrent des seuils de températures plus élevés que celles vivant dans des climats froids (Hajat et Kosatky, 2010; Basu, 2009). En outre, les événements de chaleur extrême (EHE) ont un impact plus important sur la population au début de l'été qu'en pleine période estivale, étant donné qu'un moins grand nombre de personnes s'est acclimaté au début de la saison chaude (Basu, 2009; SC, 2012).

L'**adaptation comportementale (ou physique)** est le moyen le plus efficace pour assurer la survie, maintenir un confort thermique et conserver le niveau de performance (Parsons, 2014). Elle suppose que les personnes modifient leur comportement ou leur environnement afin de réduire l'effet de la chaleur. On entend par modifications au niveau personnel et environnemental le fait de porter des vêtements plus légers, d'utiliser la climatisation, d'utiliser une ventilation (portable ou au plafond), d'ouvrir les fenêtres, de se déplacer afin d'éviter d'être directement exposé à la chaleur, ainsi que toute autre mesure similaire. L'adaptation comportementale est le principal facteur permettant de parvenir à un confort thermique adaptatif dans les bâtiments ventilés naturellement (Brager et de Dear, 1998).

L'**adaptation psychologique** fait référence à la perception altérée des et à la réaction aux informations sensorielles découlant d'une expérience acquise et d'attentes (Parsons, 2014). En d'autres termes, les personnes peuvent percevoir et réagir différemment aux conditions environnementales imposées, et leur adaptation physiologique et comportementale peut par conséquent différer. L'adaptation psychologique joue un rôle significatif dans les bâtiments ventilés naturellement où les occupants sont plus tolérants à la chaleur que ceux habitant des bâtiments climatisés (Brager et de Dear, 1998).

4.3 Maladies liées à la chaleur

Les maladies liées à la chaleur évoluent de la manière suivante : sensation d'inconfort thermique, stress thermique léger, syncope/crampes, épuisement par la chaleur, puis coup de chaleur, conduisant éventuellement au dysfonctionnement de certains organes (comme une insuffisance rénale) et enfin, dans certains cas, la mort. Les maladies liées à la chaleur sont causées par la déshydratation du corps, les pertes d'électrolytes (sel), et le dysfonctionnement du système thermorégulateur (Yeo, 2004).

La **syncope due à la chaleur** (à savoir l'évanouissement) correspond à une perte de conscience transitoire résultant d'une réduction du débit sanguin cérébral, généralement précédée d'une pâleur, d'un brouillage de la vision, d'étourdissements et de nausées. Elle peut survenir chez les personnes souffrant d'un stress thermique. La déshydratation légère, qui a lieu chez la plupart des personnes exposées à la chaleur, contribue au risque de syncope due à la chaleur. Les personnes souffrant de maladies cardiovasculaires ou non acclimatées à la chaleur sont prédisposées à une syncope due à la chaleur ou à un collapsus. Les victimes reprennent souvent conscience rapidement une fois étendues (Ogawa, 2021).

Les **crampes de chaleur (stress thermique léger)** sont causées par la perte de fluides et de sels due à une transpiration excessive prolongée. Elles s'accompagnent de crampes

musculaires douloureuses et de spasmes, alors que la température du corps augmente avec difficulté. L'arrêt de l'activité, l'ingestion d'une grande quantité d'eau et l'application d'une pression ferme sur les crampes musculaires, ou encore un massage doux, peuvent soulager les symptômes (EPA, 2006).

L'**épuiement par la chaleur** survient lorsque la température corporelle se situe entre 37°C et 40°C, et que le corps se déshydrate et qu'il ne peut plus dissiper de chaleur. Le système cardiovasculaire est incapable de répondre aux besoins de refroidissement de la surface de la peau et des muscles, du fait du plus faible volume sanguin. L'épuiement s'accompagne d'une transpiration importante, de fatigues et de faiblesses, d'étourdissements et d'une perte de connaissance, de nausées et de vomissements (Yeo, 2004; EPA, 2006; SC, 2011). L'ingestion d'eau avec des électrolytes et le refroidissement du corps peuvent soulager les symptômes (EPA, 2006). L'absence de traitement de l'épuiement par la chaleur entraînera un coup de chaleur.

Un **coup de chaleur** désigne un dysfonctionnement du système thermorégulateur, la température corporelle étant supérieure à 40,6°C (hyperthermie grave), et la peau devient chaude et sèche. Les symptômes rencontrés sont les suivants : maux de tête, confusion, nausées et étourdissements. Un coup de chaleur est considéré comme une urgence médicale grave, et nécessite un diagnostic rapide et un traitement puissant afin d'éviter la mort (Yeo, 2004; EPA, 2006). Dans une telle situation, le corps doit être immédiatement refroidi (p. ex., en plaçant la victime dans un lieu climatisé), et les mesures applicables en cas d'urgence médicale doivent être prises.

4.4 Prévention des maladies liées à la chaleur

Les mesures de prévention permettant d'éviter la survenue de maladies liées à la chaleur visent à réduire le risque de déshydratation du corps et empêcher l'augmentation de la température corporelle. Parmi elles, on peut citer :

- L'acclimatation à la chaleur afin d'augmenter la tolérance aux climats ou aux températures chaud(e)s. L'acclimatation à la chaleur peut être induite par l'exposition graduelle à un environnement chaud à la fin du printemps ou au début de l'été pendant plusieurs semaines. Le maintien d'une acclimatation complète au chaud nécessite une exposition à la chaleur trois à quatre fois par semaine (Nunneley, 2021);
- La réduction du niveau d'activité dans les environnements chauds ou par fortes températures, et en présence d'un taux d'humidité élevé;
- L'hydratation continue du corps en buvant suffisamment de liquide et d'électrolytes, comparable au niveau de transpiration. Une transpiration à raison de 1 à 2 litres/h est fréquente chez les adultes d'âge moyen. Il est conseillé aux personnes de ne pas attendre pour boire, sachant que la soif peut se manifester en cas de perte importante d'eau corporelle, pouvant aller jusqu'à 2 litres (Nunneley, 2021);
- Le port de vêtements appropriés à l'environnement et aux conditions chaudes. Les habits trop épais et insuffisamment perméables à l'air et à l'humidité réduisent les pertes de chaleur du corps, et augmentent par conséquent la température corporelle. Si une personne

sent qu'elle a trop chaud, le surplus de vêtements qu'elle porte doit être retiré, jusqu'à ce qu'elle retrouve un confort thermique.

4.5 Personnes vulnérables à la chaleur

Les personnes vulnérables à la chaleur constituent une catégorie de population plus sensible au stress thermique, ou dont la mobilité et la capacité économique à s'adapter à ou à atténuer les effets de la chaleur dans l'environnement auquel elles sont exposées est limitée (IOM, 2011). On distingue ainsi cinq catégories :

Les personnes âgées — Les personnes âgées désignent habituellement des personnes de plus de 65 ans. Au Canada, elles représentent environ 17 % de la population totale (Tableau 2). En raison des modifications physiologiques dues à l'âge, les personnes âgées sont les plus touchées par l'exposition aux chaleurs extrêmes (SC, 2011; Astrom et coll., 2011). Par rapport aux jeunes adultes en bonne santé, les personnes âgées ont une capacité réduite à s'acclimater à la chaleur, et sont moins sensibles à la chaleur et à la soif. En d'autres termes, elles présentent un taux de transpiration, un débit sanguin vers la peau et les extrémités du corps, un débit cardiaque (volume sanguin), une vasodilatation des vaisseaux sanguins et un taux métabolique inférieurs, mais leur température seuil de transpiration et leur indice de masse grasse sont supérieurs (Van Hoof et coll., 2017; Roelofsen, 2017). De ce fait, les personnes âgées peuvent accumuler la chaleur, augmentant ainsi la température corporelle et abaissant la température de la peau au niveau des extrémités, ce qui présente un risque plus élevé d'hyperthermie (Rida, 2014; Ma et coll., 2017). Des études montrent que les personnes âgées préfèrent les environnements plus chauds (+2°C) que les jeunes adultes afin de compenser leur taux métabolique inférieur et leur débit sanguin périphérique réduit (Van Hoof et coll., 2017; Schellen et coll., 2010; Parsons, 2014). Les personnes âgées peuvent également présenter une capacité et une mobilité moindres à adapter leur comportement aux conditions environnementales.

Enfants — Les bébés et enfants (< 15 ans) représentent environ 17 % de la population totale au Canada (Tableau 2). Ils constituent la deuxième catégorie de population vulnérable à l'exposition aux chaleurs extrêmes (Basu, 2009; Song, 2017). Le système thermorégulateur des enfants n'est pas entièrement développé comparé à celui des adultes. Les enfants ont de plus une capacité de sudation réduite. La température corporelle des enfants tend à être supérieure du fait de leur niveau d'activité (taux métabolique) et de leur rapport surface corporelle/masse corporelle plus élevés, ce qui les expose à des risques plus importants d'hyperthermie au cours de chaleurs extrêmes (SC, 2011). En outre, les bébés et jeunes enfants sont tributaires des parents pour s'adapter (p. ex., habillage, ingestion d'eau, ouverture des fenêtres) et modifier l'environnement proche pour réduire le risque d'exposition aux chaleurs extrêmes.

Personnes malades — L'impact de l'exposition aux chaleurs extrêmes sur la santé des personnes est d'autant plus important pour celles ayant des problèmes de santé ou encore celles qui prennent des médicaments perturbant le système thermorégulateur (p. ex., aspirine et médicaments psychotropes) ou altérant la rétention de sel et d'eau. Les maladies les plus courantes sont les maladies chroniques, cardiovasculaires, respiratoires, le diabète, l'obésité,

l'hypertension, le cancer, les maladies rénales, la pneumonie, la malnutrition, et autres (SC, 2011; Lavigne et coll., 2014; IOM, 2011).

Personnes à faible statut socioéconomique (SSE) — Ce groupe comprend les personnes démunies d'un point de vue social et matériel, à faibles revenus, à faible niveau d'études, ou présentant un handicap physique, ayant un accès réduit au transport, et vivant dans des logements non climatisés; les personnes isolées socialement comme les sans-abris, les personnes vivant seules, et celles ayant peu de contacts sociaux font également partie de ce groupe. Le facteur SSE a été la principale cause de mortalité en 1995 à Chicago (Kaiser et coll., 2007) et au cours des vagues de chaleur de 2003 en Europe (Robine et coll., 2008).

Personnes actives physiquement — Ce groupe comprend les personnes en bonne santé effectuant des activités extérieures comme celles travaillant à l'extérieur, les athlètes, les touristes et autres personnes actives. Leur niveau d'activité élevé (taux métabolique élevé) constitue un facteur de risque en cas d'exposition à des chaleurs extrêmes, étant donné qu'il compromet le débit sanguin à travers les muscles par rapport à celui nécessaire au refroidissement de la surface de la peau.

Tableau 2. Répartition de la population canadienne – Données du recensement 2016 (Source : StatCan, 2016)

Province et ville	Total	% ^(*)	0 – 14 ans	%	≥ 65 ans	%
Canada	35 151 730		5 839 570	17	5 935 635	17
Terre-Neuve-et-Labrador	519 715	1	74 440	0,2	101 025	0,3
St John's	205 955	40	32 460	6	30 555	6
Île-du-Prince-Édouard	142 905	0,4	22 685	0,1	27 715	0,1
Charlottetown	69 325	49	11 320	8	12 130	8
Nouvelle-Écosse	923 600	3	133 830	0,4	183 820	1
Halifax	403 390	44	60 535	7	63 170	7
Nouveau-Brunswick	747 100	2	110 495	0,3	148 785	0,4
Moncton	144 805	19	22 720	3	25 120	3
Québec	8 164 360	23	1 333 255	4	1 495 190	4
Montréal	4 098 925	50	691 350	8	671 690	8
Ontario	13 448 495	38	2 207 975	6	2 251 655	6
Ottawa	991 725	7	165 975	1	152 850	1
Toronto	5 928 040	44	985 615	7	858 580	6
Manitoba	1 278 365	4	243 825	1	198 965	1
Winnipeg	778 490	61	132 825	10	120 085	9
Saskatchewan	1 098 355	3	215 685	1	170 430	0,5
Saskatoon	295 095	27	55 695	5	37 900	3
Alberta	4 067 175	12	779 155	2	500 220	1
Calgary	1 392 610	34	261 455	6	153 005	4
Colombie-Britannique	4 648 055	13	691 385	2	848 990	2
Vancouver	2 463 430	53	362 110	8	387 315	8

^(*) Le pourcentage de la population provinciale est calculé par rapport à la population totale canadienne, alors que le pourcentage par ville l'est par rapport à la population totale de la province.

5 CONFORT THERMIQUE ET STRESS THERMIQUE

Les indices de confort et de stress thermique sont des métriques importantes de l'industrie, utilisés dans les espaces occupés dans le but de protéger la santé des personnes et d'optimiser leur performance et leur productivité. Le confort thermique est en fait un phénomène psychologique indirectement lié à l'environnement physique et à l'état physiologique de la personne (Parsons, 2014). L'ASHRAE (2017) définit le confort thermique comme « ***l'état d'esprit exprimant une satisfaction vis-à-vis de son environnement thermique*** ».

L'ASHRAE a développé l'échelle de sensation thermique afin de rapporter le confort thermique à l'environnement physique et à l'état physiologique. La sensation thermique indique la manière dont les personnes ressentent l'environnement thermique, en mettant en relation les informations sensorielles du corps humain et sa réponse physiologique. L'échelle de sensation thermique se compose de sept points : Très froid (-3), Froid (-2), Légèrement froid (-1), Neutre (0), Légèrement tiède (+1), Tiède (+2) et Chaud (+3). La sensation thermique représente des facteurs personnels (à savoir, le niveau d'activité et l'isolation vestimentaire) d'adultes d'âge moyen, et des facteurs environnementaux (à savoir la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse de l'air et l'humidité relative). On considère que si le confort thermique est maintenu autour de la neutralité thermique, celui-ci aura un effet minimum sur la santé des personnes (Parsons 2014).

Les données du confort thermique ont été élaborées pour un grand groupe de personnes de tout sexe et des adultes en bonne santé, sur la base d'études subjectives menées dans des laboratoires climatisés et des environnements où l'exposition à la chaleur et au froid est constante (Parsons, 2014). Après de nombreuses études réalisées sur le terrain dans des bâtiments réels, il a été constaté que les exigences de confort dans les espaces climatisés ne peuvent pas s'appliquer aux bâtiments non climatisés (évolution libre) ou ventilés naturellement. Dans de tels bâtiments, les personnes sont plus tolérantes aux températures plus élevées ou plus faibles, auxquelles elles se sont adaptées au cours d'exposition à long terme passées. Un autre indice du confort thermique a ainsi émergé, le confort thermique adaptatif. Le confort thermique adaptatif met en rapport la température effective de confort à la température moyenne de l'air mensuelle de l'environnement extérieur, uniquement. Les facteurs personnels et autres facteurs environnementaux sont censés être compris dans certaines plages typiquement trouvées dans les bâtiments étudiés.

Les données du confort thermique sont cependant axées sur la plage de confort voisine de la neutralité, la plage d'inconfort ne donnant que des indications sur le stress thermique ressenti par les personnes, mais ne fournissent aucune donnée sur la réponse physiologique en matière de température corporelle et de transpiration. Une troisième catégorie d'indices a été développée à partir d'études sur le stress thermique, qui couvre la plage d'inconfort avec problèmes de santé liés à la chaleur.

Dans les présentes lignes directrices, les deux principaux indices choisis sont le confort et le stress thermique. Le travail décrit dans ce document présente la manière dont ces indices ont été révisés et améliorés lorsqu'ils sont utilisés pour évaluer le risque de surchauffe au niveau des occupants du bâtiment au cours d'EHE.

5.1 Indices PMV-PPD

Fanger (1970) a développé l'indice PMV (vote moyen prévisible) qui se base sur de nombreuses études subjectives menées dans des espaces de laboratoire contrôlés. L'indice PMV précise la quantité de chaleur à ajouter à ou à retirer de la chaleur métabolique pour parvenir au confort thermique du corps tout entier. On entend par conditions de confort l'état physiologique du corps humain lorsqu'il se trouve face à un équilibre de chaleur constante avec l'environnement, et que la température corporelle et la transpiration moyennes sont comprises dans les limites de confort (Parsons, 2014). L'indice PMV tient compte de six facteurs personnels et environnementaux, et utilise l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE susmentionnée. Fanger (1970) a également développé l'indice PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits) et l'a associé à l'échelle PMV. Les conditions thermiques neutres PMV (-0,5 à +0,5) correspondent à un niveau de satisfaction de 80 % (ou à un PPD = 10 %). Les indices PMV-PPD sont les indicateurs de confort thermique les plus largement reconnus parmi les praticiens, et ont en outre été adoptés dans beaucoup de normes internationales (p. ex., ASHRAE 55- 2017; ISO 7730-2005; CSA Z412-17). De récentes études faisant appel à la Base de données II sur le confort thermique global (Global Thermal Comfort Database II) de l'ASHRAE ont cependant montré que la précision de l'indice du PMV n'est que de 34 % (ce qui signifie que 66 % des cas de l'indice PMV sont biaisés par rapport aux votes de sensation thermique mesurée ou observée) (Cheung et coll., 2019). L'indice PMV n'est fiable que pour la plage de confort (-0,5 à +0,5) dans des espaces climatisés. En outre, le PMV ne s'applique ni au confort des personnes qui dorment (ASHRAE, 2017), ni aux personnes âgées, en particulier dans les plages d'inconfort.

5.2 Confort thermique adaptatif

Le confort thermique adaptatif s'applique aux immeubles de bureaux non climatisés (évolution libre) ou ventilés naturellement, situés dans des lieux où la température moyenne mensuelle dominante de l'environnement extérieur varie entre 10°C et 33,5°C (ASHRAE, 2017). Dans ces bâtiments, on considère que les activités des occupants sont immobiles (taux métabolique compris entre 1 et 1,3 met), et qu'ils ont des possibilités d'adaptation comme changer d'habits (0,5 à 1 clo), ouvrir les fenêtres, utiliser des ventilateurs, se déplacer, ou adopter toute autre mesure de manière à s'adapter à leur environnement. Les températures effectives de confort dans ces bâtiments sont supérieures de quelques degrés Celsius à celles de bâtiments climatisés.

La Figure 1 illustre les températures effectives supérieures et inférieures de confort en fonction de la température moyenne mensuelle extérieure selon l'ASHRAE 55 (2017); ces valeurs sont résumées dans le Tableau 3 pour le mois de juillet et les principales villes canadiennes sélectionnées.

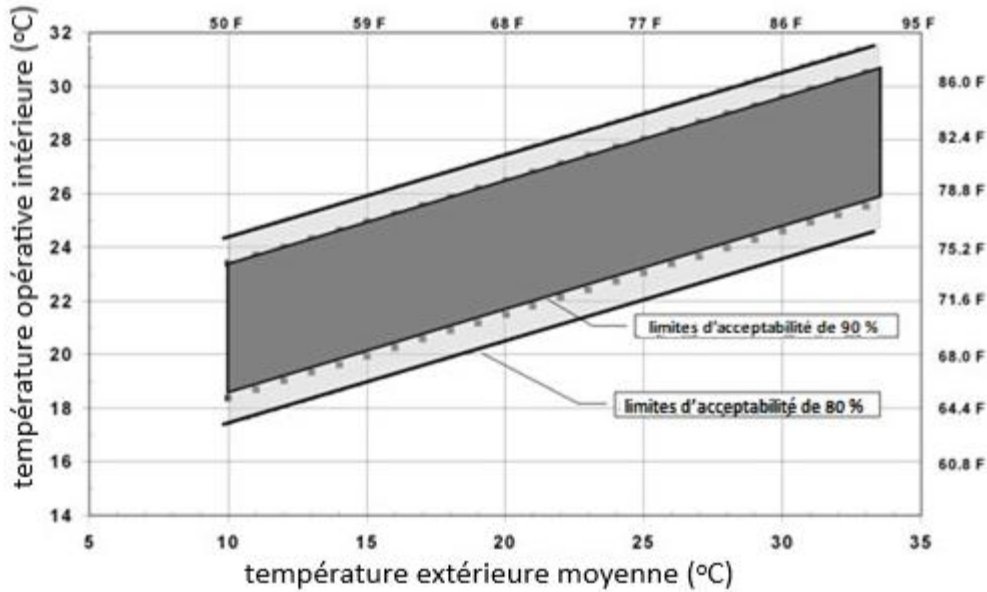


Figure 1. Température effective du confort thermique adaptatif selon la norme ASHRAE-55 dans des espaces intérieurs ventilés naturellement (avec la permission d’ASHRAE, 2017)

Tableau 3. Températures effectives de confort adaptatif ASHRAE-55 (2017) des villes canadiennes choisies pour le mois de juillet. Les températures extérieures moyennes mensuelles proviennent des données climatiques historiques de 1981 à 2010 d’ECCC (2018a)

Emplacement	Température extérieure moyenne du mois de juillet (°C)	ASHRAE-55 Température effective inférieure (°C)	ASHRAE-55 Température effective supérieure (°C)
St John’s (T.-N.-L.)	15,5	19,1	26,1
Charlottetown (Î.-P.-É.)	18,7	20,1	27,1
Halifax (N.-É.)	18,8	20,1	27,1
Moncton (N.-B.)	19,5	20,3	27,3
Montréal (QC)	21,2	20,9	27,9
Ottawa (ON)	21,2	20,9	27,9
Toronto (ON)	22,3	21,2	28,2
Winnipeg (MB)	19,7	20,4	27,4
Saskatoon (SK)	18,5	20,0	27,0
Calgary (AB)	16,5	19,4	26,4
Vancouver (C.-B.)	18,0	19,9	26,9

5.3 Température effective standard

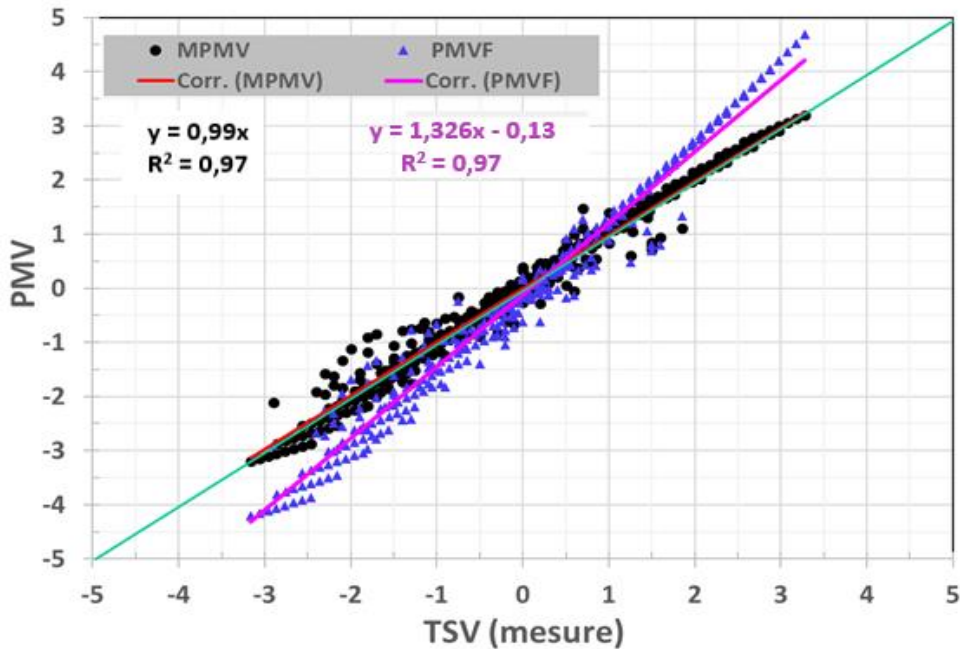
La température effective standard (SET) est à la fois un indice de confort et de stress thermique. La SET se définit comme la température d'air immobile d'un environnement intérieur imaginaire avec un taux d'humidité relative de 50 % et dont la température moyenne radiante est égale à la température de l'air, dans lequel un occupant imaginaire réalisant la même activité réelle et portant des habits normalisés pour le niveau d'activité présente une perte de chaleur cutanée, un stress de chaleur (température de la peau) et des contraintes thermiques (mouillure cutanée) identiques à ceux dans l'environnement réel (Parsons, 2014). La SET se calcule en utilisant le modèle de biothermique à deux nœuds de Gagge et coll. (1986). L'ASHRAE (2017) a adopté la SET pour le calcul du confort thermique en présence de vitesses d'air plus élevées que la limite maximale admissible du modèle PMV. Le Tableau 4 résume l'échelle de sensation thermique SET (à savoir de froid à très chaud) et l'état physiologique correspondant (Parsons, 2014). L'ASHRAE met à disposition un outil accessible en ligne pour calculer la SET (<https://comfort.cbe.berkeley.edu/>).

Tableau 4. Échelle de sensation thermique SET

SET (°C)	Sensation thermique	État physiologique
> 37,5	Très chaud	Dysfonctionnement de la thermorégulation
34,5 - 37,5	Chaud	Transpiration abondante
30,0 – 34,5	Tiède	Transpiration
25,6 – 30,0	Légèrement tiède	Transpiration légère, vasodilatation
22,2 – 25,6	Neutre	Neutre
17,5 – 22,2	Légèrement froid	Vasoconstriction
14,5 – 17,5	Frais	Léger refroidissement du corps
10,0 – 14,5	Froid	Frissons

5.4 Indices CNRC améliorés pour PMV et SET

Le CNRC a mis au point de nouvelles améliorations aux indices PMV et SET. Les améliorations de l'indice PMV incluent l'extension de l'indice PMV de Fanger afin de gérer les exigences de confort des jeunes et personnes âgées éveillés et endormis, sans limites en matière d'isolation vestimentaire, de taux métabolique, de température et d'humidité.



La

Figure 2 illustre une comparaison de l'indice PMV de Fanger et du nouvel indice amélioré (MPMV) avec les votes de sensation thermique mesurée dans des chambres climatiques, comme indiqué dans la documentation publique (des détails supplémentaires peuvent être trouvés dans Laouadi (2021)). La comparaison montre que l'indice PMV amélioré est plus précis, en particulier en ce qui concerne les niveaux de confort thermique au-dessus de la plage « Légèrement tiède » (> 0,5) ou en dessous de la plage « Légèrement froid » (< -0,5). Pour la plage neutre (-0,5 à +0,5), tous les indices sont comparables.

Pour l'amélioration du modèle SET chez les jeunes adultes, les modèles de transpiration, de débit sanguin cutané et de frissons du modèle à deux nœuds original de Gagge et coll. (1986) sont améliorés et validés à l'aide des données expérimentales rendues publiques (Ji et coll., 2021a). En outre, le modèle amélioré comprend un modèle simplifié pour la physiologie du sommeil (Laouadi et coll., 2020a). Pour les personnes âgées éveillées ou endormies, un nouveau modèle à deux nœuds a été élaboré et validé sur la base des données expérimentales publiquement disponibles. La

Figure 3 compare les températures corporelles et cutanées prévues par les nouveaux modèles chez les jeunes et les personnes âgées, et celles mesurées en laboratoire à une température de 36,5°C et avec une humidité relative de 60 % (Stapleton et coll., 2014). Les modèles améliorés démontrent une meilleure précision en termes de températures corporelles et cutanées par rapport au modèle d'origine de Gagge et coll. (1986). Il a été constaté que le modèle de Gagge et coll. (1986) pour les jeunes adultes surestimait le débit sanguin cutané et la température de la peau de plus d'1°C.

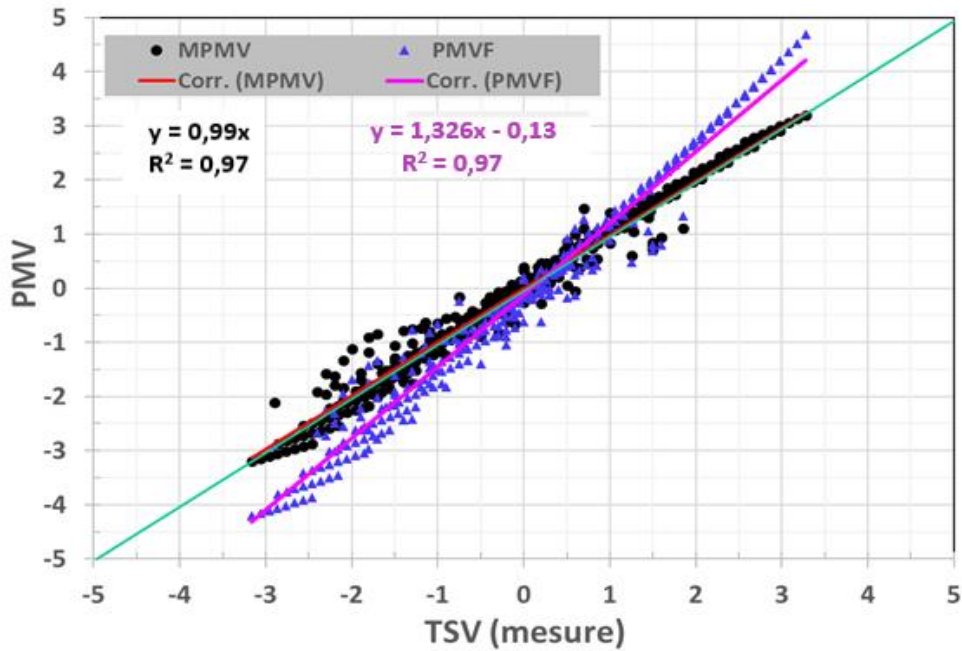


Figure 2. Comparaison de l'indice PMV de Fanger et du nouvel indice amélioré (MPMV) avec les votes de sensation thermique mesurés (TSV) dans des chambres climatiques (Laouadi, 2022)

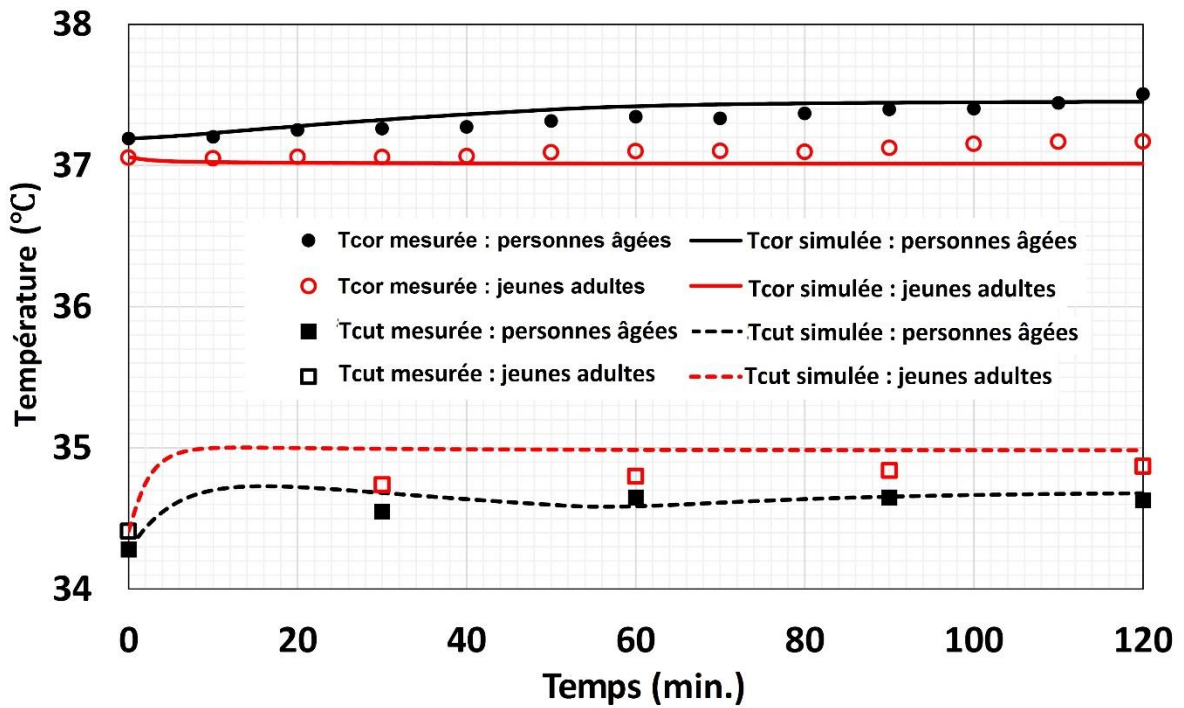


Figure 3. Comparaison des températures corporelles et cutanées des jeunes et personnes âgées avec les données de mesure de Stapleton et coll. (2014)

5.5 Exigences de confort des jeunes adultes

Les modèles améliorés des indices PMV et SET sont utilisés pour déterminer la zone de confort des jeunes adultes en position debout dans des conditions d'exposition intérieures types. La zone de confort thermique est définie comme suit : $-0,5 \leq PMV \leq 0,5$. Des simulations ont été réalisées pour couvrir les conditions intérieures avec des températures effectives de 18 à 40°C, une humidité relative de 30 à 80 %, une vitesse d'air de 0,1 à 0,5 m/s, un taux métabolique de 1 à 1,4 met (niveaux d'activité intérieur typiques), et une isolation vestimentaire de 0,5 à 1 clo (vêtements d'été typiques). La durée d'exposition est fixée à 3 heures. La Figure 4 illustre la zone de confort en termes de valeurs SET et MPMV. La zone de confort en termes de valeurs correspondantes de SET se situe entre 23°C et 27°C avec une valeur neutre de SET = 25°C (MPMV = 0).

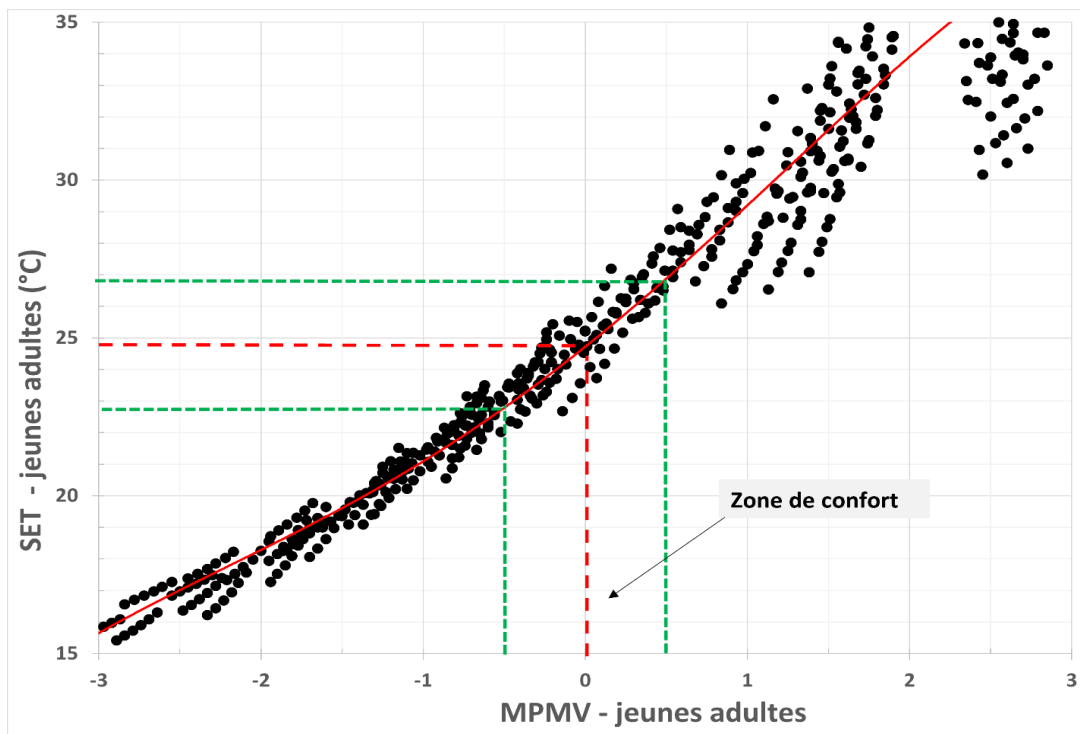


Figure 4. Zone de confort thermique des jeunes adultes (valeurs MPMV et SET)

5.6 Exigences de confort des personnes âgées

De la même manière que pour les jeunes adultes, des simulations ont été réalisées à l'aide des modèles à deux nœuds améliorés pour les jeunes et les personnes âgées afin de couvrir les conditions intérieures typiques vues précédemment. Deux taux métaboliques en activité ont été utilisés pour les personnes âgées : (1) les personnes âgées ayant un taux métabolique

identique à celui de jeunes adultes (mais présentant des températures seuils différentes pour la transpiration, le débit sanguin cutané, et les frissons), et (2) les personnes âgées ayant un taux métabolique inférieur (de 30 %). Ces deux taux figurent dans la littérature. Par exemple, Stapleton et coll. (2014) ont conclu que les personnes âgées avaient approximativement le même taux métabolique, alors que Tsuzuki et Ohkufu (2002) trouvaient une réduction de 30 % du taux métabolique dans un groupe étendu de personnes (109).

La Figure 5 illustre la zone de confort en termes de valeurs SET chez les jeunes (calculées chez de jeunes adultes) et de valeurs MPMV correspondantes pour les personnes âgées dans les mêmes conditions intérieures. Les personnes âgées ayant des taux métaboliques identiques à celui des jeunes adultes présentent sensiblement la même zone de confort thermique. Les valeurs de confort SET (jeunes) varient entre 23,25°C et 27°C, avec une valeur neutre de 25,25°C à un MPMV (personnes âgées) égal à 0. Ces valeurs sont cohérentes avec les conclusions expérimentales de Fanger, pour lesquelles le résultat des votes de sensation thermique de 118 personnes âgées ayant des taux métaboliques inférieurs (de 5 %) était similaire à celui de jeunes adultes dans des chambres climatiques (Fanger, 1970).

Cependant, pour les personnes âgées ayant des taux métaboliques inférieurs (de 30 %) par rapport aux jeunes adultes, leurs exigences en matière de confort thermique sont supérieures. Les valeurs de confort SET (jeunes) varient entre 26°C et 29°C, avec une valeur neutre de 27,5°C à un MPMV (personnes âgées) égal à 0, soit 2,5°C de plus que les jeunes adultes. Les personnes âgées nécessiteraient des températures plus chaudes pour atteindre un niveau de confort équivalent à celui des jeunes adultes. Cela est également conforme aux conclusions de Van Hoof et coll. (2017) et de Schellen et coll. (2010), à savoir que les personnes âgées préfèrent des environnements plus chauds (+2°C) par rapport aux jeunes adultes, afin de compenser leurs taux métaboliques inférieurs et leur débit sanguin cutané périphérique réduit.

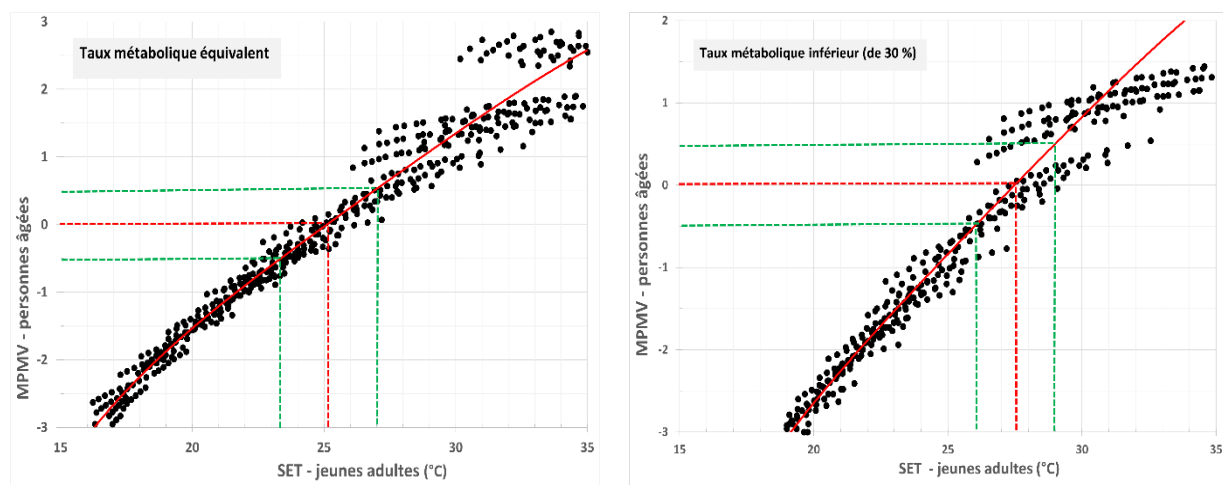


Figure 5. Zone de confort thermique des personnes âgées présentant un taux métabolique équivalent et inférieur de 30 % à celui des jeunes adultes

Les niveaux de confort en termes de PMV sont illustrés sur la Figure 6 pour les deux catégories de personnes âgées. Le résultat des votes de sensation thermique des personnes âgées ayant un taux métabolique équivalent à celui des jeunes adultes est identique à celui de ces derniers dans les mêmes conditions environnementales. Cela est cohérent avec les conclusions de Fanger (1970), de Soebarto et coll. (2019) et de Xiong et coll. (2019), comme illustré sur la figure. Cependant, les personnes âgées dont les taux métaboliques sont inférieurs à ceux des jeunes adultes ressentiraient une température légèrement plus fraîche (TSV jusqu'à - 1) que les jeunes adultes dans les mêmes conditions, ou les jeunes adultes ressentiraient une température légèrement plus chaude (TSV jusqu'à 0,75) que les personnes âgées. Cela est encore cohérent avec les conclusions de Tsuzuki et Ohfuko (2002) et de Schellen et coll. (2010), comme illustré sur la figure. Ces observations pourraient avoir des conséquences sur la santé dans des conditions d'exposition au froid. Si les exigences de confort thermique des jeunes adultes sont imposées aux personnes âgées, leur température corporelle diminuerait, ce qui les exposerait à un éventuel risque d'hypothermie, en particulier les personnes âgées à mobilité réduite et dont les possibilités d'adaptation pour restaurer le confort thermique sont limitées.

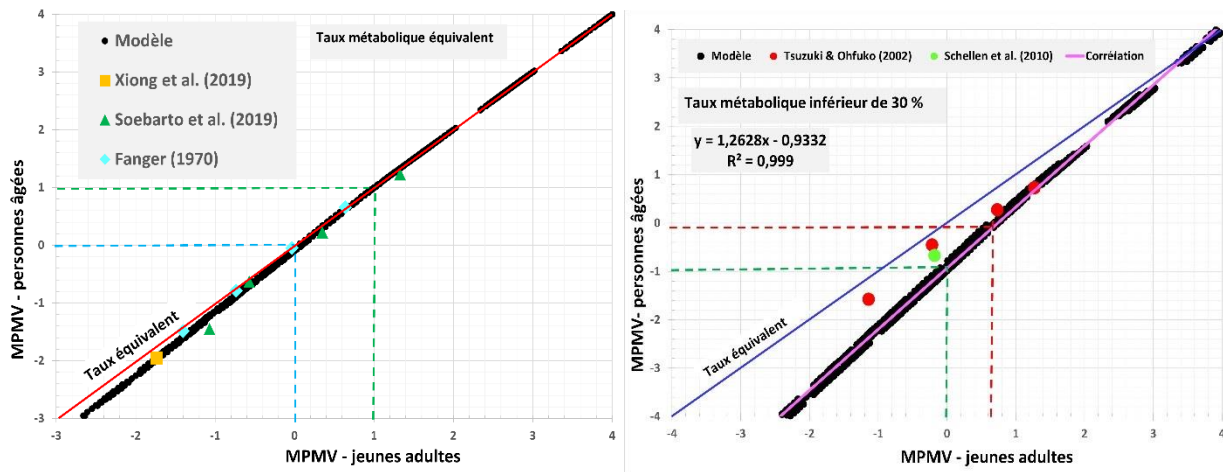


Figure 6. Relation entre les indices PMV pour les jeunes et les personnes âgées avec un taux métabolique équivalent ou inférieur de 30 %

5.7 Exigences de confort en matière de sommeil

Des études ont montré que les exigences de confort thermique dans les environnements de sommeil diffèrent de celles des lieux de travail (Lan et coll., 2017). Les personnes endormies ont un taux métabolique inférieur (de 30 %) à celui des personnes éveillées en position assise. En outre, le corps des personnes endormies sur un matelas est couvert pendant leur sommeil, augmentant de ce fait la valeur de l'isolation vestimentaire. L'isolation vestimentaire peut varier d'une saison à l'autre. En été, les valeurs d'isolation vestimentaire typiques peuvent varier de 1,38 clo (pyjama à manches courtes + matelas) à 1,6 clo (pyjamas à manches longues + dessus-de-lit + matelas) (Lin et Deng, 2008b). En hiver, ces valeurs peuvent être supérieures à 3,5 clo (pyjamas manches longues + dessus-de-lit + couette + matelas), voire plus. Du fait de leur taux métabolique inférieur, les personnes endormies préfèrent des environnements doux à tièdes par rapport aux personnes éveillées (Pan et coll., 2012; Lan et Lian, 2016; Lan et coll.,

2017; Ngarambe et coll., 2019). Les exigences de confort en matière de sommeil ne sont cependant couvertes dans aucune norme relative aux environnements construits.

Des modèles améliorés développés pour les indices PMV et SET ont été utilisés pour calculer les exigences de confort des personnes endormies. Le modèle de biothermique à deux nœuds pour la SET intègre un modèle simplifié pour le sommeil, comme indiqué par Laouadi et coll. (2020a). L'indice MPMV amélioré pour le sommeil est calculé en tenant compte de la température interne neutre du corps et de la température de la peau pour dormir, ainsi que du taux métabolique inférieur en dormant. Des simulations ont été réalisées pour couvrir les conditions intérieures typiques avec des températures effectives de 15 à 35°C, une humidité relative de 30 à 80 %, une vitesse d'air de 0,1 à 0,5 m/s, un taux métabolique pendant le sommeil des jeunes adultes de 0,7 met, et une isolation vestimentaire de 1,38 à 3,5 clo. La durée d'exposition a été fixée à sept heures.

La

Figure 7 illustre les exigences de confort en matière de sommeil en termes d'indice MPMV et les valeurs SET correspondantes calculées pour un jeune adulte éveillé, mais avec un taux métabolique équivalent à celui pendant le sommeil (0,7 met). Les données de mesure sur le confort pendant le sommeil provenant d'études publiques menées dans des chambres climatiques et des bâtiments réels sont indiquées sur la figure à des fins de comparaison. Le taux métabolique pendant le sommeil des personnes âgées a été fixé à une valeur moyenne de 0,56 met (soit 20 % de moins que celui des jeunes). La plage de la zone de confort pendant le sommeil est étendue, selon les conditions environnementales et l'isolation vestimentaire (ou la saison). Pour de jeunes adultes, les valeurs correspondantes de SET-Jeunes à MPMV = ± 0,5 varie entre 26,75°C et 31,5°C avec une valeur SET-Jeunes neutre moyenne de 29°C. Pour les personnes âgées, les valeurs correspondantes de SET-Jeunes à MPMV = ± 0,5 varie entre 28,5°C et 33,5°C avec une valeur SET-Jeunes neutre moyenne de 31°C. Les personnes âgées nécessiteraient donc des températures plus chaudes pour dormir que les jeunes adultes. Les prédictions du modèle sont conformes aux données publiées, tel que l'illustre la figure.

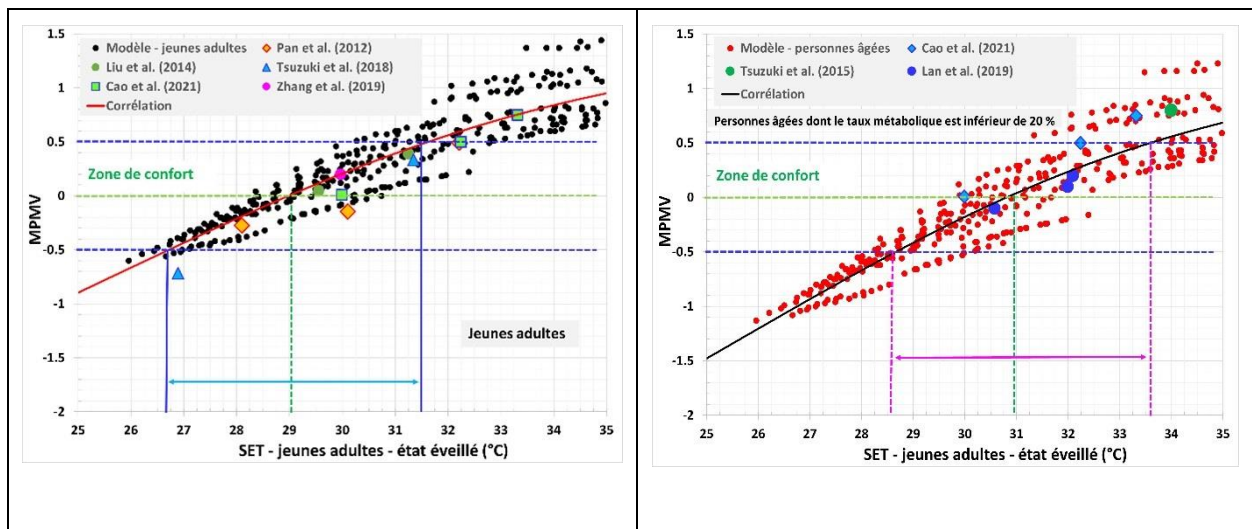


Figure 7. Exigences de confort pendant le sommeil des jeunes et des personnes âgées calculées en fonction de la SET pour de jeunes adultes éveillés mais avec un taux métabolique équivalent à celui pendant le sommeil (0,7 met). On considère que les personnes âgées endormies ont un taux métabolique inférieur de 20 % (0,56 met).

5.8 Niveau de stress thermique des jeunes et des personnes âgées

Les nouveaux modèles de biothermique développés pour les jeunes et les personnes âgées (Li et coll., 2021a,b) ont été utilisés pour prévoir les niveaux de stress thermique des jeunes et des personnes âgées dans les conditions intérieures typiques vues précédemment. Les niveaux de stress thermique sont indiqués par la température corporelle (T_{cr}) et la température cutanée (T_{sk}), l'échange de chaleur cutané par évaporation (sueur), convection et rayonnement (chaleur sèche) avec le milieu environnant, la mouillure cutanée (rapport entre perte de chaleur par évaporation cutanée et perte de chaleur par évaporation maximale), et la perte d'eau corporelle par transpiration et respiration. Des simulations ont été réalisées pour une durée d'exposition de 3 heures.

La Figure 8 compare les résultats obtenus pour de jeunes adultes et pour des personnes âgées ayant le même taux métabolique que les jeunes. Les données relatives à la température corporelle mesurée provenant d'études publiques sont également indiquées sur la figure à des fins de comparaison. Les conclusions sont les suivantes :

- Les personnes âgées présentent des températures corporelles supérieures (jusqu'à 0,5°C) et des températures corporelles légèrement inférieures ou égales dans des conditions d'exposition à des températures tièdes ou chaudes (> 30°C) par rapport aux jeunes adultes. Dans des conditions d'exposition à des températures fraîches ou froides (< 25°C), la température corporelle des personnes âgées est cependant supérieure (jusqu'à 0,75°C) pour des activités immobiles, du fait d'une vasoconstriction réduite (résultant d'un flux sanguin cutané supérieur), ou inférieure (jusqu'à 1,5°C) pour des activités non immobiles (taux métabolique > 1 met) du fait d'une vasodilatation réduite (résultant d'un flux sanguin cutané inférieur), par rapport aux jeunes adultes.
- Les pertes ou gains (valeurs négatives) de chaleur sèche cutané(e)s des personnes âgées dans des conditions d'exposition à des températures tièdes ou chaudes sont approximativement équivalent(e)s à ceux (celles) des jeunes adultes (la température corporelle étant à peu près égale). Cependant, la perte de chaleur par évaporation des personnes âgées est légèrement supérieure à celle des jeunes adultes dans des conditions d'exposition à des températures tièdes/chaudes, du fait de températures corporelles plus élevées qui déclenchent la sudation, mais est beaucoup plus importante dans des conditions d'exposition à des températures fraîches ou froides (< 25°C), en particulier à des niveaux d'activité supérieurs (> 1 met).
- La mouillure cutanée des personnes âgées est supérieure à celle des jeunes adultes, en particulier dans des conditions d'exposition à des températures fraîches/froides et à des niveaux d'activité élevés.

- La perte d'eau corporelle (pendant une durée d'exposition de 3 heures) par transpiration et respiration est approximativement égale à celle dans des conditions d'exposition à des températures tièdes (autour de 30°C), mais devient bien inférieure dans des conditions d'exposition à des températures chaudes (> 35°C) du fait de la réduction de la transpiration chez les personnes âgées.

La Figure 9 compare les résultats obtenus pour de jeunes adultes et pour des personnes âgées ayant un taux métabolique inférieur de 30 % par rapport à celui de jeunes adultes. Les données relatives à la température corporelle mesurée provenant d'études publiques sont également indiquées sur la figure à des fins de comparaison. Les conclusions sont les suivantes :

- Dans des conditions d'exposition à des températures tièdes ou chaudes (> 30°C), la température interne du corps des personnes âgées est supérieure (jusqu'à 0,3°C) au début de la vasodilatation des vaisseaux sanguins de la peau et de la transpiration (T_{cr} autour de 37°C), mais diminue (jusqu'à 0,3°C) au cours de la transpiration. Dans des conditions d'exposition à des températures fraîches ou froides, la température corporelle des personnes âgées diminue (jusqu'à 0,4°C) par rapport à celle de jeunes adultes. La température du corps des personnes âgées est systématiquement inférieure (jusqu'à 2°C) à celle de jeunes adultes dans des conditions d'exposition à des températures tièdes ou chaudes, mais supérieure (jusqu'à 0,5°C) dans des conditions d'exposition à des températures fraîches ou froides.
- Les pertes (ou les gains à des températures ambiantes supérieures) de chaleur sèche cutané(e)s des personnes âgées dans des conditions d'exposition à des températures tièdes ou chaudes sont inférieures (ou supérieures) à celles (ceux) de jeunes adultes, selon les conditions intérieures. Les pertes de chaleur par évaporation cutanée des personnes âgées sont largement inférieures à celles des jeunes adultes du fait de leur transpiration réduite, et des températures corporelle et cutanée inférieures, qui déclenchent la transpiration.
- La mouillure cutanée des personnes âgées est très inférieure à celle des jeunes adultes.
- Les pertes d'eau corporelles (pour une durée d'exposition de 3 heures) par transpiration et respiration dans des conditions d'exposition à des températures tièdes et chaudes sont nettement inférieures.

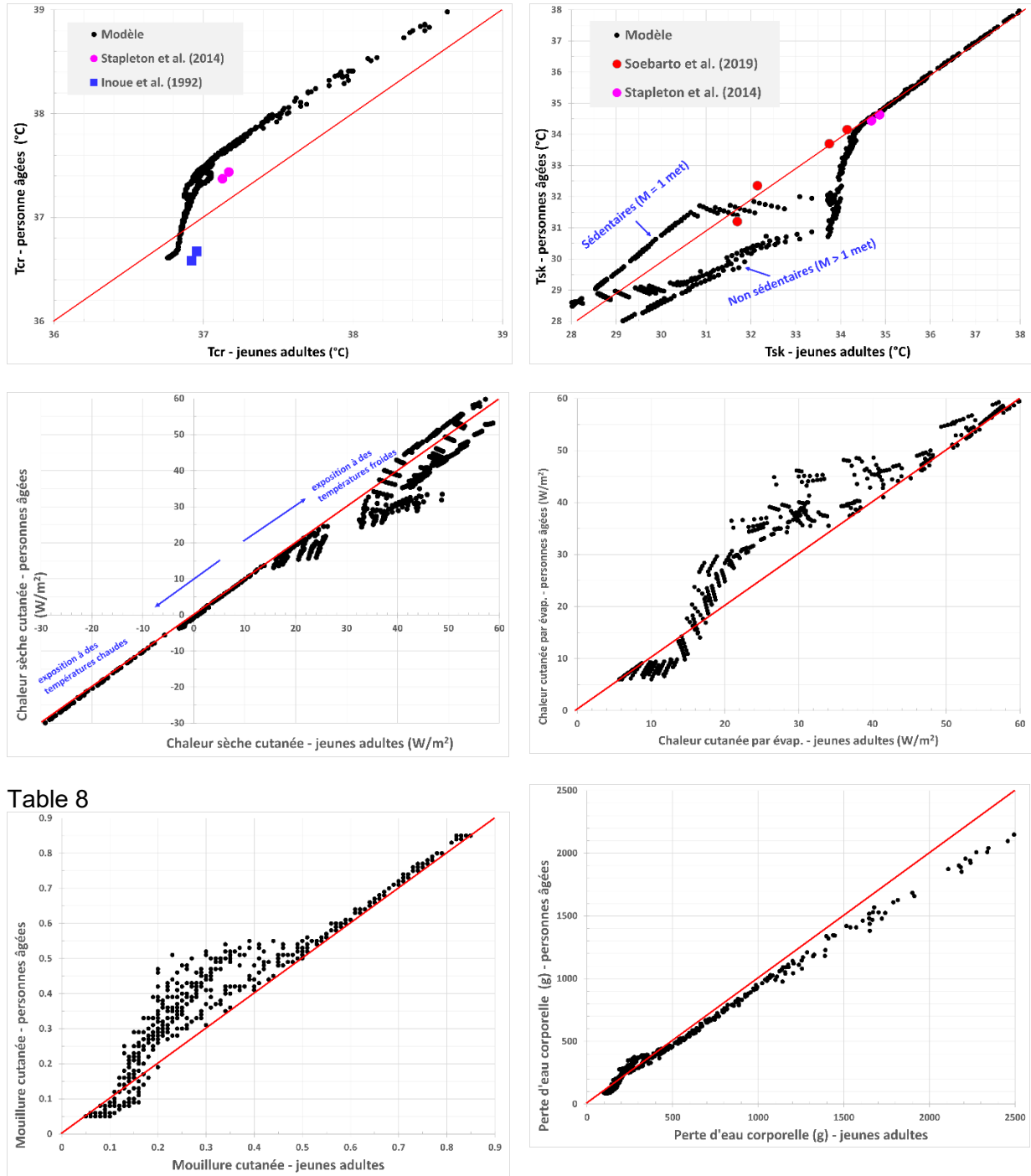


Figure 8. Comparaison des températures corporelle et cutanée, des échanges de chaleur sèche et par évaporation de la peau, de la mouillure cutanée et de la perte d'eau corporelle (sur une durée de 3 heures) de personnes âgées par rapport à des jeunes dans des conditions intérieures typiques, en considérant que le taux métabolique des personnes âgées est identique à celui des jeunes.

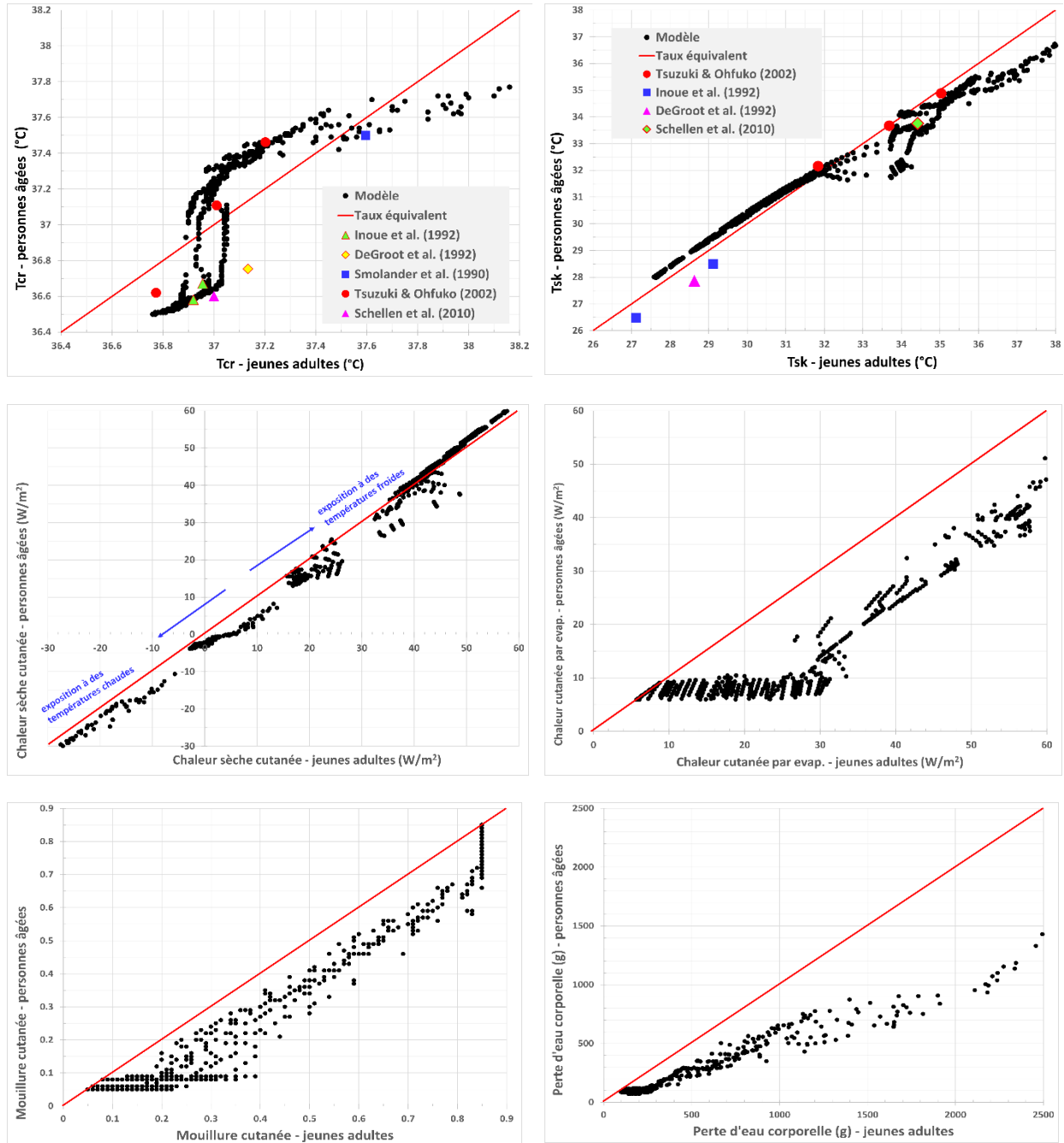


Figure 9. Comparaison des températures corporelle et cutanée, des échanges de chaleur sèche et par évaporation de la peau, de la mouillure cutanée et de la perte d'eau corporelle (sur une durée de 3 heures) de personnes âgées par rapport à des jeunes dans des conditions intérieures typiques, en considérant que le taux métabolique des personnes âgées est inférieur de 30 % à celui des jeunes.

6 SURCHAUFFE DANS LES BÂTIMENTS

6.1 Introduction

Le phénomène de surchauffe dans les bâtiments survenant lors d'événements de chaleur extrême (EHE) dans les climats locaux constitue un problème de santé de plus en plus important dans de nombreux pays (SC, 2011; CIBSE, 2013; Saman et coll., 2013; Quinn et coll., 2014; Eames, 2016). De manière générale, la surchauffe affecte le confort thermique et la santé des occupants d'un bâtiment exposés à des conditions intérieures tièdes ou chaudes quotidiennes. Une surchauffe peut survenir dans des bâtiments non climatisés (évolution libre) ou ventilés naturellement, des bâtiments à capacité de climatisation limitée ou dont la climatisation est intermittente, ainsi que des bâtiments touchés par des pannes de courant ou des défaillances au niveau des systèmes CVCA. Dans ces bâtiments, les conditions intérieures résultent des conditions extérieures. Les conditions intérieures peuvent cependant être altérées par la construction du bâtiment elle-même (p. ex., niveaux d'isolation des enveloppes, taux de fuite d'air, fenêtres, et autres facteurs pertinents), et le fonctionnement des systèmes CVCA (à savoir des systèmes de climatisation et de ventilation). En outre, le comportement des occupants (p. ex., habillement approprié, utilisation de ventilateurs, ouverture des fenêtres, etc.) et l'adaptation aux climats chauds peuvent énormément influencer la sensation de surchauffe. La persistance de conditions intérieures à température tiède ou chaude plusieurs jours successifs peut affaiblir le système physiologique du corps humain, et par conséquent conduire à de graves troubles de santé, voire la mort, en particulier chez les occupants vulnérables à la chaleur. Pour réduire ces effets sur la santé des occupants, les bâtiments doivent être conçus, ou modernisés, et fonctionner de manière à atténuer le risque de surchauffe dans de telles conditions climatiques extrêmes. Les sections suivantes présentent une méthodologie permettant d'évaluer le risque de surchauffe dans les bâtiments.

6.2 Définition de la surchauffe

Il n'existe aucune définition universelle ou convenue de la surchauffe dans les bâtiments (Anderson et coll., 2013; ZCH, 2016). Dans le contexte des présentes lignes directrices, la surchauffe est définie comme suit :

Effet cumulatif sur le confort thermique (ou le stress thermique) et la santé des occupants d'un bâtiment directement exposés à des événements de chaleur intérieurs quotidiens en continu.

Un événement de chaleur intérieur quotidien se définit ainsi :

Événement de chaleur intérieur avec des températures chaudes qui survient quotidiennement pendant au moins un nombre d'heures déterminé au cours de la journée, et qui déclenche une réponse physiologique et une action des occupants afin de retrouver un confort thermique.

Une réponse physiologique se déclenche lorsque les conditions intérieures excèdent les conditions de confort neutre, et si la restauration du confort thermique est possible lorsque les conditions intérieures atteignent certaines valeurs seuils dans la plage d'inconfort. Le choix de ces valeurs seuils est abordé dans la section suivante.

Dans certains environnements construits, le confort est à la fois nécessaire pour les occupants actifs au cours de la journée, et également pour dormir au cours de la nuit. Le sommeil est régulé par un mécanisme physiologique différent, mais l'exposition à des températures tièdes ou chaudes au cours de la nuit peut perturber voire empêcher le sommeil. La perturbation du sommeil aura à son tour des conséquences sur la réponse physiologique des occupants en cas de vague de chaleur le lendemain (CIBSE, 2015; NASEM, 2016; Kenny et coll., 2018). Si cet effet cumulatif se poursuit les jours suivants, il engendrera éventuellement des problèmes de santé pour les occupants. Il nécessite par conséquent que les occupants du bâtiment soient « connectés » avec les espaces qu'ils occupent au cours des événements de chaleur extrême.

La surchauffe, telle que définie dans les présentes lignes directrices, est axée sur les occupants et leurs espaces connectés au cours des événements de chaleur extrême. Les espaces occupés peuvent par conséquent être dynamiques au cours d'une journée. Cela reflète les différentes situations au cours desquelles les occupants peuvent s'adapter à la chaleur en se déplaçant d'un espace chaud à un espace plus frais, ou en réalisant des activités dans un espace donné au cours de la journée, puis en changeant d'espace pour dormir au cours de la nuit. Ce traitement de la surchauffe diffère de l'évaluation de la surchauffe dans des espaces déterminés et non connectés aux occupants au cours de l'exposition à des événements de chaleur. Dans les bâtiments résidentiels par exemple, l'évaluation de la surchauffe des salles de séjour ne tiendra pas compte de l'effet cumulatif de la chaleur sur les occupants qui y vivent le jour, et qui dorment dans les chambres la nuit. De la même manière, l'évaluation de la surchauffe des chambres ne couvre que la perturbation du sommeil, mais ne prend pas en compte l'effet de la chaleur sur les occupants au cours de l'exposition pendant la journée.

L'évaluation de la surchauffe nécessite un indicateur du confort thermique ou du stress thermique. Dans le présent document, l'indice de température effective standard transitoire (noté t-SET, calculé à chaque intervalle de temps par opposition à SET, calculé à la fin de la durée d'exposition) est utilisé et calculé à l'aide des modèles physiologiques développés pour les jeunes et les personnes âgées (Ji et coll., 2021a,b)), comme précisé dans les sections précédentes. Au cours d'une exposition à des événements de chaleur intérieurs en continu d'une durée N (jours) où les occupants peuvent se trouver dans plusieurs espaces dans lesquels ils réalisent des activités la journée, et dans un autre espace pour dormir la nuit, l'amplitude de la surchauffe (notée SETH) s'exprime par la relation suivante (Laouadi et coll., 2020b) :

$$SETH = \sum_{i=1}^N (SETH_n + SETH_d)_i \quad (1)$$

avec :

$$SETH_n = \sum_{sleep}^{wakeup} (t-SET_\tau - SET_n)^+ \cdot \Delta\tau \quad (2)$$

$$SETH_d = \sum_{wakeup}^{sleep} (t-SET_\tau - SET_d)^+ \cdot \Delta\tau \quad (3)$$

où :

$t\text{-SET}_\tau$: valeur horaire de t-SET de l'espace occupé à l'heure (τ) au cours de la journée ou de la nuit ($^{\circ}\text{C}$);

SET_n : valeur seuil de SET pour un occupant dormant pendant la nuit ($^{\circ}\text{C}$);

SET_d : valeur seuil de SET pour un occupant (éveillé) actif au cours de la journée ($^{\circ}\text{C}$);

SETH_d : amplitude d'un événement de chaleur survenant pendant la journée ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$);

SETH_d : amplitude d'un événement de chaleur survenant au cours de la période de nuit précédente ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$);

SETH : amplitude d'une surchauffe ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$);

$\Delta\tau$: intervalle de temps de calcul (h).

Le symbole (*) dans les équations (2) et (3) indique que seules les valeurs positives sont prises en compte.

L'équation (1) distingue plusieurs types d'événements de chaleur intérieurs avec différentes amplitudes et durées sur une période estivale. Un événement de chaleur intérieur quotidien n'est compté que si son amplitude diurne (SETH_d) excède une valeur minimale arbitraire ($\text{SETH}_{d,\text{min}}$). Cette dernière doit être une fonction de la valeur seuil sélectionnée de SET_d . Une valeur élevée $\text{SETH}_{d,\text{min}}$ peut être choisie pour des valeurs faibles de SET_d , ou vice-versa. Dans ces lignes directrices, $\text{SETH}_{d,\text{min}}$ est fixée à $4^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ afin de limiter le pourcentage en perte d'eau corporelle par transpiration et respiration à moins d'1 % (la limite maximale admissible est de 3 % selon la norme ISO (2018)) lorsque les occupants sont exposés à des conditions intérieures avec une valeur t-SET d'un degré au-dessus de la valeur seuil SET_d pendant quatre heures. L'amplitude de la nuit précédente (SETH_n) est prise en compte dans l'équation (1) uniquement si l'amplitude de la journée (SETH_d) excède $\text{SETH}_{d,\text{min}}$. En d'autres termes, la perturbation du sommeil au cours de la nuit précédente n'affecte que les occupants actifs soumis à un stress thermique le jour. Plusieurs événements de chaleur intérieurs en continu sont séparés par une période de récupération d'au moins une journée avec $\text{SETH}_d \leq \text{SETH}_{d,\text{min}}$.

L'évaluation des équations (1) à (3) requiert des occupants de référence subissant les événements de chaleur intérieurs. De plus, les expositions de jour et de nuit doivent être clairement définies en termes d'horaires. L'occupant de référence peut varier selon l'environnement construit qu'il occupe au cours des événements de chaleur. Pour les bâtiments résidentiels, l'occupant de référence est considéré comme étant en position assise immobile (taux métabolique de 1 met) et portant des vêtements d'été typiques (0,5 clo) au cours de l'exposition diurne. Au cours de l'exposition de nuit, l'occupant de référence est considéré comme étant endormi (taux métabolique de 0,7 met pour les jeunes adultes en bonne santé), portant un haut à manches courtes et un pyjama comme bas, et allongé sur un matelas (isolation vestimentaire totale de 1,38 clo selon Lin et Deng, 2008b). Les horaires des expositions de jour et de nuit dépendent également du type de bâtiment. Pour des bâtiments résidentiels, l'exposition de nuit est considérée être entre l'heure de début du sommeil (22 h 00) et l'heure de réveil (7 h 00). La journée commence alors à l'heure du réveil, et se termine à l'heure de début du sommeil. Pour les bureaux et bâtiments scolaires, les horaires de la

journée chevauchent ceux des heures de travail, comme indiqué dans les codes du bâtiment applicables. Il convient de noter que dans le contexte de la surchauffe, une journée complète d'exposition commence à l'heure de début du sommeil de la nuit précédente et se termine à l'heure de début du sommeil de la journée en cours.

Les espaces à l'intérieur d'un bâtiment occupés au cours de la journée et/ou de la nuit varient d'un bâtiment à l'autre. En ce qui concerne les bâtiments résidentiels, tels que les logements et suites dans des bâtiments résidentiels à logements multiples, on considère que les occupants vivent soit dans les salles de séjour (ou dans des pièces climatisées dédiées, le cas échéant) au cours du jour, soit dans les chambres au cours de la nuit. Ces espaces (salles de séjour, pièces climatisées dédiées, chambres) doivent figurer en tant que zones thermiques séparées dans toute étude sur le terrain ou de simulation, afin de pouvoir appliquer les équations (1) à (3) pour analyser le risque de surchauffe. Les conditions intérieures des salles de séjour (ou pièces climatisées dédiées) sont associées à une exposition de jour, et celles des chambres à une exposition de nuit afin de calculer les valeurs horaires de t-SET. Pour les bureaux et bâtiments scolaires, les espaces ne sont occupés qu'au cours de la journée, l'équation (2) ne s'applique donc pas. Pour les autres bâtiments dans lesquels les occupants vivent dans un espace unique pendant toute la journée (chambre de patient dans les hôpitaux), les deux équations (2) et (3) s'appliquent.

6.3 Caractérisation des événements de surchauffe

Comme indiqué précédemment, un **événement de surchauffe consiste en un nombre d'événements de chaleur intérieurs quotidiens en continu**. Plusieurs événements de surchauffe devraient par conséquent avoir lieu au cours de la période estivale. Ces événements de surchauffe multiples se distinguent les uns des autres par leurs caractéristiques, qui peuvent se définir ainsi :

Durée : mesurée en fonction du nombre de jours d'événements de chaleur intérieurs quotidiens en continu.

Gravité : mesurée en °C·h, et indique l'amplitude de l'événement de surchauffe, donnée par l'équation (1). La gravité tient compte du niveau de stress thermique (écart de t-SET par rapport à la valeur seuil) et de la durée d'exposition de l'événement de surchauffe.

Intensité : mesurée en °C et calculée comme le rapport entre la gravité et la durée (exprimée en heures). L'intensité indique l'écart moyen de t-SET par rapport aux valeurs seuils sur toute la durée d'un événement de surchauffe.

Selon ces caractéristiques, plusieurs types d'événements de surchauffe peuvent survenir au cours de l'été. On peut distinguer trois principaux types : longs, intenses et graves. Les événements de surchauffe longs sont généralement bénins, et les événements de surchauffe intenses surviennent habituellement pendant de courtes périodes. Les événements de surchauffe graves varient entre événements de surchauffe longs à intenses. D'autres types d'événements de surchauffe comme longs et intenses, longs et graves, ou encore intenses et graves peuvent très bien survenir. Ces types d'événements de surchauffe peuvent avoir des impacts différents sur le confort et la santé des occupants d'un bâtiment. Par exemple, les

événements de surchauffe longs ou graves peuvent entraîner une déshydratation corporelle (perte d'eau corporelle par transpiration) alors que les événements de surchauffe intenses peuvent conduire à l'hyperthermie (augmentation rapide de la température interne au-dessus de 38°C), qui risque de causer de graves problèmes de santé comme un coup de chaleur, voire la mort. Ces types d'événements de surchauffe doivent par conséquent être impérativement distingués en été lors d'une analyse du risque de surchauffe.

6.4 Choix des valeurs seuils

Les valeurs seuils de t-SET pour les occupants endormis et actifs (éveillés) (SET_n , SET_d) au cours d'une exposition de nuit et de jour, respectivement, sont choisies en fonction du type de bâtiment et de la vulnérabilité des occupants, de manière à s'assurer que leur santé ne soit pas affectée par l'exposition à des événements de chaleur intérieurs. Des études de mortalité ont montré qu'un taux de mortalité quotidien excessif survenait lorsque les températures maximales extérieures se trouvaient à la limite entre le confort et l'inconfort thermique (25 à 28°C), en particulier au cours d'étés tempérés (Casati et coll., 2013). De ce fait, la sélection des valeurs seuils de t-SET doit tenir compte d'un critère fondamental, à savoir qu'elles ne doivent pas se trouver dans la plage d'inconfort thermique, qui entraînerait des effets irréversibles sur la santé. Par exemple, la plage d'inconfort qui induit une transpiration excessive est source de problèmes de santé (p. ex., syncope due à la chaleur, épuisement par la chaleur, déshydratation, etc.) qui ne peuvent pas être éliminés par de simples mesures d'adaptation, comme le changement de vêtements, la réduction du niveau d'activité, l'installation de ventilateurs portables, l'ouverture des fenêtres, et autres actions similaires permettant de réduire la transpiration. À cet effet, la plage d'inconfort à sélectionner est celle qui est tolérable par la plupart des occupants en bonne santé, et pour laquelle lesdits occupants peuvent rétablir un confort thermique par de simples mesures d'adaptation mises à leur disposition. Cette plage d'inconfort correspond à la plage légèrement tiède (transpiration légère) (mouillure cutanée < 30 %) lorsque les occupants sont actifs au cours de la journée. La valeur de SET_d correspondante est de 30°C (Parsons, 2014) pour des occupants jeunes en bonne santé et non acclimatés, libres de s'adapter à la chaleur (changement de vêtements, déplacement d'un espace plus chaud vers un espace plus frais, ouverture des fenêtres pour assurer la ventilation de l'espace, activation de ventilateurs de plafond ou portables, prise d'une douche fraîche, ingestion de denrées froides (boissons fraîches ou glace pilée, etc.)) afin de restaurer le confort thermique, ou de 31,2°C pour des occupants acclimatés à la chaleur naturelle (Laouadi et coll., 2020b). La valeur de SET_d (30°C) pour les occupants non acclimatés est proche de la valeur moyenne mesurée de $SET = 29,3^\circ\text{C}$ (25,9 à 32,8°C) à laquelle les occupants commencent à ressentir une chaleur excessive et à modifier les conditions ambiantes afin de retrouver un confort thermique (Meinke et coll., 2017). Zhang et coll. (2016) ont trouvé que la valeur SET des occupants acclimatés vivant dans des zones chaudes rurales correspondant à une sensation légèrement tiède ($PMV = 1$) est de 31,18°C, ce qui est très proche de la valeur susmentionnée de 31,2°C. Pour de jeunes adultes en bonne santé mais dont les possibilités d'adaptation à la chaleur sont limitées, la valeur seuil de SET_d (pour un occupant actif) est fixée de manière à ce que la transpiration soit minimisée. Cela correspond à la limite supérieure de la plage de confort avec $SET_d = 27^\circ\text{C}$ pour des occupants non acclimatés (Figure 4) et 28,2°C pour des occupants acclimatés. Il convient de

noter que la valeur SET_d pour des occupants acclimatés se trouve dans la plage de confort de $SET = 26,7 \pm 1,4^\circ\text{C}$ pour des occupants acclimatés urbains vivant dans des bâtiments ventilés naturellement (Zhang et coll., 2016).

Les personnes âgées sont moins sensibles à la chaleur étant donné que leur température corporelle est supérieure à celle des jeunes adultes dans des conditions d'exposition à des températures tièdes (Figures 8 et 9). Ainsi, pour protéger la santé de ces personnes vulnérables, les valeurs seuils de SET_d doivent être choisies de manière à éviter toute augmentation significative de leur température corporelle et de la fréquence cardiaque requise pour l'augmentation du débit sanguin cutané. En ce qui concerne les personnes âgées en bonne santé pouvant s'adapter à la chaleur, les résultats de la Section 5 sont utilisés. La valeur seuil SET_d est fixée à la limite supérieure de la plage de confort ($PMV = 0,5$). Pour les personnes âgées présentant une réduction moyenne de leur taux métabolique (de 20 % inférieur à celui de jeunes adultes), la valeur SET_d correspondante est déterminée à partir de la Figure 5 avec $SET_d = 28^\circ\text{C}$ ($29,2^\circ\text{C}$ pour les occupants acclimatés). La valeur seuil de SET_d est fixée de manière à ce que la transpiration soit minimisée ($PMV = 0$) dans le cas des personnes âgées dont les possibilités d'adaptation à la chaleur sont limitées. La valeur seuil correspondante de SET_d est de $26,5^\circ\text{C}$ ($27,7^\circ\text{C}$ pour les occupants acclimatés).

Les valeurs seuils de SET_n pour le confort de sommeil sont fixées à la valeur moyenne correspondant à $PMV = 0$ et $0,5$. D'après la Figure 7, les valeurs seuils correspondantes de SET_n des jeunes et des personnes âgées sont respectivement de 30°C et de 32°C .

Le Tableau 5 énumère les valeurs seuils suggérées de SET pour les différents types de bâtiments en évolution libre ou partiellement climatisés avec des occupants jeunes et âgés, avec ou sans possibilités d'adaptation à la chaleur. Pour les écoles secondaires, les occupants (adolescents) sont considérés comme de jeunes adultes, mais avec un taux métabolique supérieur (de 10 %). Pour les écoles primaires, les élèves (âgés de moins de 12 ans) sont considérés comme ayant un taux métabolique supérieur (de 10 %; Smith, 2019) à celui des jeunes adultes, mais avec des valeurs seuils de SET inférieures afin de limiter le confort thermique à $PMV = 0,5$, étant donné que leur capacité à transpirer est limitée et que leur température corporelle est supérieure à celle des jeunes adultes (Smith, 2019). Dans les maisons de retraite, les occupants sont considérés comme nécessitant un soutien (style de vie autonome). Pour protéger leur santé dépendante à la chaleur, les valeurs seuils correspondantes de SET sont fixées à la limite du confort thermique ($PMV = 0,5$). Pour les maisons de soins de longue durée (SLD), les occupants sont considérés comme des personnes âgées nécessitant un soutien permanent (style de vie avec assistance ou avec soins). Pour protéger leur santé dépendante à la chaleur, les valeurs seuils correspondantes de SET sont fixées à la limite du confort thermique ($PMV = 0$). Pour les chambres de patient (dans les hôpitaux), les occupants sont considérés comme restant au lit toute la journée, et les valeurs seuils correspondantes de SET sont fixées à la limite du confort thermique ($PMV = 0$).

Tableau 5. Valeurs seuils suggérées de SET_a et SET_n pour des occupants non acclimatés (et acclimatés) selon le type de bâtiment, en évolution libre ou partiellement climatisés⁺

Type de bâtiment ↓	SET _a (°C)					SET _n (°C)
	Référence (occupant jeune)	Jeunes adultes		Personnes âgées		Jeunes adultes / Personnes âgées
		avec adaptation	sans adaptation	avec adaptation	sans adaptation	
Résidentiel	1 met et 0,5 clo (état éveillé); 0,7 met et 1,38 clo (état endormi)	30 (31,2)	27 (28,2)	28 (29,2)	26,5 (27,7)	30/32
Bureau	1,1 met et 0,57 clo (état éveillé)	30 (31,2)	27 (28,2)	28 (29,2)	26,5 (27,7)	s.o.
École secondaire	1,2 met et 0,57 clo (état éveillé)	30 (31,2)	27 (28,2)	s.o.	s.o.	s.o.
École primaire	1,2 met et 0,57 clo (état éveillé)	27 (28,2)	25 (26,2)	s.o.	s.o.	s.o.
Maison de retraite	1 met et 0,5 clo (état éveillé) 0,7 met et 1,64 clo (état endormi)	s.o.	s.o.	28 (29,2)	s.o.	32
SLD	1 met et 0,5 clo (état éveillé) 0,7 met et 1,64 clo (état endormi)	s.o.	s.o.	s.o.	26,5 (27,7)	32
Hôpital (chambre de patient)	1 met et 1,57 clo (état éveillé) 0,7 met et 1,64 clo (état endormi)	s.o.	27 (28,2)	s.o.	26,5 (27,7)	30/32

⁺ s.o. signifie que les valeurs ne sont pas applicables. Les personnes âgées sont considérées comme ayant un taux métabolique inférieur de 20 % à celui des jeunes adultes.

6.5 Critères de surchauffe

Les événements de surchauffe doivent être assujettis à des critères limitatifs afin de pouvoir déclarer des conditions de surchauffe dangereuses pour les espaces occupés des bâtiments. Le choix de ces critères est par conséquent important afin d'assurer la protection de la santé des occupants des bâtiments au cours d'événements de surchauffe extrêmes. La méthode proposée se base sur la mise en relation de l'amplitude (gravité) et de l'intensité des événements de surchauffe d'une part, et des résultats en matière de santé liée à la chaleur d'autre part. Les résultats de santé les plus importants concernent la déshydratation du corps consécutive à une transpiration excessive, et l'augmentation de la température interne du corps au-delà d'une valeur seuil.

La déshydratation, suivie des coups de chaleur, a été la principale cause de mortalité (température corporelle > 40°C) au cours de la vague de chaleur de 2003 en France (Fouillet et coll., 2006). La déshydratation est également l'une des causes les plus fréquentes d'hospitalisation des personnes âgées (Garriguet, 2008; Feliciano et coll., 2010). L'Organisation internationale de normalisation (ISO, 2018) recommande un taux de déshydratation admissible maximal de 3 % de la masse corporelle pour les jeunes adultes en bonne santé sur un lieu de travail, et précise que des taux de déshydratation supérieurs sont associés à des fréquences cardiaques supérieures et à un volume de plasma sanguin réduit. Chez les personnes vulnérables, cependant, le taux de déshydratation maximal doit être inférieur du fait des modifications physiologiques liées à l'âge (p. ex., fonction rénale, perception de la soif, diminution de la teneur en eau du corps; Volkert et coll., 2004). Par exemple, les personnes âgées sont moins sensibles à la soif et à la chaleur, et celles qui sont malades ont des capacités limitées pour acquérir un volume suffisant d'eau et permettre leur réhydratation si elles ne reçoivent pas un soutien infirmier continu. La situation peut s'aggraver en cas de maladies cardiovasculaires et rénales, ainsi que de prise de médicaments (Van Loenhout et coll., 2016). Des personnes âgées présentant des taux de déshydratation aussi faibles que 2 % de la masse corporelle peuvent être touchées par de graves problèmes de santé, comme une perte d'autonomie et un risque accru d'épuisement par la chaleur et de la fatigue, ou encore des troubles des fonctions cognitives et la réduction des performances (Begum et Johnson, 2010; Aphasamis et coll., 2019). Si les personnes peuvent se réhydrater librement (en buvant une boisson pour compenser la perte d'eau due à la transpiration), le seuil s'en trouve relevé. Des études menées dans le secteur minier ont montré que 50 % des travailleurs présentaient un taux de réhydratation moyen (remplacement de l'eau) de 60 % pour une exposition jusqu'à six heures à des conditions chaudes (à savoir entre 28 et 32°C), et que 95 % des travailleurs présentaient des taux de réhydratation supérieurs à 40 % (ISO, 2018). Des enquêtes communautaires réalisées au Canada (Jones et coll., 2019) ont montré que les adultes d'âge moyen (31-50 ans) et que les personnes âgées (> 51 ans) buvaient en moyenne 2031 et 1791 ml/jour de boisson, respectivement. Cela correspond à des taux d'hydratation de 79 % pour les adultes d'âge moyen et de 70 % pour les personnes âgées, selon la valeur de l'absorption moyenne de liquide recommandée au Canada de 2550 ml/jour pour des sujets sédentaires (3 litres pour les hommes et 2,2 litres pour les femmes, indépendamment de l'âge). Des études similaires menées en Europe ont révélé qu'un taux d'hydratation de 81 % est commun chez les adultes (Aphasamis et coll., 2019). Il a été montré qu'un nombre important de personnes âgées de plus de 85 ans buvaient un litre par jour (taux d'hydratation de 63 %, sur la base d'1,6 litre/jour recommandé pour les personnes âgées; Rikkert et coll., 2009). Des études réalisées sur des personnes âgées en maison de soins de longue durée recevant un soutien infirmier continu concluaient que de 20 à 31 % des résidents les plus âgés étaient déshydratés (Begum et Johnson, 2010; Jimoh et coll., 2019). Aucune étude n'a cependant été menée sur les taux d'hydratation des personnes vivant en communauté et dans des bâtiments institutionnels au cours d'événements de chaleur extrême. Au cours de longues expositions telles que les événements de chaleur extrême, la perte d'eau corporelle par transpiration peut être importante (une valeur jusqu'à 1 litre/h est habituelle), entraînant des taux de déshydratation supérieurs chez les personnes. Les taux de réhydratation des personnes vivant en communauté et dans des bâtiments institutionnels au cours d'événements de chaleur extrême sont par conséquent

basés sur des hypothèses prudentes. La méthode proposée suppose un taux de réhydratation moyen de 80 % pour les jeunes adultes, avec un taux de déshydratation du corps seuil de 3 % comme fixé par l'ISO (2018). Avec le taux de réhydratation de 80 %, le taux de déshydratation admissible peut alors être abaissé à $3 \% / (1 - 0,8) = 15 \%$. Pour les personnes âgées en bonne santé, on considère le même taux de réhydratation de 80 %, mais avec un taux de déshydratation du corps seuil de 2 %. Cela ramène à un taux de déshydratation seuil de 10 %.

De la même manière que pour réduire la température corporelle, les normes relatives à l'exposition à la chaleur sur les lieux de travail fixent une valeur maximale de la température interne à 38°C pour des adultes d'âge moyen en bonne santé exposés à une chaleur soutenue jusqu'à 8 heures (NIOSH, 1986; CCHST, 2018; ISO, 2017). Ce seuil correspond à une sensation thermique chaude avec transpiration abondante (SET > 37,5°C). Il ne peut cependant pas s'appliquer à une exposition soutenue pendant de longs événements de surchauffe pouvant durer plusieurs jours. Cette valeur maximale peut en outre s'avérer très dangereuse pour la santé des personnes vulnérables. Par conséquent, une limite seuil inférieure doit être utilisée pour la température corporelle. La valeur proposée de la température corporelle limite est fixée à 37,6°C (légèrement supérieure à la plage normale de 36 - 37,5°C; Kuht et Farmery, 2018) pour de jeunes adultes, ce qui correspond à un niveau de sensation de chaud (SET > 35°C). Pour des personnes âgées en bonne santé, une température corporelle de 37,6°C correspond à une température corporelle de 37,2°C chez de jeunes adultes (Figure 8). La différence est donc de 0,4°C, valeur qui se trouve dans la plage mesurée rapportée de 0,20 à 0,35 ± 0,20°C (Sagawa et coll., 1988; Stapleton et coll., 2014).

Pour déterminer la relation entre les caractéristiques des événements de surchauffe et les résultats en matière de santé liée à la chaleur des occupants, des calculs de la surchauffe ont été réalisés sur des occupants de maisons individuelles types représentant les pratiques de construction anciennes (années 1980) et actuelles (CNRC, 2015) dans trois villes canadiennes (Montréal (QC), Ottawa (ON), Toronto (ON)) au cours d'événements de surchauffe, et dans des maisons censées avoir une configuration résidentielle intérieure typique au cours de la période estivale. L'intensité et la gravité des événements de surchauffe ont été déterminées, tout comme la température corporelle maximale des occupants et leur perte d'eau corporelle cumulative en fonction de la masse corporelle due à la transpiration et à la respiration (calculée à l'aide du modèle de biothermique à deux nœuds développé; Ji et coll., 2021a,b). Les détails de cette étude sont présentés par Laouadi et coll; (2020b).

Les

Figure 10 et

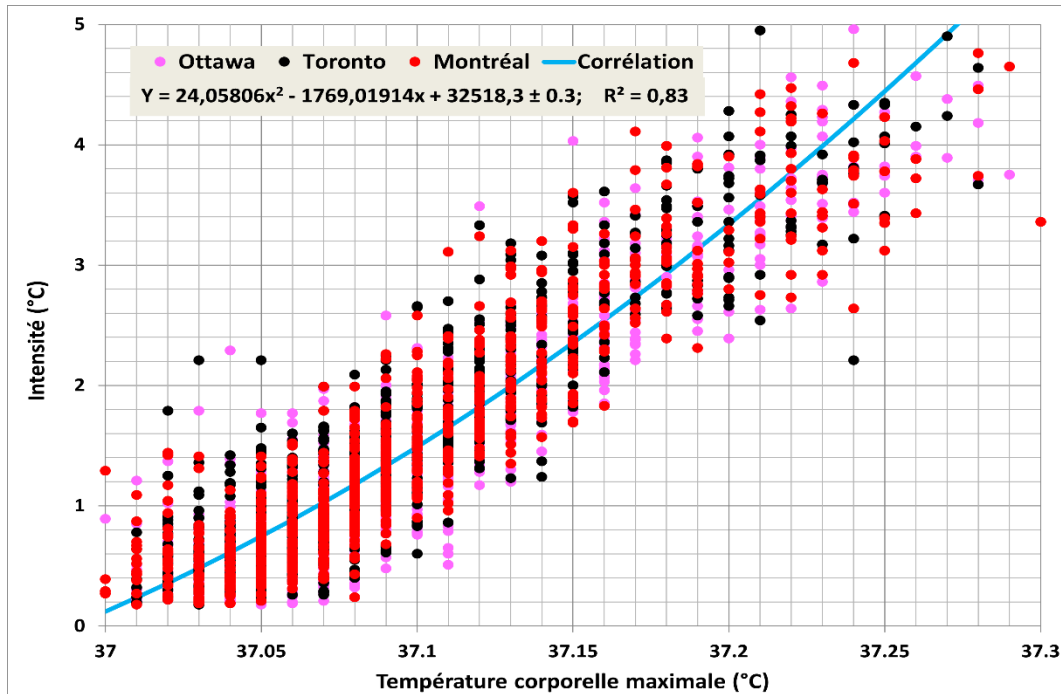


Figure 11 montrent respectivement les valeurs de la gravité et de l'intensité des événements de surchauffe par rapport au pourcentage cumulatif (sur toute la durée de l'événement de surchauffe) en perte d'eau corporelle de jeunes adultes. L'indice de gravité des événements de surchauffe est bien corrélé avec le pourcentage en perte d'eau corporelle cumulative. Cependant, l'indice d'intensité est davantage lié à la température corporelle maximale. En se basant sur le critère de limitation de la perte d'eau corporelle, tel que vu précédemment, la surchauffe est déclarée lorsque l'indice de gravité (SETH) est supérieur à 230 ± 42 (°C*h). La température corporelle n'atteint néanmoins pas la limite seuil de 37,6°C dans une configuration résidentielle intérieure typique dans les villes canadiennes sélectionnées dans le cadre de cette étude. La situation peut différer dans d'autres lieux présentant des climats tièdes ou chauds, secs ou humides.

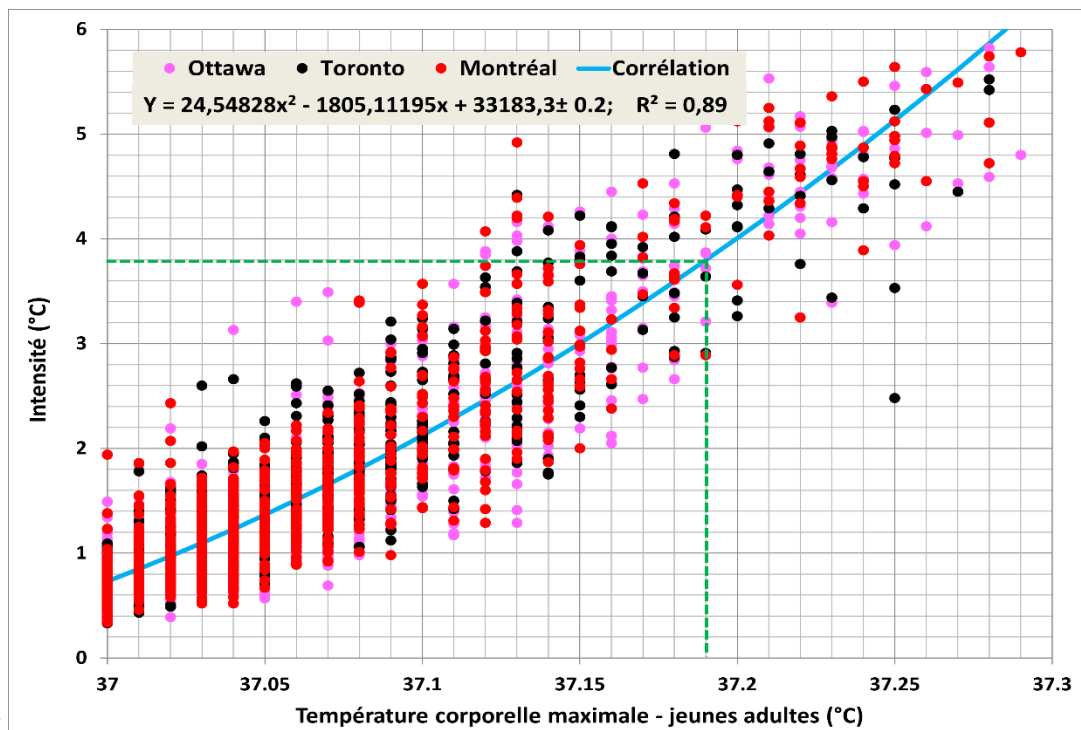
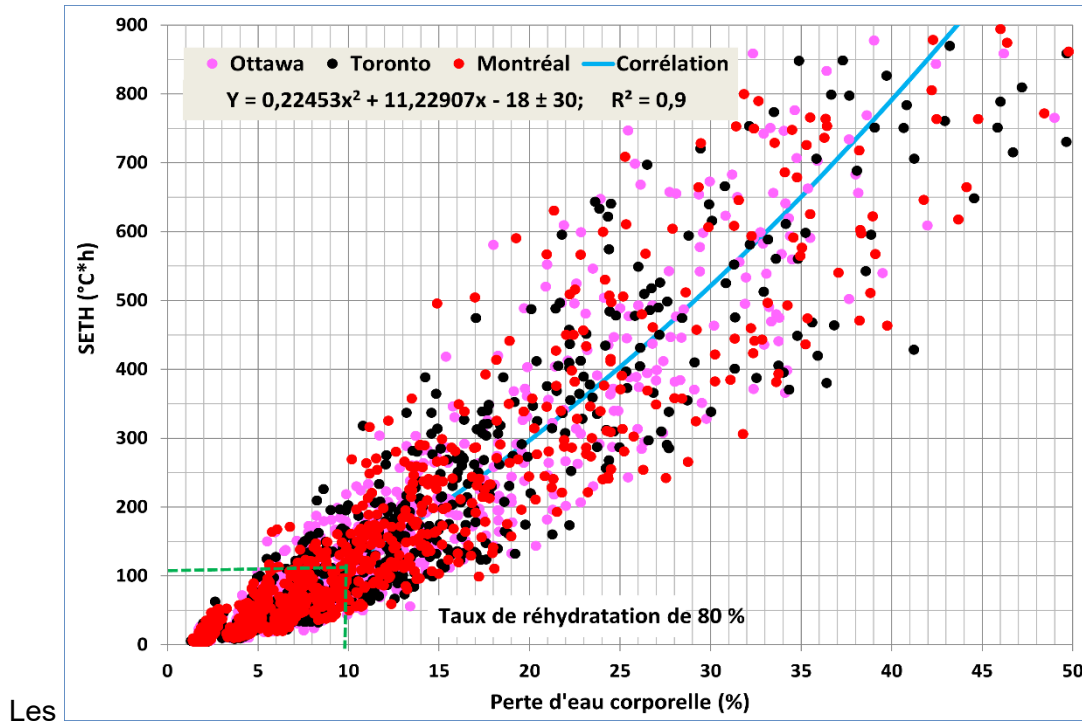


Figure 12 et

Figure 13 montrent respectivement les valeurs de la gravité et de l'intensité des événements de surchauffe par rapport au pourcentage cumulatif en perte d'eau corporelle de personnes âgées en bonne santé. De la même manière que dans les

Figure 10 et

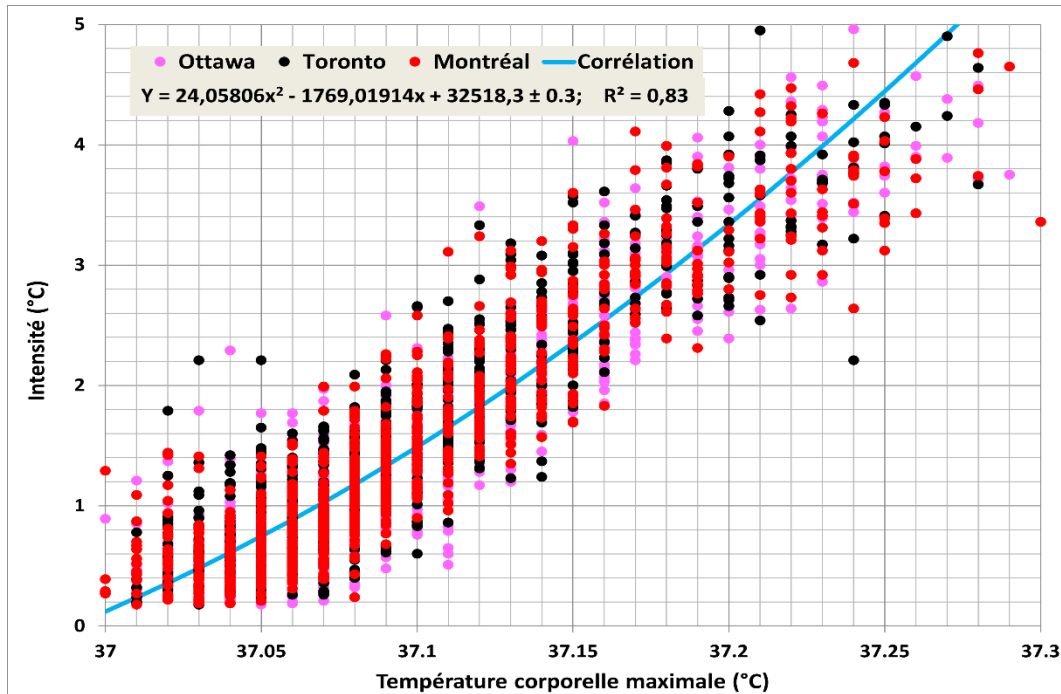


Figure 11, l'indice de gravité des événements de surchauffe est bien corrélé avec le pourcentage en perte d'eau corporelle cumulative, et l'indice d'intensité, encore une fois, est davantage lié à la température corporelle maximale. En se basant sur le critère de limitation du pourcentage en perte d'eau corporelle des personnes âgées, vu précédemment, la surchauffe est déclarée lorsque l'indice de gravité (SETH) est supérieur à 117 ± 30 (°C*h). En fonction de la température corporelle seuil des personnes âgées, la surchauffe est déclarée si l'intensité des événements de surchauffe excède $4 \pm 0,2$ °C dans des configurations résidentielles intérieures typiques pour les villes canadiennes sélectionnées.

Il convient de noter que les critères de surchauffe, tels que présentés, ont été développés pour un taux de réhydratation de 80 %. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour déterminer les valeurs communes des taux de réhydratation des occupants dans des configurations de bâtiments typiques soumis à des événements de surchauffe extrêmes. Les relations entre la

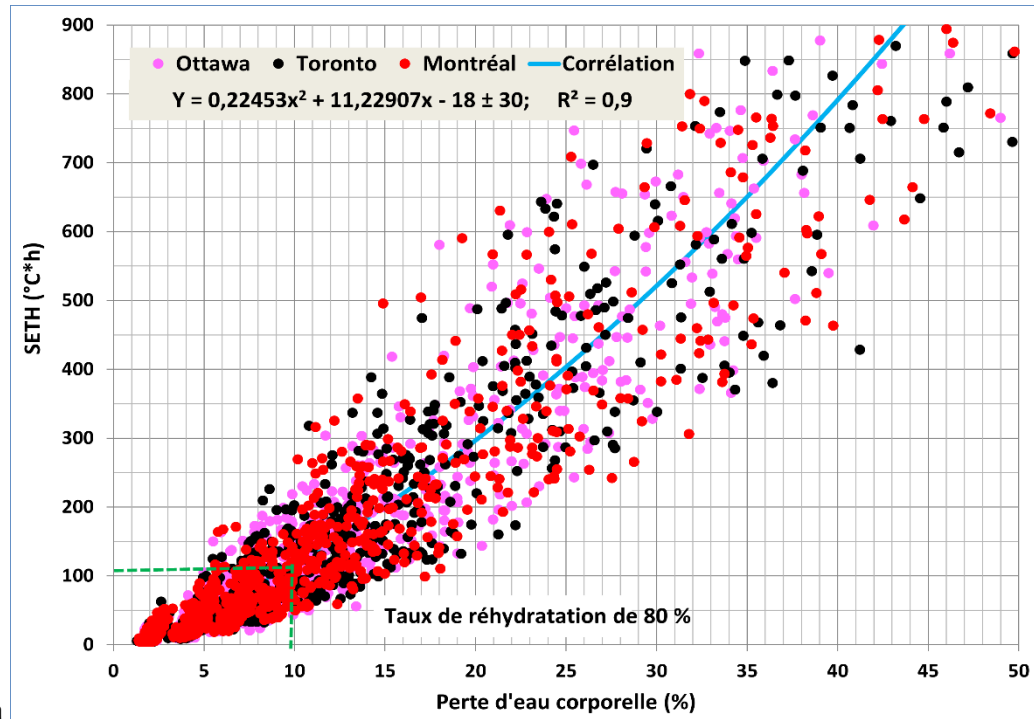


Figure 10 et la

Figure 12 doivent être utilisées pour déterminer les critères limites de gravité des événements de surchauffe pour différents taux de réhydratation dans divers lieux au Canada.

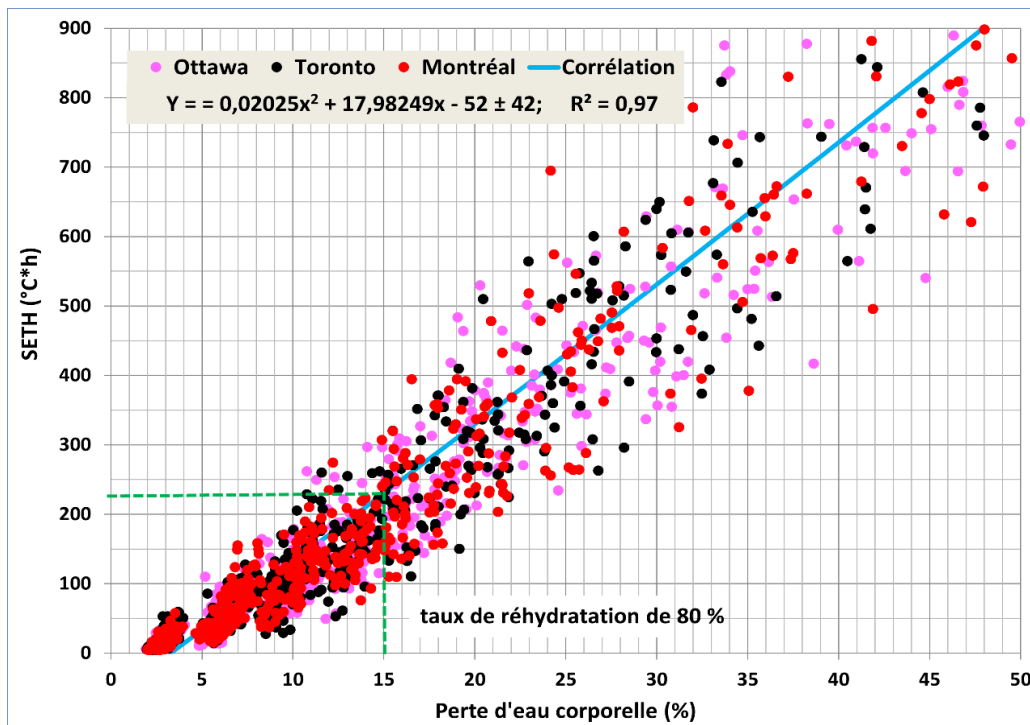


Figure 10. Gravité des événements de surchauffe (°C*h) par rapport à la perte d'eau corporelle cumulative (%) pour de jeunes adultes

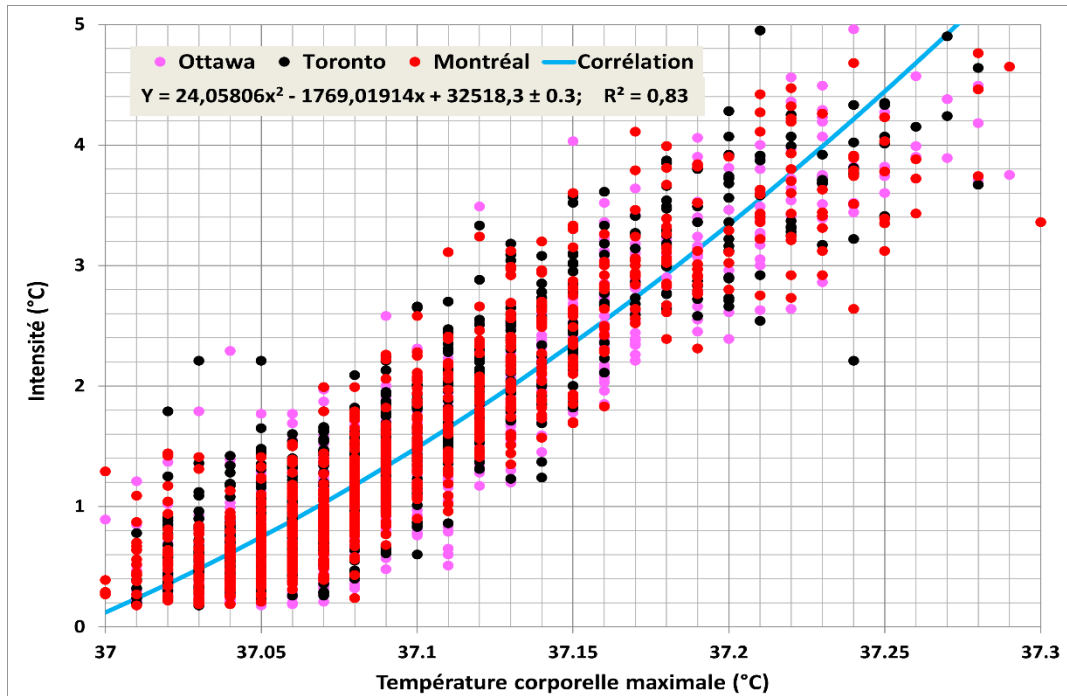


Figure 11. Intensité des événements de surchauffe (°C) par rapport à la température corporelle maximale (°C) pour de jeunes adultes

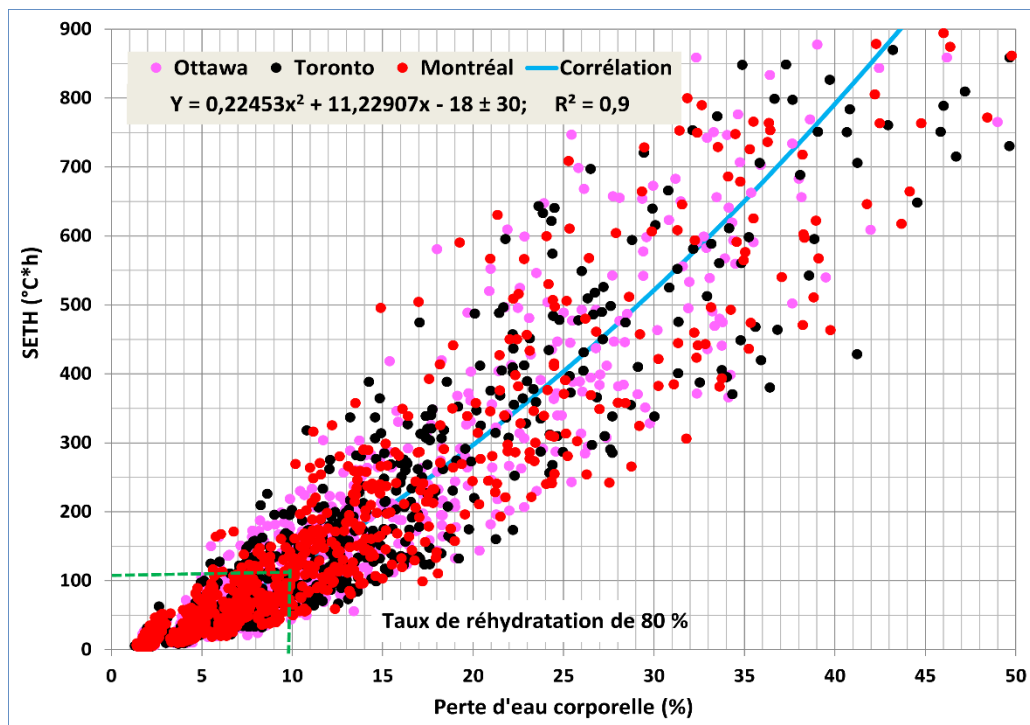


Figure 12. Gravité des événements de surchauffe (°C*h) par rapport à la perte d'eau corporelle (%) des personnes âgées en bonne santé

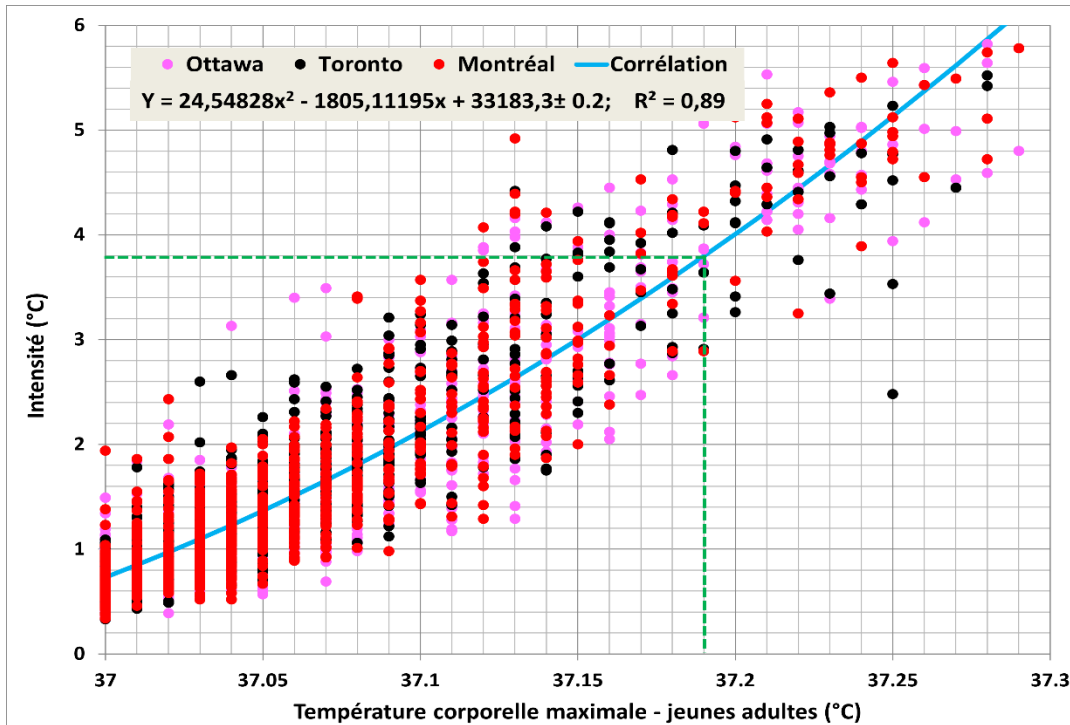


Figure 13. Intensité des événements de surchauffe (°C) par rapport à la température corporelle maximale (°C) (jeunes adultes) des personnes âgées en bonne santé

7 FACTEURS DE RISQUE DE SURCHAUFFE

Les facteurs qui augmentent le risque de surchauffe dans les environnements construits sont essentiellement les mêmes que ceux qui affectent directement ou indirectement les conditions intérieures et qui affaiblissent la réponse physiologique des occupants à la chaleur. Les principaux facteurs sont résumés ci-dessous.

7.1 Environnement extérieur

Les conditions de l'environnement extérieur local exercent une influence directe sur les conditions intérieures. Par exemple, citons les événements de chaleur extrême extérieurs (ou vagues de chaleur) ainsi que d'autres facteurs aggravants extérieurs affectant la santé des occupants du bâtiment. Les facteurs extérieurs ayant un effet important sur la surchauffe sont les suivants :

- **Température** : la chaleur extérieure est transférée vers les espaces intérieurs par les enveloppes des bâtiments, l'infiltration d'air et la ventilation par les ouvertures intentionnelles (fenêtres par exemple). Le risque de surchauffe est proportionnel à la température extérieure.
- **Humidité relative** : l'humidité relative est principalement transférée vers les espaces intérieurs par l'infiltration d'air et la ventilation, en particulier dans les anciens bâtiments mal isolés et les bâtiments ventilés naturellement. Un taux d'humidité élevé réduit l'efficacité du refroidissement par évaporation au niveau de la surface de la peau via la sudation.
- **Vitesse du vent** : la vitesse du vent augmente l'infiltration d'air et la ventilation. Elle peut augmenter ou réduire le risque de surchauffe en fonction du taux d'humidité extérieur. Dans les bâtiments ventilés naturellement, la vitesse du vent réduit le risque de surchauffe en augmentant la vitesse de l'air à l'intérieur et, par conséquent, en assurant un effet de refroidissement à la surface de la peau.
- **Rayonnement solaire** : un rayonnement solaire intense (au cours des journées ensoleillées) fournit une quantité importante de chaleur à l'intérieur des bâtiments, par les fenêtres non ombragées, augmentant les températures intérieures et la température moyenne radiante si les occupants sont directement exposés aux rayons du soleil.
- **Pollution de l'air** : la pollution de l'air est un facteur aggravant qui affecte la santé des occupants des bâtiments, en particulier si l'air extérieur n'est pas adéquatement filtré par les systèmes CVCA des bâtiments.
- **Climat local** : un climat froid ou tempéré affecte l'acclimatation à la chaleur de la population, principalement à la fin du printemps et au début de l'été. Les personnes vivant dans des climats tièdes ou chauds sont naturellement acclimatées à la chaleur.

7.2 Bâtiment

Les bâtiments modifient les conditions thermiques intérieures. En Occident, les gens passent jusqu'à 90 % de leur temps à l'intérieur (IOM, 2011) et sont par conséquent exposés beaucoup plus longtemps aux conditions thermiques intérieures plutôt qu'extérieures. Les facteurs liés à l'environnement construit pouvant augmenter le risque de surchauffe des occupants du bâtiment sont les suivants :

- **Niveaux d'isolation et étanchéité des enveloppes du bâtiment** : une bonne isolation et des enveloppes étanches réduisent les gains de chaleur depuis l'environnement extérieur, mais limitent également la libération vers l'extérieur des gains de chaleur interne piégée. Si les espaces intérieurs ne sont pas correctement ventilés, la chaleur piégée augmentera alors le risque de surchauffe.
- **Protection solaire des fenêtres** : l'absence de protection des fenêtres entraîne une augmentation des gains de chaleur solaire, lesquels augmentent à leur tour les températures intérieures et ainsi le risque de surchauffe.
- **Gains de chaleur interne** : les gains de chaleur interne élevés provenant des équipements, des éclairages, des occupants, des appareils de cuisson, des équipements de production d'eau chaude, etc. augmentent les températures intérieures.
- **Bâtiments en évolution libre ou ventilés naturellement** : les conditions intérieures dans ces bâtiments ne sont pas contrôlées et par conséquent sujettes à des températures intérieures plus élevées que celles des bâtiments climatisés. Au Canada, de 39 à 50 % environ des bâtiments résidentiels n'ont pas de climatisation (Tableaux 6 et 7 ci-dessous). En ce qui concerne les bâtiments commerciaux et institutionnels, environ 31,2 % (ou 17 % de la surface totale de plancher) ne disposent pas de climatisation (RNCAN, 2012). Les écoles non climatisées (primaires et secondaires), les bureaux (non médicaux), et les hôpitaux représentent, respectivement, environ 36,3 %, 11,4 % et 1,3 % du total des bâtiments commerciaux et institutionnels.
- **Bâtiments ventilés de manière inappropriée** : une ventilation adéquate est nécessaire pour éliminer les contaminants intérieurs. Les températures internes élevées favorisent les réactions chimiques et le dégazage des matériaux, entraînant une production accrue de contaminants intérieurs pouvant affecter la santé des occupants du bâtiment.
- **Densité d'occupation** : les bâtiments à forte densité d'occupation (p. ex. les logements sociaux) peuvent être concernés par des problèmes de qualité d'air intérieur et de santé des occupants, qui à leur tour peuvent affaiblir la réponse physiologique à la chaleur.
- **Immeubles résidentiels à logements multiples (IRLM)**. Les étages supérieurs des IRLM sont connus pour présenter des températures intérieures supérieures (Touchie et coll., 2016; Vardoulakis et coll., 2015; Anderson et coll., 2013) à celles d'autres bâtiments situés dans la même zone. En outre, les étages supérieurs peuvent limiter le déplacement des personnes vulnérables vers les centres de refroidissement communautaires au cours des vagues de chaleur (Touchie et coll., 2016; Vellei et coll., 2017; Lomas et Porritt, 2017).

Tableau 6. Utilisation de la climatisation dans les bâtiments résidentiels par province, enquête de 2011 de RNCAN sur les ménages (RNCAN, 2011)

Province →	Canada	Atlantique	Québec	Ontario	MB/SK	Alberta	C.-B.
Avec climatisation	7 774 028	274 512	1 873 870	4 025 171	660 373	364 566	575 537
Sans climatisation	5 682 397	681 934	1 438 216	1 020 066	219 458	1 072 295	1 250 428
Sans climatisation (%)	42 %	71 %	43 %	20 %	25 %	75 %	68 %

Tableau 7. Utilisation de la climatisation dans les bâtiments résidentiels par type de bâtiment, enquête de 2011 de RNCAN sur les ménages (RNCAN, 2011)

Type de bâtiment →	Maisons individuelles	Maisons double rangée	Immeubles collectifs en bande	Tours d'habitation
Avec climatisation	4 871 481	1 019 819	1 009 469	601 930
Sans climatisation	3 273 293	701 747	1 029 173	388 931
Sans climatisation (%)	40 %	41 %	50 %	39 %

7.3 Occupants du bâtiment

L'exposition à des événements de chaleur intérieurs affecte toutes les catégories de personnes, indépendamment de leur origine ethnique. Cependant, d'autres facteurs liés aux occupants augmenteraient le risque de surchauffe :

Vulnérabilité à la chaleur : la vulnérabilité à la chaleur affaiblit la réponse physiologique des occupants, et raccourcit par conséquent la durée d'exposition sans danger. Les types de personnes vulnérables à la chaleur sont indiqués à la Section 5.

Niveau d'activité : le niveau d'activité des occupants augmente la chaleur métabolique, et ainsi la température corporelle.

Isolation vestimentaire : les vêtements épais et non respirants réduisent la dissipation de la chaleur corporelle, et augmentent par conséquent la température corporelle.

Réhydratation du corps : l'absence de réhydratation du corps en continu au cours d'une exposition à la chaleur pour remplacer la perte d'eau par transpiration augmente le niveau de déshydratation du corps de l'occupant.

Adaptation à la chaleur : l'adaptation aux températures chaudes dans des conditions sèches ou humides est une mesure efficace permettant de réduire la température corporelle dans des

conditions chaudes, et par là même le risque de surchauffe. Les personnes vivant dans des climats chauds ou humides s'adaptent naturellement à la chaleur (Hajat et Kosatky, 2010). L'adaptation à la chaleur dans des climats froids est néanmoins limitée en été (Basu, 2009; Medina-Ramon et Schwartz, 2007).

Mobilité : le manque de mobilité des occupants, par exemple le fait de se déplacer, de changer de lieu, d'utiliser des ventilateurs pour refroidir l'espace, ou d'ouvrir les fenêtres pour assurer une ventilation naturelle, augmente le risque de surchauffe dans des espaces occupés tièdes.

7.4 Communauté

Les facteurs communautaires pouvant augmenter le risque de surchauffe sont les suivants :

- **Îlots de chaleur urbains (ICU)** : effets présents dans les grandes villes et celles à forte densité. La différence de température entre les villes et les campagnes peut atteindre 12°C, en particulier la nuit (Gachon et coll., 2016), ce qui a pour effet de réduire l'efficacité du refroidissement par ventilation nocturne dans les bâtiments.
- **Urbanisation** : processus qui réduit la surface d'espaces verts, essentiels au refroidissement de l'atmosphère et à la réduction des effets des ICU.

8 ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR

8.1 Introduction

Les conditions prédominantes à l'extérieur constituent les principaux facteurs influençant le risque de surchauffe dans les bâtiments. Ce risque est de plus aggravé au cours d'événements de chaleur extrême en été. Beaucoup de régions canadiennes ont connu de nombreux événements de chaleur extrême (HC, 2019). Citons par exemple la vague de chaleur de deux semaines qui s'est terminée le 17 juillet 1936, avec des températures supérieures à 44°C. Cette vague de chaleur a été la plus longue et la plus mortelle jamais enregistrée; elle a surtout touché les provinces du Manitoba et de l'Ontario, entraînant le décès de 1 180 personnes (ECCC, 2017). Un an plus tard, le 5 juillet 1937, des régions de la Saskatchewan étaient frappées par les températures les plus élevées jamais vues au Canada (ECCC, 2017). Au cours de l'été 2005, Toronto a enregistré 41 jours de chaleur avec un pic de température établi à 34°C (ECCC, 2018a). À l'été 2010, de nombreuses villes de la province du Québec ont connu des températures plus élevées que les valeurs moyennes de juillet et d'août, avec des températures maximales et minimales respectives de 31-33°C et de 16-20°C, sur une période de quatre à six jours. Le nombre de décès a même atteint plus de 1 360 dans la province, avec environ 383 à Montréal (Lebel et coll., 2017). Pendant l'été 2009, la Colombie-Britannique a été frappée de huit jours de vagues de chaleur, avec des températures maximales allant jusqu'à 34,4°C à Vancouver, et un total de 134 morts (Kosatsky, 2010). On s'attend à ce que les futurs effets du changement climatique augmentent la fréquence et l'intensité des événements de chaleur extrême en été.

Afin d'être en mesure de tenir compte des événements de chaleur extrême estivaux en vue d'une analyse du risque de surchauffe, des séries chronologiques de données climatiques sont requises sur une période suffisamment longue. Des données climatiques locales peuvent être disponibles dans des enregistrements d'observation des décennies passées. Cependant, en ce qui concerne les projections concernant le changement climatique, seules les données climatiques peuvent être déterminées. La méthode de l'estimation la plus simple fait appel au morphage grâce auquel les données observées actuellement sont combinées aux températures moyennes mensuelles obtenues au cours d'études de modélisation climatique pour des scénarios de changement climatique donnés, afin de produire des données de séries chronologiques (Belcher et coll., 2005). La deuxième méthode utilise un ensemble de modèles climatiques globaux permettant de simuler le système couplé continent-atmosphère-océan qui se base sur certaines hypothèses de changement climatique futur en termes de scénarios de forçage radiatif (RCP = 2,6 à 8,5 W/m²; GIEC, 2014).

Cette section présente les méthodologies permettant (1) d'obtenir des données climatiques de référence des lieux canadiens choisis pour la période historique et des projections climatiques futures, (2) de définir et de caractériser les événements de chaleur extrême du climat, et (3) d'extraire les événements de chaleur extrême du climat et les années estivales extrêmes, dans le but d'analyser le risque de surchauffe en effectuant des simulations thermiques des bâtiments. La méthodologie d'extraction des événements de chaleur extrême s'applique à l'élaboration de cartes thermiques spatiales des lieux canadiens sélectionnés.

8.2 Effets du changement climatique

Les effets du changement climatique ont été détectés au Canada. Les relevés d'observation indiquent que les températures moyennes au Canada ont augmenté de 1,3°C au cours des 50 dernières années, soit environ deux fois l'augmentation moyenne enregistrée à l'échelle mondiale (Bizikova et coll. 2008). Il a été démontré que le degré de réchauffement variait dans l'espace, dans le temps, et selon l'indice climatique. Les augmentations les plus fortes concernent plutôt les températures minimales quotidiennes que les températures maximales quotidiennes, les régions du nord-ouest et de l'ouest du Canada plutôt que le reste du pays, et enfin l'hiver et l'été plutôt que le reste de l'année (Zhang et coll. 2000).

On s'attend à ce que les projections climatiques futures influencent les changements considérables apportés aux diagrammes de température du Canada. Les séries chronologiques des prévisions de température à long terme des modèles de la Phase 5 du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5) d'ECCC (2016) laissent entendre une augmentation moyenne des températures au Canada comprise entre 2°C et 6°C pour les différents scénarios illustrés sur la

Figure 14. Les trajectoires futures des températures ont été prévues pour trois scénarios : RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 pour les périodes couvrant les 20^e et 21^e siècles. Les changements prévus varient dans l'espace ainsi qu'au sein des différentes provinces du Canada. Le

Tableau 8 résume les changements projetés en matière de températures moyennes annuelles au sein du Canada, pour deux scénarios extrêmes : RCP 2.6 et RCP 8.5. Les provinces pour lesquelles il est prévu des amplitudes de réchauffement supérieures à la moyenne canadienne sont surlignées en rouge. Les projections concernant les provinces du Nunavut, des Territoires du Nord-Ouest et du Manitoba prévoient toujours un réchauffement nettement plus important que dans le reste du Canada, et ce dans tous les RCP. Les projections pour les provinces de la Saskatchewan et du Yukon sont également légèrement au-dessus de la moyenne canadienne en termes de réchauffement projeté.

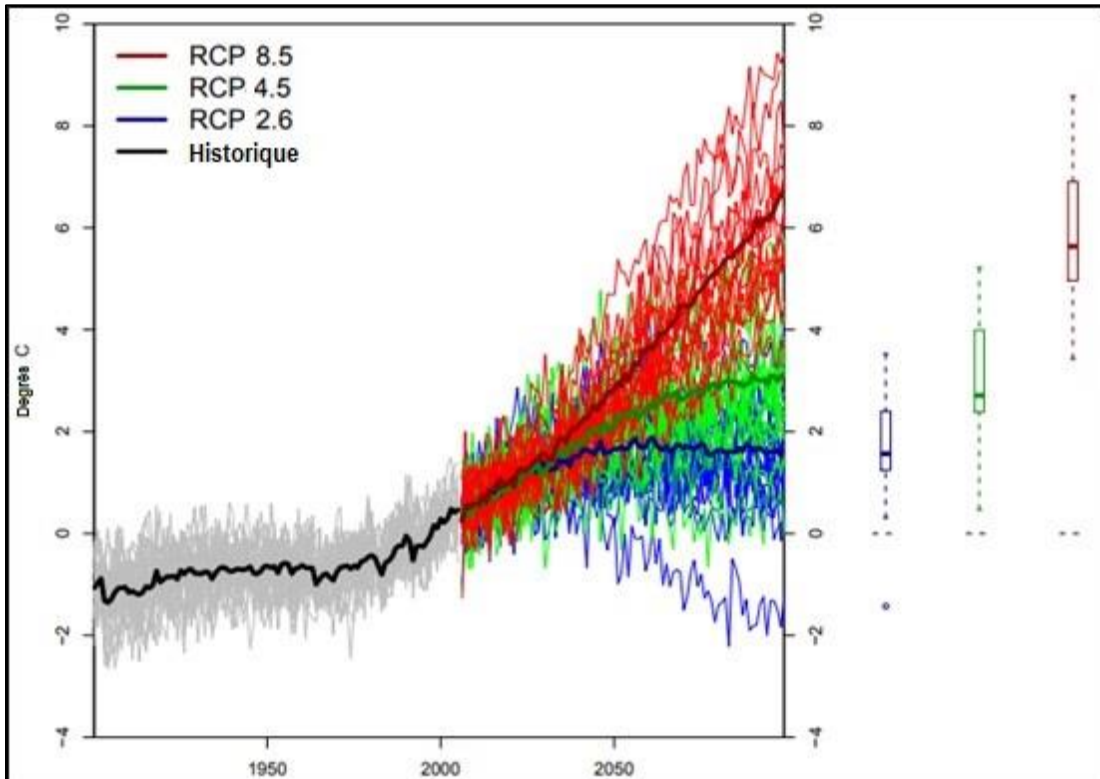


Figure 14. Séries chronologiques des changements projetés en termes de températures moyennes annuelles au Canada. Ces changements ont été calculés en prenant comme référence la période allant de 1986 à 2005 (Source : <http://climate-scenarios.canada.ca/index.php?page=download-cmip5>)

Tableau 8. Changements moyens projetés en termes de températures moyennes, calculés par province et à l'échelle du Canada*

Région	RCP 2.6 (°C)		RCP 8.5 (°C)	
	2050	2090	2050	2090
Canada	1,8	1,8	3,5	6,3
Alberta	1,6	1,7	3,2	5,8
Colombie-Britannique	1,5	1,6	2,9	5,2
Manitoba	1,9	2,0	3,9	7,1
Nouveau-Brunswick	1,6	1,6	3,1	5,4
Terre-Neuve-et-Labrador	1,5	1,5	3,0	5,4
Territoires du Nord-Ouest	2,3	2,3	4,5	8,4
Nouvelle-Écosse	1,5	1,5	2,8	4,9
Nunavut	2,3	2,2	4,7	8,7
Ontario	1,7	1,7	3,5	6,3
Île-du-Prince-Édouard	1,6	1,6	3,0	5,2
Québec	1,7	1,7	3,5	6,3
Saskatchewan	1,8	1,9	3,6	6,5

*Les changements correspondant à RCP 2.6 et à RCP 8.5 sont prévus à l'horizon 2050 (2046-2065) et 2090 (2081-2100); les changements ont été calculés en prenant comme référence la période allant de 1986 à 2005 (Source : <http://climate-scenarios.canada.ca/index.php?page=download-cmip5>)

8.3 Données climatiques de référence

Onze villes représentatives du Canada ont été choisies pour produire les données climatiques de référence. Ces données incluent les données d'observation historiques et les données de modélisation du climat pour les climats futurs projetés. Des détails supplémentaires sur la méthodologie permettant d'extraire ces données climatiques peuvent être trouvés dans Gaur et coll. (2018). Une brève description de la méthodologie est fournie ci-après.

8.3.1 Données climatiques de référence pour la période historique

Les données climatiques d'observation historiques de référence couvrant la période 1986 - 2016 (31 ans) proviennent de la base de données d'observation climatiques de l'ECCC (2018b). Les variables climatiques comprennent les observations horaires du rayonnement solaire horizontal global, de la couverture nuageuse totale, de l'humidité relative, de la température de l'air, des précipitations, de la pression atmosphérique, de la vitesse et du sens du vent, ainsi que de l'épaisseur de neige. Les données climatiques sont recueillies depuis toutes les stations météorologiques au sein d'un domaine de la ville, puis moyennées afin de produire un unique fichier pour la ville sélectionnée. Le rayonnement solaire horizontal global se compose de son faisceau direct et de composants diffus (méthode d'Orgill et Hollands (1977)). Les lacunes dans les fichiers de données météorologiques moyennées des villes sont comblées à l'aide des données biaisées et corrigées provenant de bases de données du système de réanalyse Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) (Saha et coll., 2010).

8.3.2 Données climatiques de référence pour les projections climatiques futures

Les données de modélisation climatique couvrant la période 1950 - 2100 proviennent des bases de données climatiques d'ECCE (2018b). Les données d'ECCE ont été obtenues à l'aide du modèle de simulation CanESM2 LE (grand ensemble). Le CanESM2 LE est un modèle climatique mondial (MCM) comptant cinq membres d'ensemble. Les simulations ont été réalisées avec une résolution spatiale de 2,8°, et 10 ensembles de paramétrages de la physique des nuages ont été sélectionnés au hasard (Arora et coll., 2011). Au total, 50 simulations ont été effectuées. Pour procéder à une réduction d'échelle dynamique du CanESM2 LE à une grille de 0,44°, les simulations régionales ont été réalisées à l'aide du modèle CanRCM4 (Scinocca et coll., 2016). Un sous-ensemble des simulations CanRCM4, comprenant 15 réalisations (séries), a été archivé par l'ECCE dans des intervalles d'une heure, et acquis par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) afin de mener une recherche sur les bâtiments. Les variables climatiques couvertes ont été les suivantes : rayonnement solaire global, température, humidité relative, vitesse et sens du vent, pression atmosphérique et épaisseur de neige. Les données climatiques ont été regroupées dans des ensembles de données de 31 ans, comprenant la période historique 1986 - 2016 et sept périodes ultérieures coïncidant avec les scénarios de réchauffement des températures moyennes globales de 0,5°C, 1,0°C, 1,5°C, 2,0°C, 2,5°C, 3,0°C et 3,5°C. Une analyse des simulations CanRCM4 a montré que les niveaux prescrits précédemment des scénarios de réchauffement climatique futur seraient atteints sur les périodes de 31 ans de 2001 - 2031, 2013 - 2043, 2024 - 2054, 2034 - 2064, 2044 - 2074, 2053 - 2083 et 2062 - 2092, respectivement. Ainsi, les 15 membres des projections horaires CanESM2 LE couvrant les périodes historiques et futures susmentionnées ont été extraits pour les villes canadiennes sélectionnées, afin de générer des séries chronologiques historiques et projetées des variables climatiques. Les données brutes acquises des simulations CanRCM4 ont été biaisées et corrigées en comparant les données de simulation de chaque variable climatique avec les données d'observation moyennées de la ville pour la période historique. Des facteurs de correction du biais ont donc été développés pour chaque heure et mois dans chacune des villes, puis appliqués aux données brutes de simulation, à la fois pour les projections climatiques historiques et futures.

8.3.3 Précision des données de modélisation climatique

Des études ont montré que les données climatiques simulées régionales pour les projections climatiques historiques et futures étaient associées aux biais (Gaur et coll. 2018). Par conséquent, les données simulées doivent être à nouveau biaisées et corrigées à l'aide des données d'observation. Des données d'observation climatiques n'étant pas disponibles pour chaque point de grille des données climatiques simulées, toute méthode de correction de biais entraînera un biais. La comparaison des données climatiques biaisées et corrigées du CNRC avec les données d'observation historiques dans les villes sélectionnées a montré que la valeur des données climatiques simulées est plus élevée de quelques degrés Celsius que celle provenant des observations. La température maximale annuelle des données d'observation est comparée aux données de simulation du

Tableau 9, sur la période historique (1986 - 2016) pour onze principales villes canadiennes. L'écart de température maximale simulée dépend de l'emplacement de la ville, et la plage correspondante s'étend d'une valeur minimale de -4,9 à 6,3°C à une valeur maximale de -1,9 à 11,2°C. Par exemple, pour la ville d'Ottawa (Ontario), l'écart de température maximale varie entre 2,3 et 5°C. Vancouver (C.-B.) a présenté l'écart le plus important de 6,3 à 11,2°C, alors que l'écart le plus faible est celui enregistré à St. John's. À cet effet, l'écart de température significatif des données climatiques simulées montre que l'évaluation des impacts du changement climatique sur les bâtiments quant aux variations relatives par rapport à la période historique de référence est recommandée plutôt que d'utiliser les variations absolues, qui ne peuvent être représentatives des impacts climatiques futurs.

Tableau 9. Comparaison entre les données de simulation et d'observation de la température maximale annuelle pour la période historique 1986 – 2016 dans onze villes canadiennes

Ville	T _{max} observée	T _{max} min. (simulation)	\Delta T	T _{max} max. (simulation)	\Delta T
Ottawa	36,6	38,9	2,3	41,6	5,0
Toronto	37,0	37,0	0,1	40,5	3,6
Montréal	35,1	38,1	3,0	41,4	6,3
Halifax	32,9	33,0	0,1	35,7	2,8
St John's	28,8	23,9	-4,9	26,8	-1,9
Charlottetown	32,4	32,2	0,1	35,4	3,1
Moncton	34,7	35,9	1,2	38,9	4,2
Winnipeg	37,9	39,3	1,4	42,3	4,4
Saskatoon	40,4	37,6	-2,8	40,2	0,2
Calgary	34,0	35,6	1,6	39,8	5,8
Vancouver	30,0	36,3	6,3	41,2	11,2

8.4 Définition des événements de chaleur extrême

Les événements de chaleur extrême (EHE, également connus sous le nom de vagues de chaleur) résultent de la variabilité naturelle du climat, aggravée par le réchauffement climatique à l'échelle planétaire (GIEC, 2014). D'un point de vue climatique, un EHE peut se définir comme un événement rare survenant dans un lieu précis pendant une période de temps définie (GIEC, 2014; NASEM, 2016). Dans la pratique, cependant, aucune définition précise et universelle d'un EHE n'existe (OMS, 2009; Gachon et coll., 2016; EPA, 2016). Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) utilise l'*Humidex* combiné aux températures

maximales et minimales quotidiennes pour définir les EHE locaux (ECCC, 2018a) afin d'émettre des avertissements de chaleur dans plusieurs régions provinciales. Les valeurs du Tableau 11 sont proches des valeurs minimales des températures extérieures quotidiennes utilisées lors des avertissements publics d'alerte de chaleur d'ECCC (Tableau 10). Cette définition ne tient néanmoins pas compte des autres variables climatiques (p. ex., rayonnement solaire, vitesse du vent, etc.) qui s'avèrent importantes dans le cadre de l'analyse du risque de surchauffe dans les bâtiments. Du point de vue du bâtiment et du confort des occupants, une nouvelle définition a été développée, et qui est utilisée dans le présent document, où les EHE sont considérés de la même manière que les événements de surchauffe intérieurs, mais avec des seuils SET différents.

Un *événement de chaleur extrême* extérieur se définit comme un **événement de chaleur extérieur quotidien continu avec des températures chaudes qui affecte le confort des personnes à l'extérieur directement exposées à ces événements de chaleur, à l'ombre, et pendant au moins une journée.**

Un événement de chaleur extérieur quotidien se définit comme un événement de chaleur avec des températures chaudes qui survient quotidiennement pendant au moins un nombre d'heures déterminé au cours de la journée, et qui déclenche une réponse physiologique et une action des occupants qui y sont directement exposés afin de retrouver un confort thermique. Plusieurs EHE sont déclarés s'ils sont séparés par une période de récupération d'au moins une journée.

Au cours d'une exposition d'une journée entière, les personnes peuvent réaliser plusieurs activités à l'extérieur et à l'intérieur. Au cours de la journée, les personnes sont considérées comme marchant à l'extérieur à l'ombre, alors que l'on considère qu'elles dorment la nuit. L'amplitude de la durée d'un EHE à l'extérieur, N (jours), s'exprime de la même manière que pour les événements de surchauffe intérieurs, mais avec différentes valeurs seuils pour le confort extérieur et le sommeil au cours de la nuit. Les équations (1) à (3) s'applique à un EHE. Cependant, les valeurs horaires de t -SET sont calculées à l'aide des variables climatiques (température, humidité relative et vitesse du vent). Le rayonnement solaire à l'ombre (rayonnement solaire direct exclu) est converti en une température moyenne radiante à l'aide de la formule de Pickup and de Dear (2000) et de l'ASHRAE (2017). Des détails supplémentaires peuvent être trouvés dans Laouadi et coll. (2020a). La valeur seuil de t -SET au cours d'une exposition pendant la journée est fixée à $SET_d = 30^\circ\text{C}$ ($31,2^\circ\text{C}$ pour les personnes acclimatées). Les personnes sont considérées comme non acclimatées au cours du premier mois des événements de chaleur prévus en période estivale, fixée à mai pour les emplacements au Canada. Pour les autres mois d'été, les personnes sont considérées comme acclimatées aux événements de chaleur de juin à septembre (pour les emplacements au Canada).

Pendant la nuit, lorsque les personnes dorment, la relation entre les conditions intérieures et l'extérieur est inconnue. Par conséquent, afin de quantifier l'effet direct des conditions thermiques extérieures sur le sommeil d'une personne, la valeur de référence de SET_n pour le sommeil est censée correspondre à la valeur de la température inférieure de la plage de confort thermique adaptatif pour l'emplacement à l'étude. La raison en est la suivante : (1) les personnes vivant dans des environnements intérieurs sont plus tolérantes à la chaleur dans des

bâtiments ventilés naturellement; (2) la température intérieure est habituellement supérieure de plusieurs degrés Celsius que la température extérieure au cours de la nuit; et (3) la plupart des gens préfèrent se couvrir et ainsi supporter des températures plus fraîches en dormant (Lin et Deng, 2008a,b). Les valeurs t-SET correspondantes sont calculées pour des personnes endormies (taux métabolique = 0,7 met) avec une valeur d'isolation des pyjamas de 1,57 clo (pyjama à manches longues, dormeuses, en position allongée sur un matelas; Lin et Deng, 2008b), vitesse de l'air de 0,15 m/s et taux d'humidité relative de 50 %. Le Tableau 11 énumère les valeurs calculées de SET_n des villes canadiennes sélectionnées. Les températures mensuelles moyennes (T_{ma}) pour la période 1981-2010 sont tirées d'ECCC (2018a). Les limites de température inférieure de la plage du confort thermique adaptatif (T_{CL}) sont calculées selon la norme ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017). Il convient de noter que les valeurs de la température du confort adaptatif (T_{CL}) du Tableau 11 sont proches des valeurs minimales des températures extérieures quotidiennes utilisées lors des avertissements publics d'alerte de chaleur d'ECCC (Tableau 10).

Tableau 10. Critères d’alerte de chaleur d’ECCC pour les avertissements publics (T_{\max} et T_{\min} sont respectivement les températures quotidiennes maximale et minimale)

Région climatique	Définition des événements de chaleur extrême
Terre-Neuve-et-Labrador, Nouveau-Brunswick, Nouvelle-Écosse et Île-du-Prince-Édouard	Humidex ou $T_{\max} \geq 40^{\circ}\text{C}$ pendant plus de 1 heure
Québec, hors Nunavik	Humidex $\geq 40^{\circ}\text{C}$, et $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ pendant plus de 1 heure; ou $T_{\max} \geq 40^{\circ}\text{C}$
Ontario, extrême sud-ouest (comtés d’Essex et de Chatham-Kent)	$T_{\max} \geq 31^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours, et $T_{\min} \geq 21^{\circ}\text{C}$; ou Humidex $\geq 42^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Ontario, reste du Sud de l’Ontario (comprenant le district de Parry Sound)	$T_{\max} \geq 31^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours; ou Humidex $\geq 40^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Ontario, Nord	$T_{\max} \geq 29^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 18^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours; ou Humidex $\geq 36^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Manitoba, Sud	$T_{\max} \geq 32^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 16^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours; ou Humidex $\geq 38^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Manitoba, Nord	$T_{\max} \geq 29^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 16^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours; ou Humidex $\geq 34^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Saskatchewan, Sud (hors Meadow Lake, The Battlefords, Prince Albert et la Baie d’Hudson)	$T_{\max} \geq 32^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 16^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours; ou Humidex $\geq 38^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Saskatchewan, Nord et Centre (comprenant Meadow Lake, The Battlefords, Prince Albert et la Baie d’Hudson)	$T_{\max} \geq 29^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 14^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours; ou Humidex $\geq 34^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Alberta, extrême sud (comprenant Pincher Creek, Cardston, Lethbridge, Medicine Hat)	$T_{\max} \geq 32^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 16^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Alberta, reste de la province (comprenant les villes d’Edmonton, de Red Deer et de Calgary)	$T_{\max} \geq 29^{\circ}\text{C}$ et $T_{\min} \geq 14^{\circ}\text{C}$ pendant au moins deux jours
Colombie-Britannique, Metro Vancouver, Fraser Valley, Howe Sound, Whistler, Sunshine Coast uniquement.	La température moyenne d’aujourd’hui à 14:00 et la prévision pour demain $T_{\max} \geq 29^{\circ}\text{C}$ à l’aéroport international de Vancouver; ou La température moyenne d’aujourd’hui à 14:00 et la prévision pour demain $T_{\max} \geq 34^{\circ}\text{C}$ à l’aéroport d’Abbotsford.
Territoires du Nord-Ouest et Nunavut	Humidex ou $T_{\max} \geq 40^{\circ}\text{C}$

Tableau 11. Valeurs de référence de SET_n pour le sommeil dans les villes canadiennes sélectionnées.

Ville	Mai			Juin			Juillet			Août			Septembre		
	T _{ma}	T _{cl}	SET _n	T _{ma}	T _{cl}	SET _n	T _{ma}	T _{cl}	SET _n	T _{ma}	T _{cl}	SET _n	T _{ma}	T _{cl}	SET _n
St John's, T.-N.-L.	6,4	16,3	21,1	10,9	17,7	22,2	15,8	19,2	23,4	15,8	16,1	23,5	12,4	18,1	22,6
Charlottetown, Î.-P.-É.	9,2	17,2	21,8	14,5	18,8	23,1	18,7	20,1	24,2	18,7	18,3	24,1	14,1	18,7	23,0
Halifax, N.-É.	10,1	17,4	22,0	15,2	19,0	23,3	18,8	20,1	24,2	18,8	19,1	24,3	15,5	19,1	23,4
Moncton, N.-B.	10,7	17,6	22,2	16,0	19,3	23,5	19,5	20,3	24,3	19,5	19,0	24,3	14,5	18,8	23,1
Montréal, QC	12,4	18,1	22,6	17,4	19,7	23,9	19,8	20,4	24,4	19,8	18,7	24,2	14,1	18,7	23,0
Ottawa, ON	13,5	18,5	22,9	18,7	20,1	24,2	21,2	20,9	24,8	21,2	19,9	24,5	15,3	19,0	23,3
Toronto, ON	14,1	18,7	23,1	19,4	20,3	24,3	22,3	21,2	25,1	22,3	21,5	24,9	17,2	19,6	23,8
Winnipeg, MB	11,6	17,9	22,4	17	19,6	23,8	19,7	20,4	24,4	19,7	18,8	24,2	12,7	18,2	22,6
Saskatoon, SK	11,8	18,0	22,5	16,1	19,3	23,5	19	20,2	24,3	19	18,2	24,0	12,0	18,0	22,5
Calgary, AB	9,7	17,3	21,9	13,7	18,5	22,9	16,5	19,4	23,6	15,8	19,2	23,4	11,0	17,7	22,2
Vancouver, C.-B.	12,8	18,3	22,7	15,7	19,2	23,4	18	19,9	24	18	19,9	24,0	14,9	18,9	23,2

8.5 Caractérisation des événements de chaleur extrême

De la même manière que les événements de surchauffe intérieurs, les EHE extérieurs se caractérisent par trois attributs :

Durée : mesurée en fonction du nombre de jours d'événements de chaleur extérieurs quotidiens en continu.

Gravité : mesurée en °C-h, et indique l'amplitude de l'EHE, donnée par l'équation (1), évaluée dans les conditions extérieures.

Intensité : mesurée en °C et calculée comme le rapport entre la gravité et la durée (exprimée en heures).

Conformément à cette définition, plusieurs types d'EHE peuvent survenir au cours de la saison estivale. On distingue trois principaux types : longs, intenses et graves. D'autres combinaisons sont également possibles, comme longs et intenses, longs et graves, ou encore intenses et graves.

8.6 Procédure d'extraction des années aux conditions météorologiques estivales extrêmes

Selon l'approche de Laouadi et coll. (2020a), les événements de chaleur extrême et leurs années aux conditions météorologiques estivales extrêmes de référence (RSWY) associées sont extraits d'un ensemble de données climatiques sur 31 ans afin de tenir compte de tous les types d'événements de chaleur extrême de la période historique (1986 - 2016) et des futures périodes des projections climatiques. La période estivale est fixée de mai à septembre. La procédure d'extraction de tels événements de chaleur extrême et de leurs RSWY associées est la suivante :

1. Les événements de chaleur extrême (ou vagues de chaleur) annuels sur une période de 31 ans sont identifiés en se basant sur les équations (1) à (3), puis triés par ordre décroissant en fonction de leur durée, de leur intensité et de leur gravité. Les valeurs maximales des caractéristiques des vagues de chaleur sont affectées chaque année de l'ensemble de données sur 31 ans;
2. La période de retour des vagues de chaleur est fixée à 15,5 ans, ce qui correspond à la deuxième année extrême de 31 ans;
3. La courbe cumulative de fréquence des valeurs maximales de durée, d'intensité et de gravité est tracée et ajustée à l'aide de fonctions de distribution appropriées (outils statistiques), comme la distribution des valeurs extrêmes généralisées (VEG), la distribution de Gumbel, ou toute autre fonction convenable (remarque : aucune fonction unique ne satisfait aux distributions de la valeur maximale). Les années extrêmes sont ensuite choisies si leurs périodes de retour calculées sont proches de la valeur choisie de 15,5 ans. Dans la plupart des cas, les années extrêmes sont celles du deuxième rang par leurs valeurs maximales quant à la durée, à l'intensité et à la gravité. Si les valeurs de la fréquence des années du premier rang sont identiques ou très proches, celle qui aura la valeur de gravité la plus élevée sera choisie pour représenter la deuxième année extrême. De la même façon, si les années extrêmes de deuxième rang ont des valeurs identiques en termes de fréquence, celle qui aura la valeur de gravité la plus élevée sera choisie.

Le Tableau 12 énumère les RSWY avec des vagues de chaleur extrême obtenues à l'aide des données d'observation climatiques historiques pour la période 1986 - 2016 dans les villes canadiennes sélectionnées.

Tableau 12. RSWY avec trois types de vagues de chaleur extrême pour la période historique (1986 - 2016) dans les villes canadiennes sélectionnées

Ville	Vagues de chaleur extrêmement longues	Vagues de chaleur extrêmement intenses	Vagues de chaleur extrêmement graves
St John's, T.-N.-L.	1990	1990	1990
Charlottetown, Î.-P.-É.	2002	2002	2002
Halifax, N.-É.	1988	1988	1988
Moncton, N.-B.	1997	2013	2002
Montréal, QC	2010	2010	1987
Ottawa, ON	2010	2006	2010
Toronto, ON	1987	2006	2011
Winnipeg, MB	2005	2007	1995
Saskatoon, SK	2002	1988	1988
Calgary, AB	2007	2007	2007
Vancouver, C.-B.	1989	1989	1989

8.7 Cartes des vagues de chaleur pour une exposition extérieure

La procédure antérieure d'extraction des vagues de chaleur extrême à partir de 31 ans de données climatiques est également utilisée pour élaborer des cartes spatiales des vagues de chaleur pour une exposition extérieure, et les villes canadiennes sélectionnées. Ces cartes des vagues de chaleur s'avèrent très importantes pour identifier les emplacements présentant un risque potentiel pour la santé humaine, ainsi que pour planifier des interventions ultérieures d'alerte de chaleur dans ces lieux. Pour l'ensemble des données d'observation historiques (1986 - 2016), la durée, l'intensité et la gravité des vagues de chaleur extrême ainsi que le nombre annuel de vagues de chaleur extrême sont tracés en valeurs absolues afin d'élaborer des cartes de vagues de chaleur pour les lieux déterminés au Canada. Les valeurs moyennes de la durée, de l'intensité et de la gravité des vagues de chaleur estivales pour l'intégralité de la période sont aussi tracées. Cependant, pour les ensembles de données climatiques simulées des futures projections climatiques, les vagues de chaleur extrême sont calculées pour chacune des 15 séries, puis les valeurs de ces vagues de chaleur sont moyennées sur les 15 séries. Les résultats de la moyenne des 15 séries des cartes de vagues de chaleur sont présentés sous la forme du pourcentage d'augmentation sur la période historique simulée (1986 - 2016). Des détails supplémentaires à ce sujet peuvent être trouvés dans Laouadi et coll. (2020c).

8.7.1 Période d'observation historique

La

Figure 15 illustre les cartes d'exposition à la chaleur en termes d'indices de durée, d'intensité et de gravité des vagues de chaleur extrême, et le nombre annuel de vagues de chaleur en été pour les données climatiques d'observation historiques. La

Figure 16 représente les valeurs moyennes des vagues de chaleur estivales sur la période (1986 - 2016). Les résultats montrent que les villes d'Ottawa, de Toronto, de Montréal et de Winnipeg sont actuellement concernées par des chaleurs extrêmes supérieures à celles d'autres villes. Pour ces villes, les indices de gravité et d'intensité des vagues de chaleur sont assez élevés, et les personnes soumises à une exposition extérieure doivent boire de l'eau en permanence afin de se réhydrater, et ne pas rester exposées pendant une longue période (> 4 heures) afin d'éviter tout problème de santé lié à la chaleur.

8.7.2 Projections climatiques futures

Les

Figure 17 et

Figure 18 illustrent les cartes des vagues de chaleur pour la projection climatique future du réchauffement planétaire du milieu du siècle de 2,0°C (2034 - 2064). Par rapport à la période historique (

Figure 15 et

Figure 16), les vagues de chaleur sont plus longues, plus intenses et plus graves. En termes de gravité des vagues de chaleur extrême, le changement le plus important concerne la ville de Calgary, où l'indice de gravité augmente de plus de 600 % (par rapport à la période historique simulée), suivie par Toronto et St. John's (> 527 %), Charlottetown (> 463 %), Saskatoon (> 357 %), Vancouver (> 296 %), Halifax et Moncton (> 247 %), puis Ottawa, Montréal et Winnipeg (> 157 %). De même, la durée et l'intensité des vagues de chaleur extrême augmentent respectivement de 82 % (Winnipeg) à 400 % (St. John's), et de 31 % (Montréal) à 515 % (St. John's). Néanmoins, les changements affectant les valeurs moyennes des caractéristiques des vagues de chaleur, sur l'intégralité de la période climatique, sont moins dramatiques que les valeurs extrêmes. Les changements en matière d'indices de durée, d'intensité et de gravité moyennes vont de 4 % (St. John's) à 59 % (Toronto), de 49 % (Ottawa) à 97 % (Halifax), et de 64 % (St. John's) à 212 % (Toronto), respectivement.

Les Figure 19 et

Figure 20 illustrent les cartes des vagues de chaleur pour la projection climatique future à la fin du 21^e avec un réchauffement planétaire de 3,0°C (2053 - 2083). La tendance est similaire aux projections du milieu du siècle, avec des vagues de chaleur de plus en plus longues, intenses et graves. En termes de gravité des vagues de chaleur extrême, le changement le plus important

concerne la ville de Charlottetown, où l'indice de gravité augmente de plus de 1700 %, suivie par Calgary et St. John's (> 1412 %), Toronto (> 1223 %), Saskatoon, Moncton, Halifax et Vancouver (> 583 %), puis Montréal, Ottawa et Winnipeg (> 268 %). De même, la durée et l'intensité des vagues de chaleur extrême augmentent respectivement de 130 % (Winnipeg) à 489 % (Charlottetown), et de 47 % (Montréal) à 1315 % (St. John's). Néanmoins, les changements affectant les valeurs moyennes des caractéristiques des vagues de chaleur, sur l'intégralité de la période climatique, sont moins dramatiques que les valeurs extrêmes. Les changements en matière d'indices de durée, d'intensité et de gravité moyennes vont de 8 % (St. John's) à 127 % (Toronto), de 78 % (Winnipeg) à 168 % (Charlottetown), et de 151 % (St. John's) à 525 % (Toronto), respectivement.

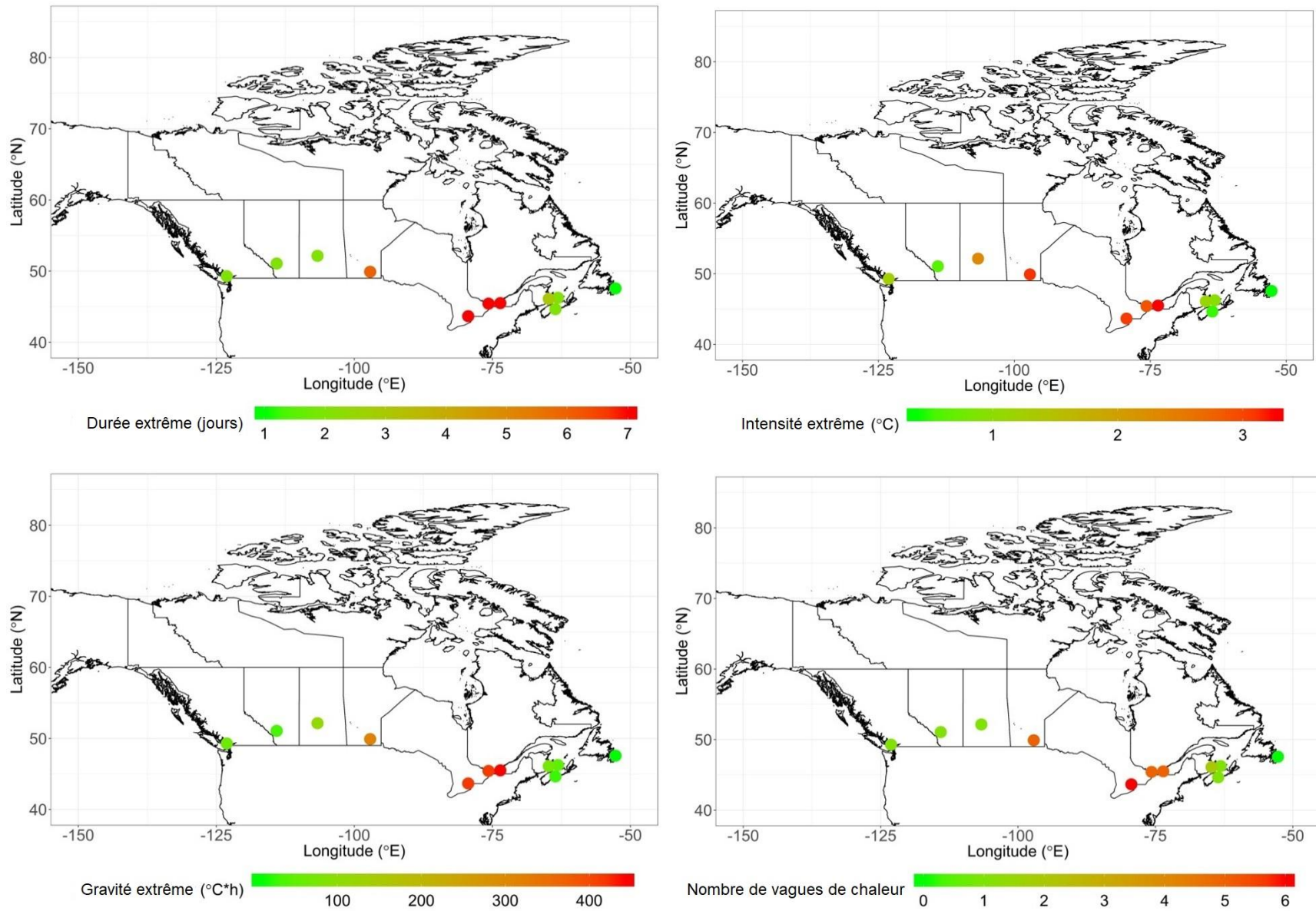


Figure 15. Cartes des caractéristiques des vagues de chaleur extrême (données climatiques observées historiques)

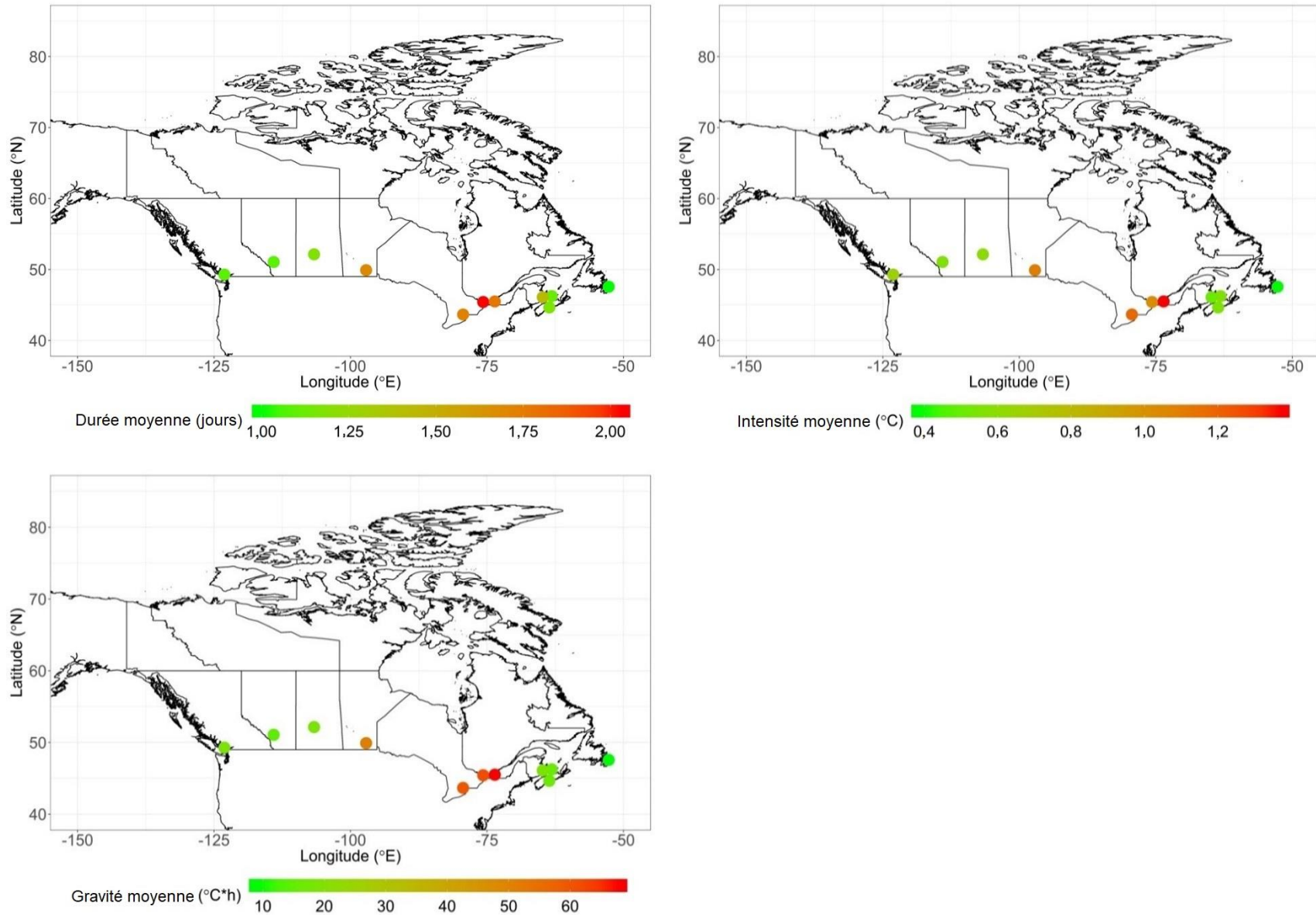


Figure 16. Cartes des caractéristiques moyennes de toutes les vagues de chaleur (données climatiques observées historiques)

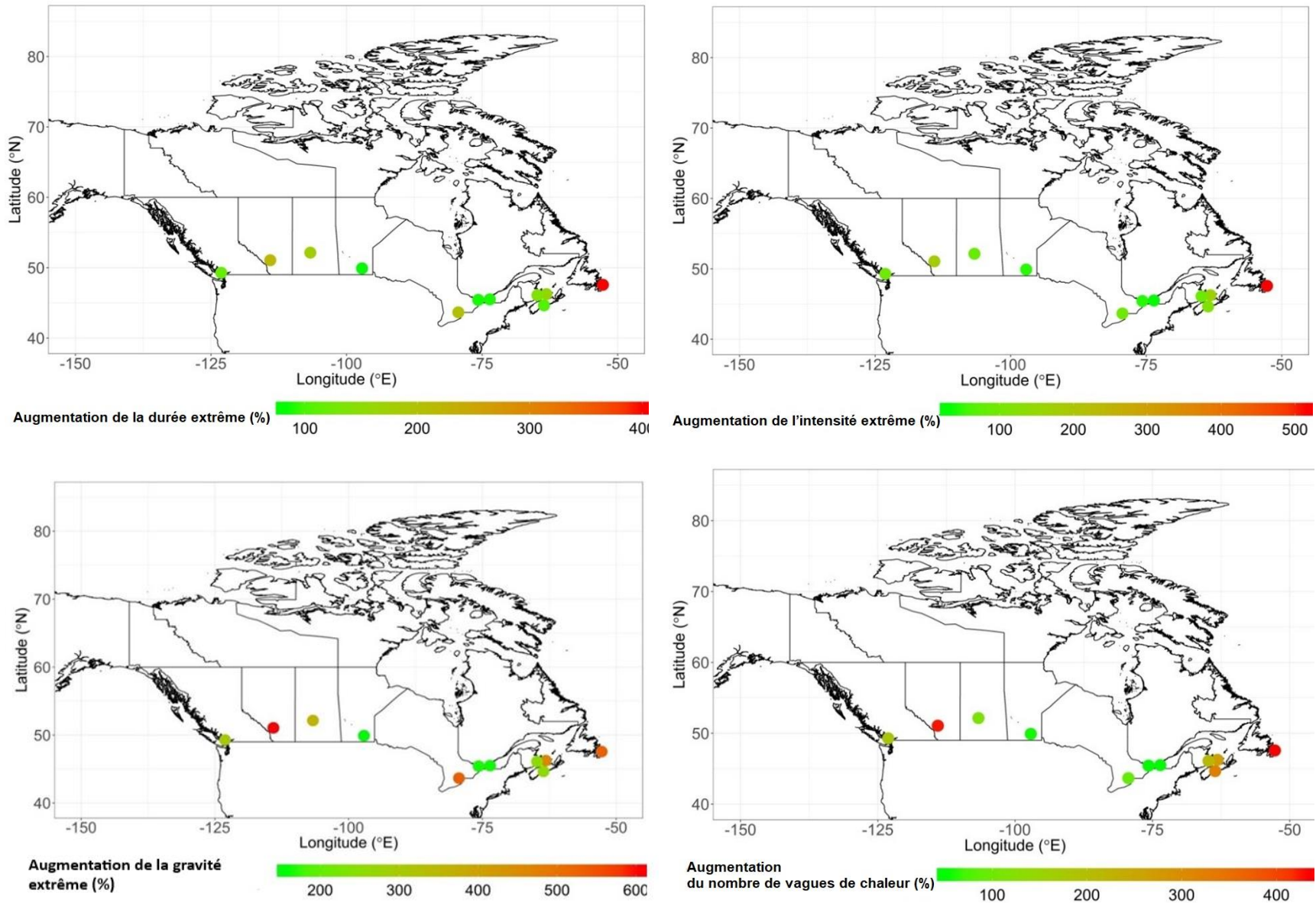


Figure 17. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques des vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 2,0°C (2034 - 2064)

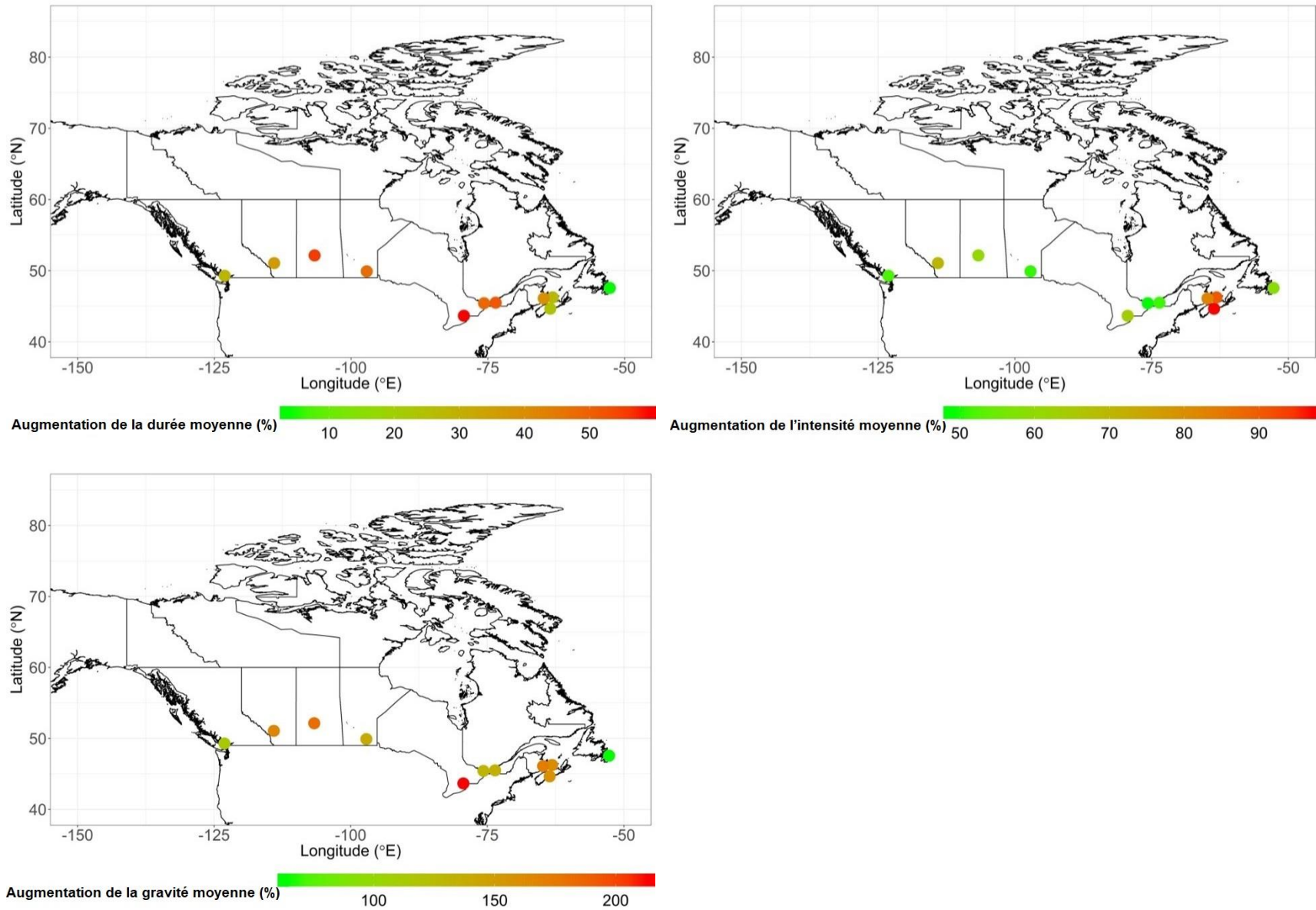


Figure 18. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques moyennes de toutes les vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 2,0°C (2034 - 2064)

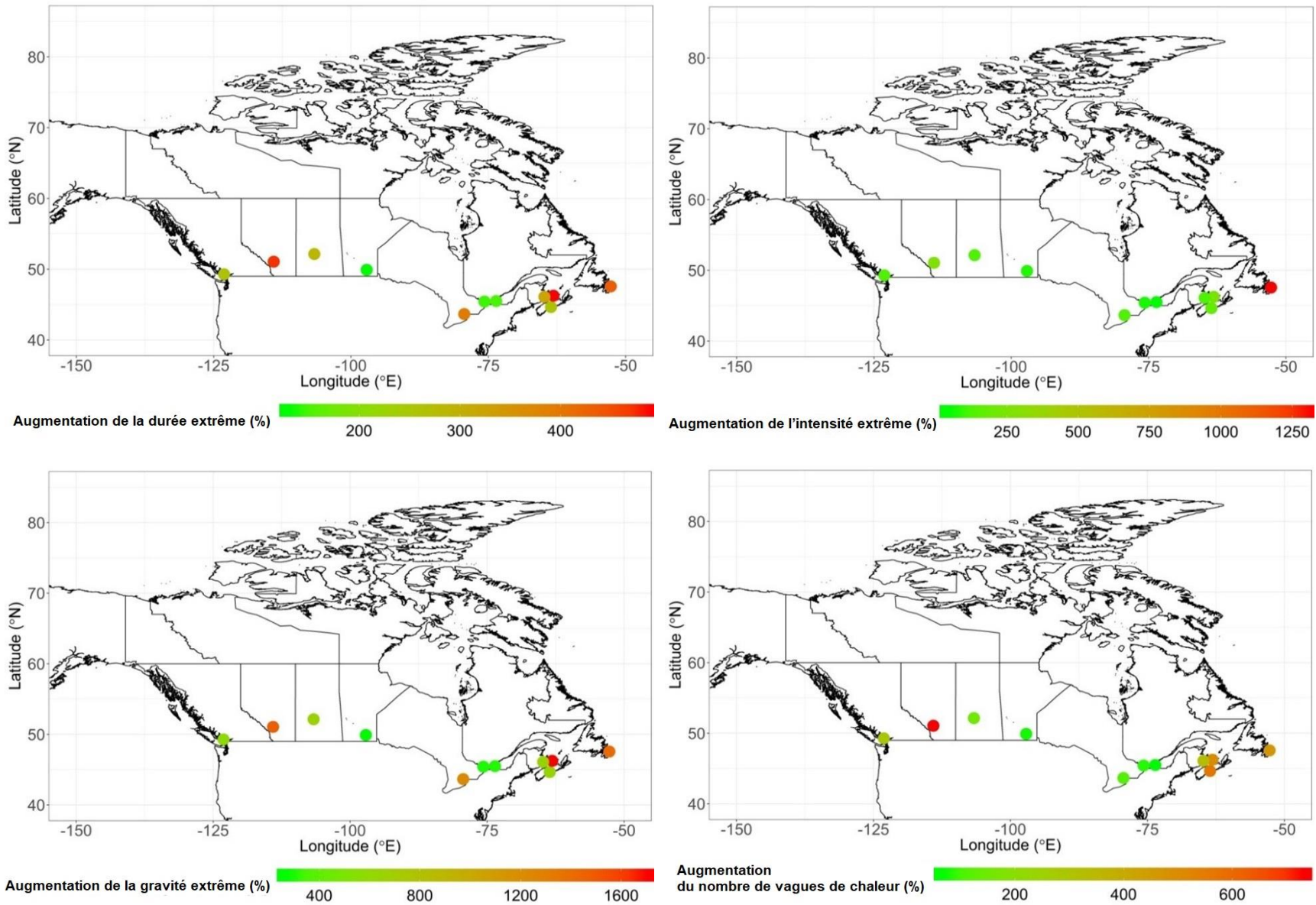


Figure 19. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques des vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 3,0°C (2053 - 2083)

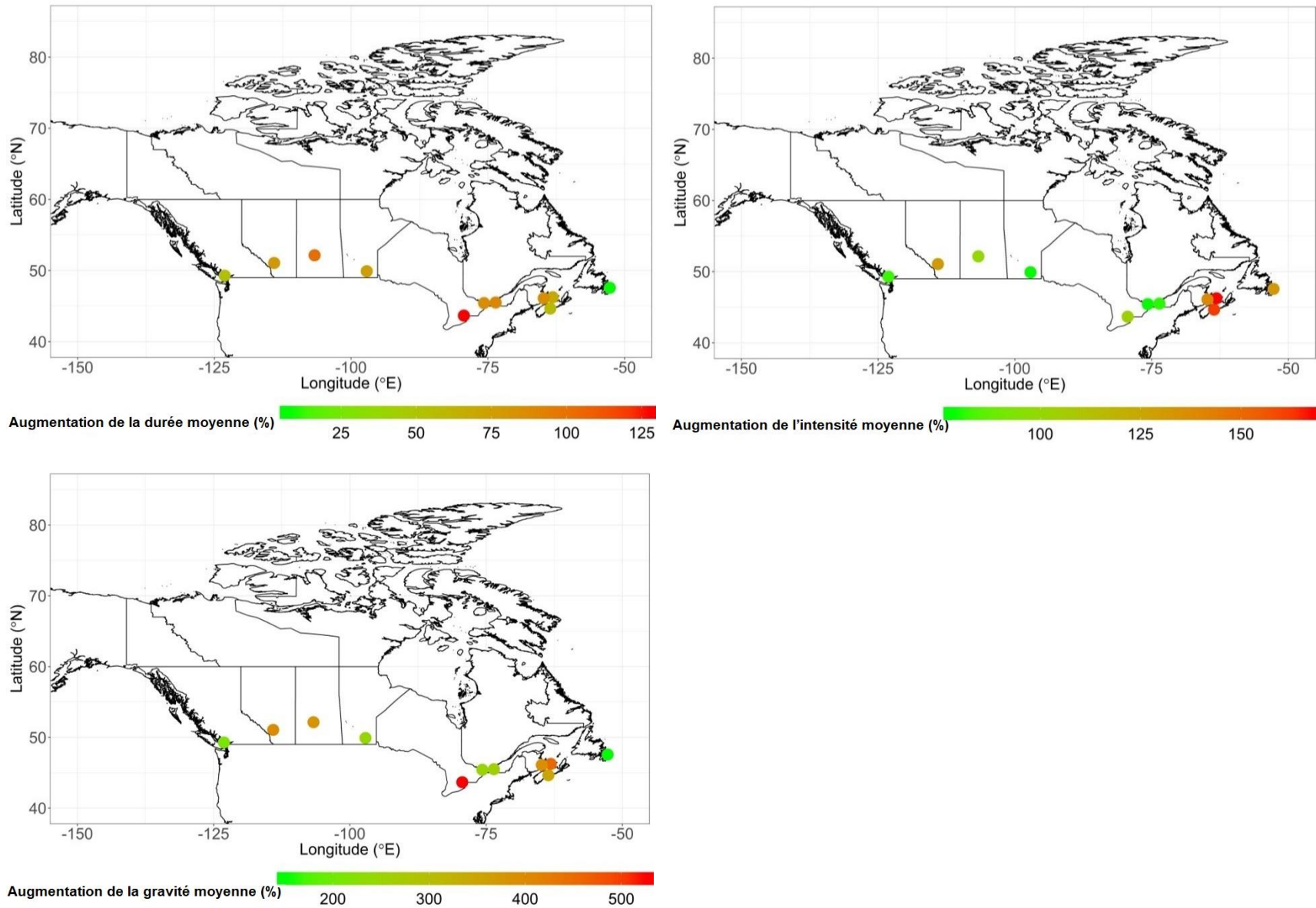


Figure 20. Cartes de la variation relative (%) des caractéristiques moyennes de toutes les vagues de chaleur (projection climatique future) - réchauffement planétaire de 3,0°C (2053 - 2083)

9 ÉVALUATION DE LA SURCHAUFFE

Cette section détaille la procédure et les exigences permettant d'évaluer le risque de surchauffe dans les bâtiments

9.1 Procédure d'évaluation

La surchauffe dans les bâtiments peut être évaluée en utilisant la simulation informatique des bâtiments ou la surveillance sur place continue des conditions intérieures au cours de la période estivale. La procédure de simulation informatique des bâtiments comprend les étapes suivantes :

1. Élaboration d'un modèle de simulation de bâtiment. L'espace d'un bâtiment doit être compartimenté afin d'avoir des zones thermiques séparées pour l'occupation de la journée et de la nuit. Les zones thermiques doivent être associées aux espaces occupés par le même groupe d'occupants pendant une journée d'exposition complète. Dans les bâtiments résidentiels par exemple, les occupants vivent dans la salle de séjour au cours de la journée, et dorment dans les chambres la nuit. La salle de séjour et les chambres sont alors identifiées comme des espaces thermiques différents.
2. Pour un emplacement géographique donné, extraction des années aux conditions météorologiques estivales (RSWY) couvrant les trois types d'événements de chaleur extrême (longs, intenses, graves) à l'aide de la procédure de Laouadi et coll. (2020a) et de la Section 8. D'autres types de données météorologiques estivales pertinents pour l'analyse de la surchauffe peuvent également être utilisés.
3. Calcul des conditions intérieures pour l'année entière ou la saison estivale (température de l'air, température moyenne radiante, humidité relative, vitesse de l'air) à l'aide de l'un des types de RSWY de l'étape 2.
4. Post-traitement des résultats de simulation afin de calculer les valeurs horaires de t-SET de chaque zone thermique occupée du bâtiment, à l'aide des données de référence des occupants fournies dans le Tableau 5.
5. Évaluation des équations (1) à (3) et détermination des événements de surchauffe possibles pour chaque groupe d'espaces occupé par les mêmes occupants au cours de la journée et de la nuit (p. ex., salle de séjour et chambres) sur toute la période estivale, et calcul des indices de gravité et d'intensité (équations 1 à 3).
6. Pour chaque groupe d'espaces occupé (avec les mêmes occupants), sélection des événements de surchauffe extrêmes (à partir de l'étape 5) dont les valeurs de gravité et d'intensité sont les plus élevées.

Application des critères de surchauffe aux événements de surchauffe extrêmes (intenses et graves) de l'étape 6, afin de déterminer si un événement de surchauffe s'est produit, étant donné que la valeur de l'intensité ou celle de la gravité a dépassé les limites seuils spécifiées précédemment dans les

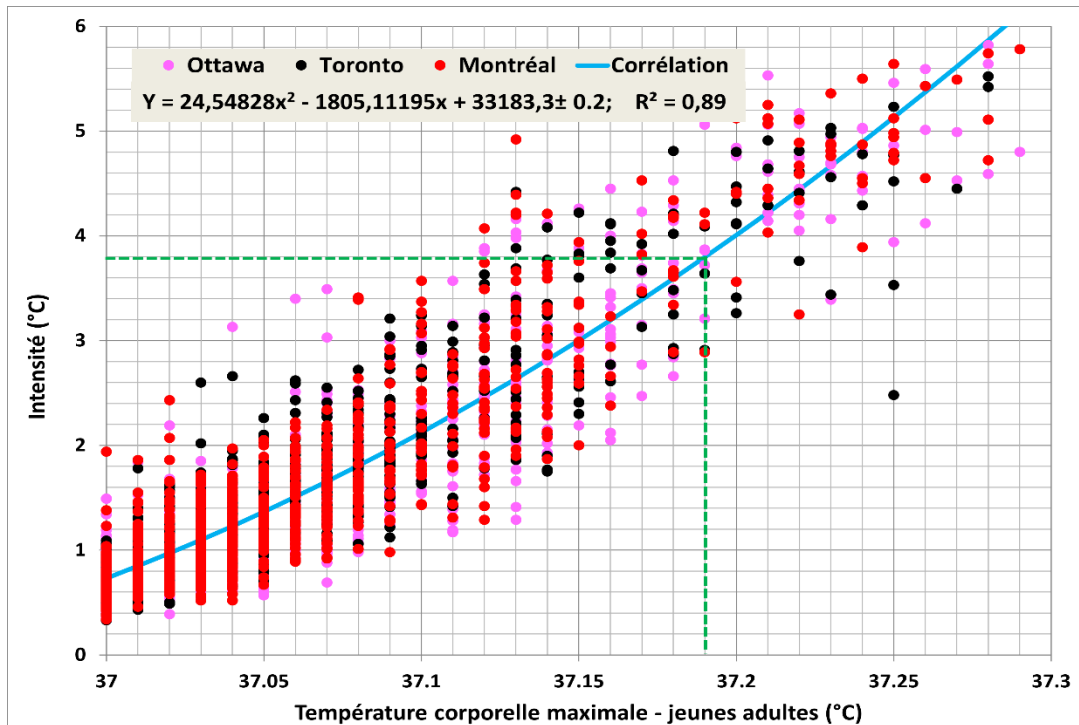


Figure 10 à

7. Figure 13.
8. Application des étapes 3 à 7 à tout type supplémentaire de RSWY à l'emplacement étudié.
9. Déclaration de la surchauffe dans le bâtiment, si les critères de surchauffe sont satisfaits pour n'importe quel type de RSWY utilisé à l'emplacement étudié.

La procédure précédente peut également être appliquée avec une surveillance sur place continue des prévisions des conditions météorologiques locales au cours de l'été. Dans ce cas, les données météorologiques extrêmes de l'étape 2 doivent être remplacées par les données météorologiques de surveillance ou prévues à l'emplacement du bâtiment. De même, si la surveillance sur place comprend également les conditions intérieures, les conditions intérieures calculées de l'étape 3 devront être remplacées par les conditions intérieures mesurées afin d'évaluer la surchauffe.

9.2 Exigences relatives à la simulation informatique

9.2.1 Logiciel de simulation

Le logiciel de simulation permettant d'évaluer la surchauffe dans les bâtiments devra être en mesure :

- D'exploiter les données météorologiques horaires (ou subhoraires) locales d'une année entière ou de la période estivale. Les données météorologiques doivent comprendre la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire (diffus et global), ainsi que la vitesse et le sens du vent;
- De traiter les espaces des bâtiments en tant que zones thermiques multiples;

- De modéliser la ventilation naturelle à l'aide des réseaux de flux d'air ou d'autres méthodes appropriées;
- De produire des données horaires (ou subhoraires) des conditions intérieures, utilisées dans le cadre de l'analyse de la surchauffe

9.2.2 Modèle de simulation de bâtiment

Des modèles de bâtiments représentatifs (généralisés) peuvent être utilisés pour mener l'analyse de surchauffe générale dans les types de bâtiments sélectionnés comme les bâtiments résidentiels, les écoles, les bureaux, etc. Des modèles de bâtiments réels peuvent également être utilisés pour analyser la surchauffe dans des bâtiments particuliers.

9.2.3 Étalonnage d'un modèle de simulation de bâtiment

Les modèles de simulation de bâtiment doivent être étalonnés avant de commencer l'analyse de la surchauffe. L'étalonnage consiste à paramétrer les principales données d'entrée de simulation sélectionnées, afin de réduire le risque d'erreur entre les données de simulation et le cas de référence. Les approches d'étalonnage de bâtiment peuvent être regroupées par niveaux de précision : simple, intermédiaire et détaillé. L'approche simple consiste à comparer l'intensité énergétique annuelle en termes de chauffage, de refroidissement et d'énergie totale du modèle de simulation, avec les données publiées de bâtiments similaires situés dans la même zone. Cette approche est utilisée avec des modèles de bâtiments représentatifs (généralisés) pour lesquels aucune donnée de mesure réelle n'est disponible. L'approche intermédiaire compare la demande énergétique horaire ou mensuelle d'électricité et de gaz du modèle de simulation de bâtiment avec les données énergétiques calculées dans des bâtiments réels. C'est le cas lorsque le modèle de simulation de bâtiment est la représentation d'un bâtiment réel. Les données énergétiques calculées peuvent être extraites des compteurs d'énergie du bâtiment réel ou obtenues auprès de sociétés de distribution. Les données météorologiques extérieures de l'emplacement du bâtiment doivent être disponibles (mesure locale ou données de l'aéroport le plus proche) afin de pouvoir simuler le bâtiment pour la période sur laquelle la comparaison doit être effectuée. La ligne directrice 14 de l'ASHRAE (2014) doit être utilisée pour procéder à la mesure énergétique dans les bâtiments réels, et pour étalonner le modèle de simulation d'un bâtiment. L'approche détaillée compare la demande énergétique horaire d'électricité et de gaz et les températures intérieures du modèle de simulation avec les données de surveillance provenant du bâtiment réel. C'est le cas lorsque le modèle de simulation de bâtiment est la représentation d'un bâtiment réel. Les conditions intérieures et extérieures du bâtiment réel doivent être surveillées et disponibles pendant toute la période de comparaison des données.

9.3 Surveillance sur place

La surveillance sur place peut comprendre la surveillance de l'environnement extérieur, de l'environnement intérieur, ou des deux. La surveillance de l'environnement extérieur (similaire à la prévision des conditions climatiques extérieures) est traitée de la même manière que dans la méthode de simulation de bâtiment vue précédemment. La surveillance des conditions

intérieures seules ou combinées aux conditions extérieures se conforme aux instructions figurant dans les sections suivantes.

9.3.1 Protocole de mesure

Le protocole de mesure doit comprendre les variables suivantes :

- Température intérieure moyenne de chaque zone thermique du bâtiment;
- Humidité relative intérieure moyenne de chaque zone thermique du bâtiment;
- Température radiante (ou mesurée par thermomètre globe) intérieure moyenne de chaque zone thermique du bâtiment, mesurée à l'emplacement des occupants dans l'espace et à une hauteur en position assise (1,1 m au-dessus du sol), conformément à la norme ASHRAE 55 (2017);
- Vitesse de l'air intérieur moyenne de chaque zone thermique du bâtiment, mesurée à l'emplacement des occupants dans l'espace et à une hauteur en position assise (1,1 m au-dessus du sol) conformément à la norme ASHRAE 55 (2017);
- Type d'occupant (jeunes ou personnes âgées) de chaque espace du bâtiment occupé;
- Vêtements types portés au cours de la journée et de la nuit (pendant le sommeil) durant la période de surveillance;
- Niveau d'activité des occupants au cours de la journée durant la période de surveillance.
- Température et humidité relative extérieures (**facultatif**) de l'emplacement du bâtiment, mesurées en un lieu à l'écart de l'influence du bâtiment (p. ex., à une hauteur suffisante au-dessus du toit des bâtiments avoisinants);
- Vitesse et sens du vent (**facultatif**) de l'emplacement du bâtiment, mesurés à une hauteur de 10 m dans un flux d'air libre, ou en un point à l'écart de l'influence du bâtiment;
- Rayonnement solaire extérieur (diffus et global) (**facultatif**) de l'emplacement du bâtiment, mesuré en un point à l'écart de l'influence du bâtiment. Les données provenant de l'aéroport le plus proche peuvent également être utilisées.

Il convient de noter que les mesures facultatives de ce protocole ne sont utilisées qu'à des fins d'information ou d'étalonnage du modèle de simulation de bâtiment représentant un bâtiment réel. La mesure des conditions extérieures et intérieures permet généralement de valider ou d'étalonner un modèle de simulation de bâtiment, afin de mener une analyse ultérieure de la surchauffe dans d'autres lieux, ou faisant appel à des données météorologiques différentes.

9.3.2 Zonage thermique des espaces occupés

Les espaces intérieurs sous surveillance doivent être séparés en zones thermiques selon l'usage des espaces du bâtiment qu'en font les occupants au cours d'une exposition complète d'une journée. Si les espaces du bâtiment occupés au cours de la journée diffèrent de ceux occupés au cours de la nuit pour dormir, ils devront alors être considérés comme des zones thermiques différentes. Si les occupants utilisent plusieurs espaces au cours de la journée, ces espaces doivent également être considérés comme des zones thermiques différentes. Tous les espaces occupés par un même groupe d'occupants au cours d'une journée complète d'exposition sont pris en compte dans le cadre d'une analyse de la surchauffe.

10 MESURES D'ATTÉNUATION POUR RÉDUIRE LE RISQUE DE SURCHAUFFE

Les mesures d'atténuation visant à réduire éventuellement le risque de surchauffe dans les bâtiments sont énumérées ci-dessous. Plusieurs mesures peuvent cependant devoir s'appliquer simultanément afin de prévenir la surchauffe.

10.1 Types de fenêtres

Le type de vitrage des fenêtres a une influence sur les gains en matière de chaleur solaire de l'intérieur du bâtiment, en particulier pendant les jours ensoleillés. Les fenêtres à vitrage teinté ou dont le revêtement est spectralement sélectif peuvent réduire ces gains de chaleur. En général, les fenêtres dont la valeur du coefficient d'apport par rayonnement solaire est faible ($CARS < 0,4$) répondent à ces exigences, mais entraînent une pénalité énergétique en hiver lorsque les gains de chaleur solaire sont souhaitables.

10.2 Dispositifs d'ombrage

Les dispositifs d'ombrage de fenêtres peuvent sensiblement réduire les gains de chaleur solaire provenant des fenêtres. À cet effet, les dispositifs d'ombrage extérieurs sont les plus efficaces, alors que les dispositifs d'ombrage intérieurs ont un effet limité sur la réduction des gains de chaleur.

10.3 Ventilation naturelle

Les ventilations naturelles sont commandées par la vitesse du vent et/ou l'effet cheminée, et s'activent lorsque la température extérieure est plus faible que la température intérieure. La ventilation naturelle apporte ainsi de l'air extérieur frais à l'intérieur, et évacue les gains de chaleur interne, abaissant de ce fait les températures intérieures. Pour assurer une ventilation naturelle, il est possible d'ouvrir des fenêtres sur différentes façades d'un bâtiment, ou de créer un déplacement d'air des étages inférieurs vers les étages supérieurs en combinant l'effet cheminée et l'action du vent. La ventilation transversale, par laquelle l'air extérieur entre par une façade et en ressort par la façade opposée, constitue le moyen de ventilation naturelle le plus efficace. L'intensité du vent et la hauteur du bâtiment peuvent aussi jouer un rôle important pour obtenir cet effet de refroidissement naturel majeur.

10.4 Ventilation au moyen de ventilateurs

La ventilation au moyen de ventilateurs fait appel à des ventilateurs de travail, portables ou au plafond afin de créer un déplacement d'air autour du corps d'un occupant d'un bâtiment, de retirer la chaleur du corps, ainsi que de créer un effet de refroidissement. La ventilation au moyen de ventilateurs n'a cependant aucun impact sur la température intérieure. Un effet de

refroidissement de quelques degrés Celsius peut être obtenu au niveau du corps de l'occupant en fonction de la vitesse de l'air produite par le ventilateur.

10.5 Ventilation mécanique

La ventilation mécanique utilise des ventilateurs dédiés pour faire circuler l'air extérieur à l'intérieur (ventilation par alimentation ou ventilateur récupérateur de chaleur) ou pour évacuer vers l'extérieur l'air intérieur (ventilation aspirante) afin d'abaisser la température intérieure, si la température extérieure est plus fiable que la température intérieure. La ventilation mécanique peut être activée en permanence (p. ex., ventilateur récupérateur de chaleur) ou uniquement au cours de la nuit lorsque la température extérieure est généralement inférieure à la température intérieure. Un débit de circulation d'air suffisant est requis pour évacuer la chaleur intérieure et créer l'effet de refroidissement.

10.6 Refroidissement mécanique

Le refroidissement mécanique par conditionneurs d'air s'avère être la méthode la plus efficace pour contrôler la température intérieure. Le refroidissement mécanique représente un coût pour les propriétaires de bâtiments ou les utilisateurs, et constitue donc le dernier recours après la mise en œuvre de mesures de refroidissement passif. Cette option n'est en outre d'aucune utilité en cas de coupure d'électricité.

10.7 Enveloppes de bâtiment réfléchissantes

L'installation de revêtements sur le bardage de l'enveloppe du bâtiment, y compris des toitures réfléchissant la lumière du soleil, peut réduire considérablement la transmission des gains de chaleur solaire à travers l'enveloppe vers les espaces intérieurs, en particulier au cours des jours ensoleillés. L'efficacité de ces mesures dépend cependant du niveau d'isolation en dessous du bardage ou de la toiture. Le recours à un niveau d'isolation élevé au niveau des enveloppes réduit l'efficacité de cette mesure.

Maisons individuelles



11 SURCHAUFFE DANS LES MAISONS INDIVIDUELLES

La méthodologie d'évaluation de la surchauffe présentée dans les Sections 6 et 9 a été appliquée à des bâtiments résidentiels dans les conditions climatiques actuelles et pour les projections à Ottawa (Ontario). La procédure de simulation de bâtiment a été utilisée pour obtenir les résultats de la surchauffe dans des maisons individuelles types construites selon deux types de constructions (légère et moyenne) et quatre pratiques de construction locales : bâtiment ancien (années 1980), bâtiment modernisé conformément aux exigences du code national du bâtiment (CNB) en vigueur (CNRC, 2015), bâtiment actuel (ou neuf) conformément au CNB, et bâtiment à énergie nette zéro (ENZr) (avec une augmentation de 30 % des niveaux d'isolation des enveloppes de bâtiment). Le modèle de maison type (voir Figure 76, Annexe A) comprend quatre zones thermiques : sous-sol non occupé, premier étage avec la salle de séjour et la cuisine où les occupants passent du temps avant d'aller dormir, deuxième étage avec les chambres où les occupants dorment, et grenier. Les détails de la procédure de simulation et les caractéristiques des maisons figurent dans l'Annexe A. Les sections suivantes présentent les résultats relatifs à la surchauffe pour les mesures d'atténuation choisies, comme décrit dans la Section 10.

11.1 Effet des types de fenêtres

Figure 21 illustre la gravité de la surchauffe calculée dans les conditions climatiques actuelles pour différents types de fenêtres (voir Tableau 21) de maisons individuelles de construction légère (bâtiments anciens, modernisés, actuels et ENZr). Les fenêtres sont protégées par des stores intérieurs, fermés en été et ouverts le reste du temps. Selon les critères de surchauffe donnés dans la Section 6, toutes les maisons sont surchauffées (gravité > 230 °C·h). Les maisons anciennes et mal isolées présentent cependant un risque largement inférieur de surchauffe. Elles sont suivies par les maisons modernisées, les maisons neuves (bâtiments actuels), puis les futures maisons ENZr. Les fenêtres dont la valeur du coefficient d'apport par rayonnement solaire (CARS) est faible abaissent le risque de surchauffe.

Les fenêtres à double vitrage teinté en vert à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité (Dgreen+eL; CARS = 0,30) ont donné les meilleurs résultats, et sont en mesure de réduire le risque de surchauffe de 57 % par rapport aux fenêtres à double vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Dclear+eH; CARS = 0,67), suivies des fenêtres à double vitrage clair à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité (Dclear+eL; CARS = 0,42). Ironie du sort, les fenêtres à triple vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Tclear+eH; CARS = 0,57) entraînent un risque de surchauffe largement supérieur, en particulier dans les maisons ENZr.

La

Figure 22 illustre l'effet du type de fenêtre protégée par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour (premier étage) pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans une maison de construction légère actuelle. Les fenêtres dont les valeurs CARS sont faibles (comme Dgreen+eL et Dclear+eL) peuvent réduire les températures intérieures jusqu'à

4,5°C. Les fenêtres dont les valeurs CARS sont élevées (comme Dclear+eH, Tclear+eH) présentent les pics de température intérieure les plus importants (46,5°C).

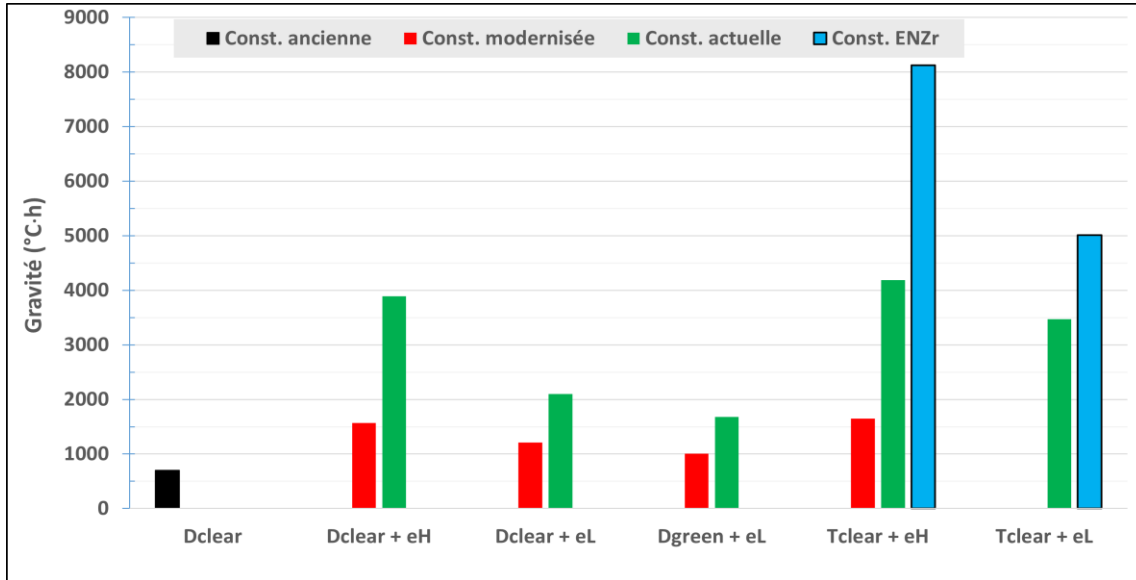


Figure 21. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles, bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

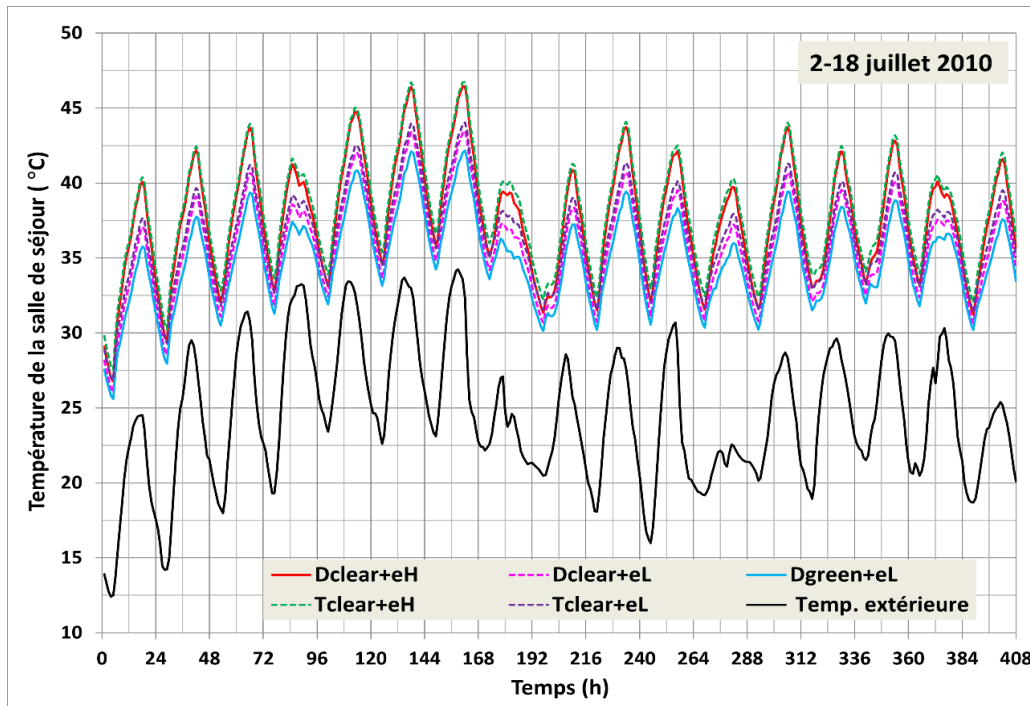


Figure 22. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons individuelles de construction légère actuelle

La

Figure 23 illustre l’effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement des maisons. Par opposition à la surchauffe, les fenêtres à vitrage teinté (Dgreen+eL) ont entraîné la consommation de chauffage la plus élevée (environ 11 % de plus que les fenêtres à double vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité, Dclear+eH). Les fenêtres à triple vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Tclear+eH) ont entraîné la consommation de chauffage la plus faible (environ 8 % par rapport à Dclear+eH).

Les fenêtres sont habituellement choisies de manière à réduire la consommation énergétique ou le coût énergétique annuel(le) des maisons, mais ce choix augmenterait le risque de surchauffe, en particulier dans les maisons où la ventilation naturelle est limitée (les fenêtres restant la majeure partie du temps fermées en été pour diverses raisons (intimité, réduction du bruit provenant de l’extérieur, sécurité, etc.)). Considérant que la santé et la sécurité des occupants du bâtiment sont primordiales, la modernisation ou la conception de nouvelles maisons doit à la fois tenir compte de la réduction de la consommation énergétique de la maison, mais aussi du risque de surchauffe, en mettant en œuvre des mesures passives ou actives efficaces, comme la ventilation à l’échelle de la maison tout entière; ce point est abordé ultérieurement dans le document.

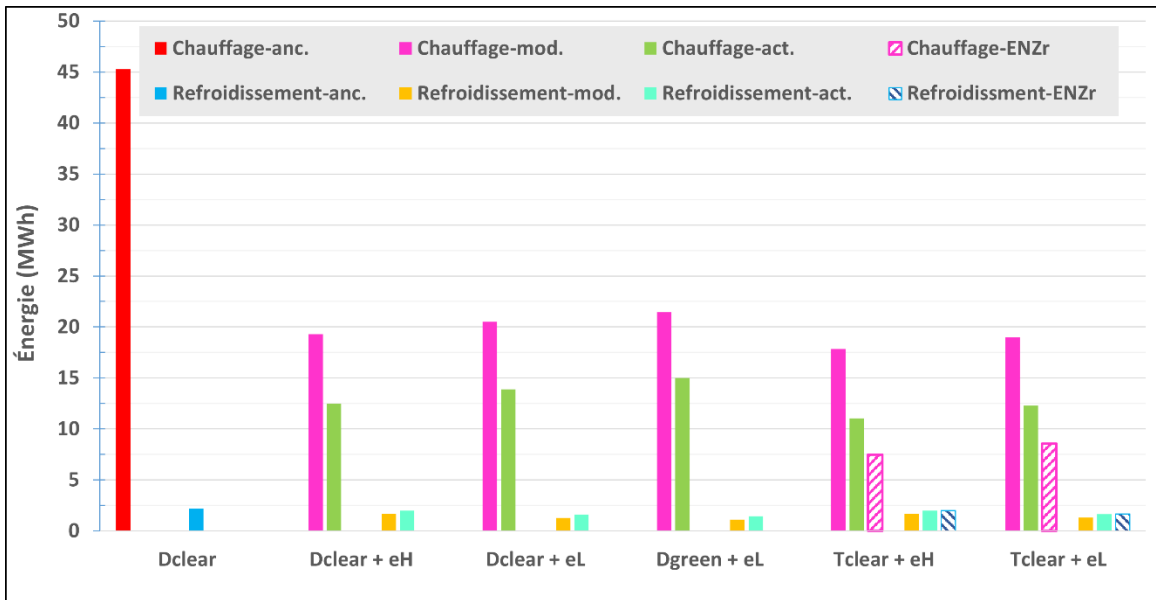


Figure 23. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement de maisons individuelles, bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

11.2 Effet des dispositifs d’ombrage

La Figure 24 illustre la gravité de la surchauffe calculée dans les conditions climatiques actuelles pour différents types de dispositifs d’ombrage (voir Tableau 20) de maisons individuelles avec des fenêtres types et de construction légère (bâtiments anciens, modernisés, actuels et ENZr). Les dispositifs d’ombrage sont considérés comme fermés pendant l’été et ouverts le reste du temps. Les dispositifs d’ombrage extérieurs sont les équipements les plus efficaces dans ce domaine, suivis par les fenêtres avec vitrage électrochrome, les fenêtres avec vitrage thermochrome, puis les stores intérieurs réfléchissants. Par rapport aux stores intérieurs, les dispositifs d’ombrage extérieurs peuvent réduire la surchauffe de plus de 90 %, suivis par les fenêtres avec vitrage électrochrome (25 à 71 %), les fenêtres avec vitrage thermochrome (22 à 70 %), puis les stores intérieurs réfléchissants (11 à 30 %). Dans les maisons modernisées, les dispositifs d’ombrage extérieurs peuvent réduire, voire éliminer, le risque de surchauffe selon les critères de surchauffe précisés dans la Section 6. Du fait de leurs taux de fuite d’air supérieurs, les maisons modernisées présentent un risque inférieur de surchauffe par rapport aux maisons neuves ou aux futures maisons ENZr. Dans les maisons neuves (bâtiments actuels) ou ENZr futures, les dispositifs d’ombrage extérieurs doivent être combinés à d’autres mesures, comme une ventilation à l’échelle de la maison tout entière, afin de réduire ou d’éliminer le risque de surchauffe.

La

Effets de l'ombrage

Les dispositifs d'ombrage extérieurs s'avèrent efficaces pour réduire le risque de surchauffe dans les maisons modernisées. Dans les maisons neuves ou ENZr, les dispositifs d'ombrage extérieurs doivent être combinés à d'autres mesures, comme une ventilation à l'échelle de la maison tout entière, afin de réduire le risque de surchauffe.

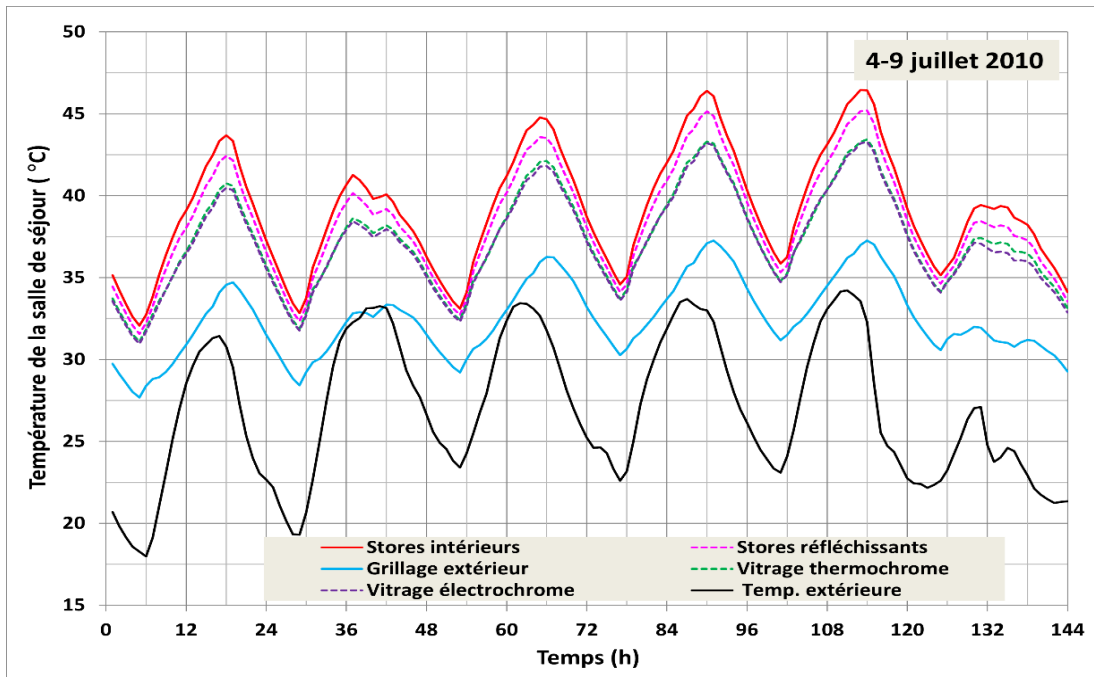


Figure 25 illustre l’effet des dispositifs d’ombrage sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons de construction légère actuelle avec des fenêtres types. Les dispositifs d’ombrage extérieurs peuvent largement réduire les pics de température intérieure jusqu’à 9°C par rapport aux stores intérieurs, suivis par une réduction de 3°C obtenue pour les fenêtres dynamiques (à vitrage électrochrome ou thermochrome).

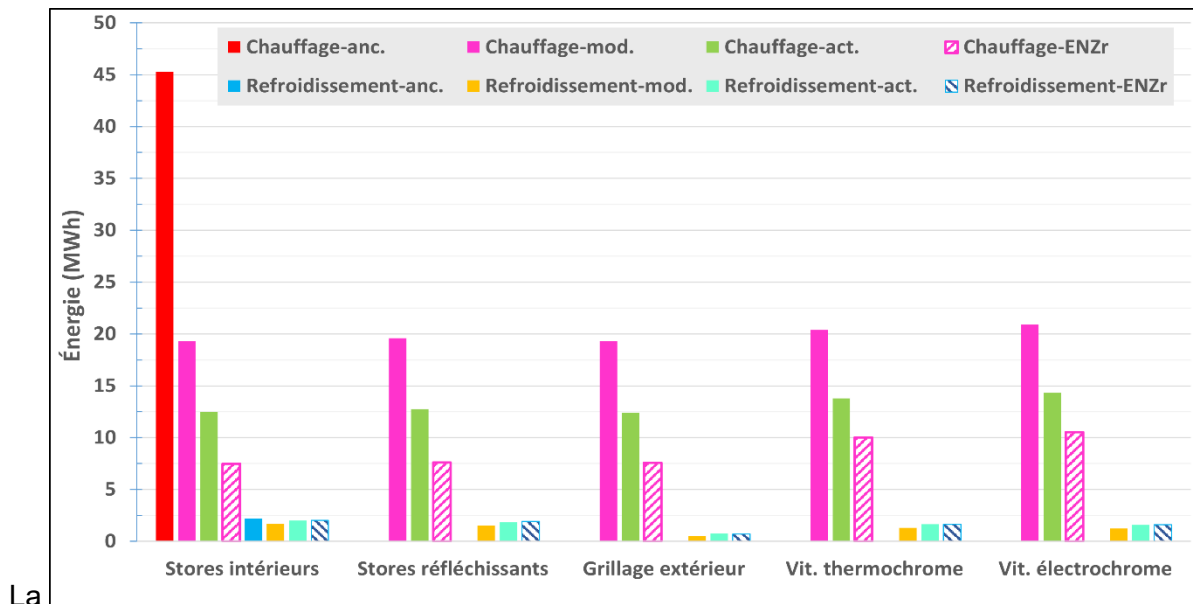


Figure 26 illustre l’effet des dispositifs d’ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement de maisons avec vitrages types. Les dispositifs d’ombrage conventionnels (intérieurs et extérieurs) réduisent principalement la consommation énergétique

liée au refroidissement en été, mais leur effet sur la consommation énergétique liée au chauffage en hiver n'est pas significatif. Néanmoins, les fenêtres dynamiques peuvent augmenter la consommation énergétique en chauffage jusqu'à 40 % par rapport aux stores intérieurs, du fait de leur valeur CARS inférieure ($< 0,41$), en particulier dans les maisons ENZr.

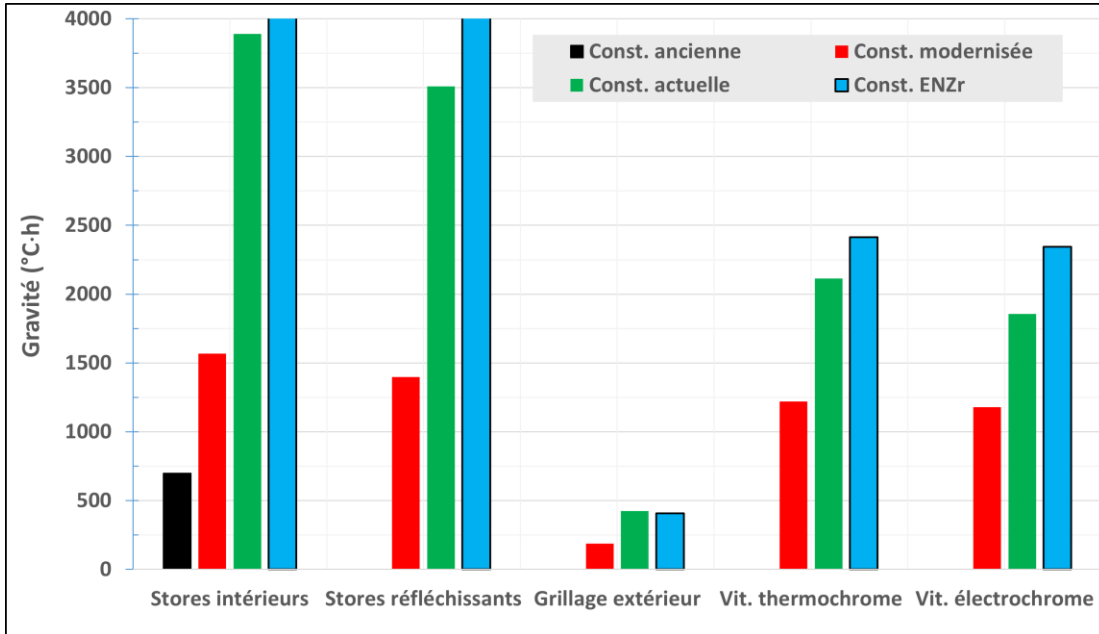


Figure 24. Effet des dispositifs d'ombrage sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)

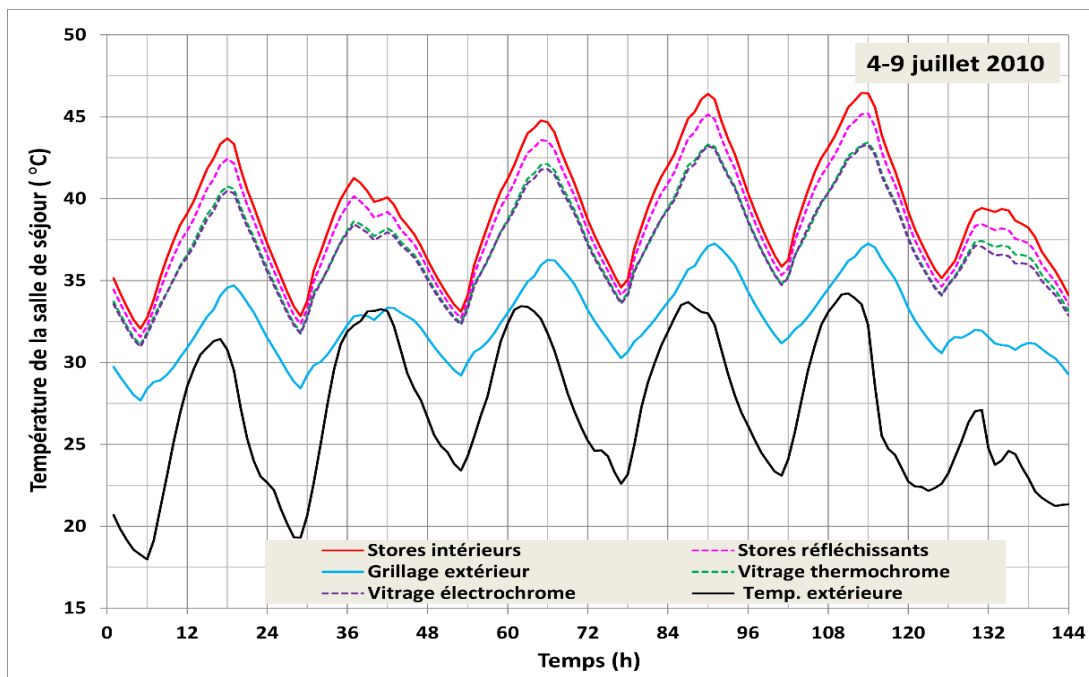


Figure 25. Effet des dispositifs d’ombrage sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons individuelles de construction légère actuelle avec des fenêtres types (Dclear+eH)

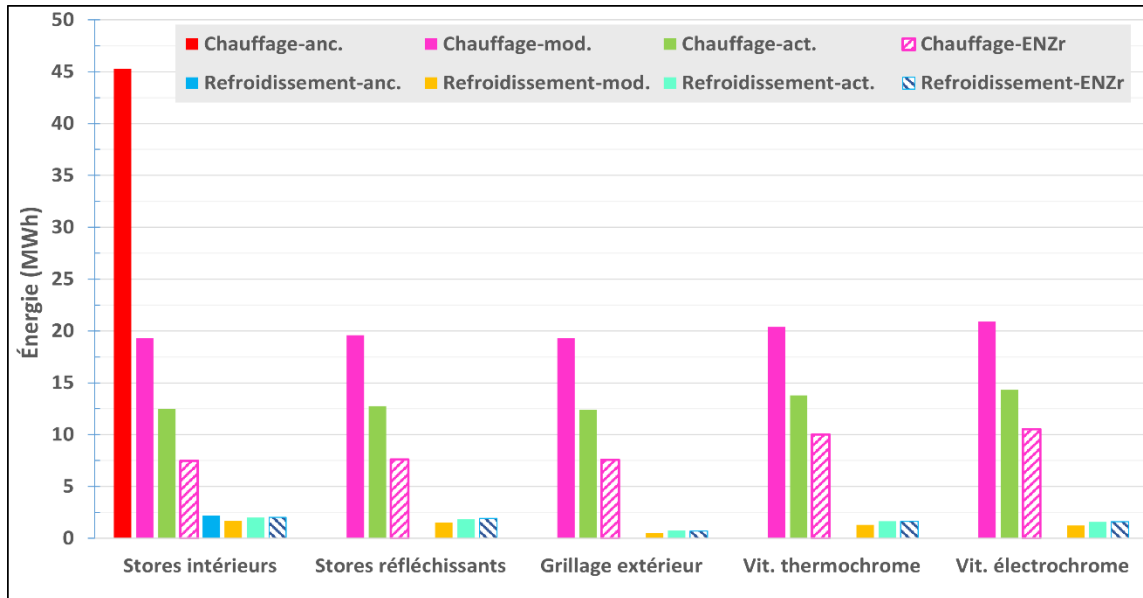


Figure 26. Effet des dispositifs d’ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement dans des maisons individuelles avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)

11.3 Effet de la ventilation des maisons

Quatre stratégies de ventilation ont été évaluées dans le cadre de la surchauffe : (1) la ventilation naturelle en ouvrant 25 % de la surface des fenêtres de la maison lorsque la température intérieure de chaque zone thermique excède 26°C ainsi que la température extérieure; (2) la ventilation de nuit en activant les extracteurs (cuisine et salle de bains), et en augmentant leur débit d’air à 10 fois la valeur nominale (à savoir, 220 litres/s ou 466 PCM) de 22 h 00 à 9 h 00; (3) le mode mixte, à savoir la ventilation naturelle + la ventilation de nuit; et (4) la ventilation par ventilateur (au plafond ou portable) combinée avec la ventilation naturelle. Pour calculer et équilibrer les débits de circulation d’air dans les différentes zones thermiques au sein de la maison, la ventilation naturelle et par extracteur a été intégrée au réseau de flux d’air de la maison tout entière.

La

Ventilation à l’échelle de la maison

La ventilation naturelle passive par ouverture des fenêtres en été est une stratégie efficace pour minimiser le risque de surchauffe, indépendamment du type de maison. La ventilation de nuit est aussi efficace, mais doit être combinée avec d’autres mesures afin de réduire le risque de surchauffe.

Figure 27 illustre l'effet des stratégies de ventilation sur la gravité de la surchauffe dans des maisons équipées de fenêtres types et de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr). La ventilation naturelle s'est avérée efficace en réduisant, voire en éliminant, le risque de surchauffe dans les quatre types de maisons. La ventilation de nuit a également été efficace mais n'élimine pas le risque de surchauffe. La ventilation de nuit peut réduire le risque de surchauffe de 47 % (bâtiment modernisé) à 83 % (bâtiment ENZr) par rapport à l'absence de ventilation. La ventilation en mode mixte n'a cependant produit aucun effet significatif supplémentaire par rapport à la ventilation naturelle.

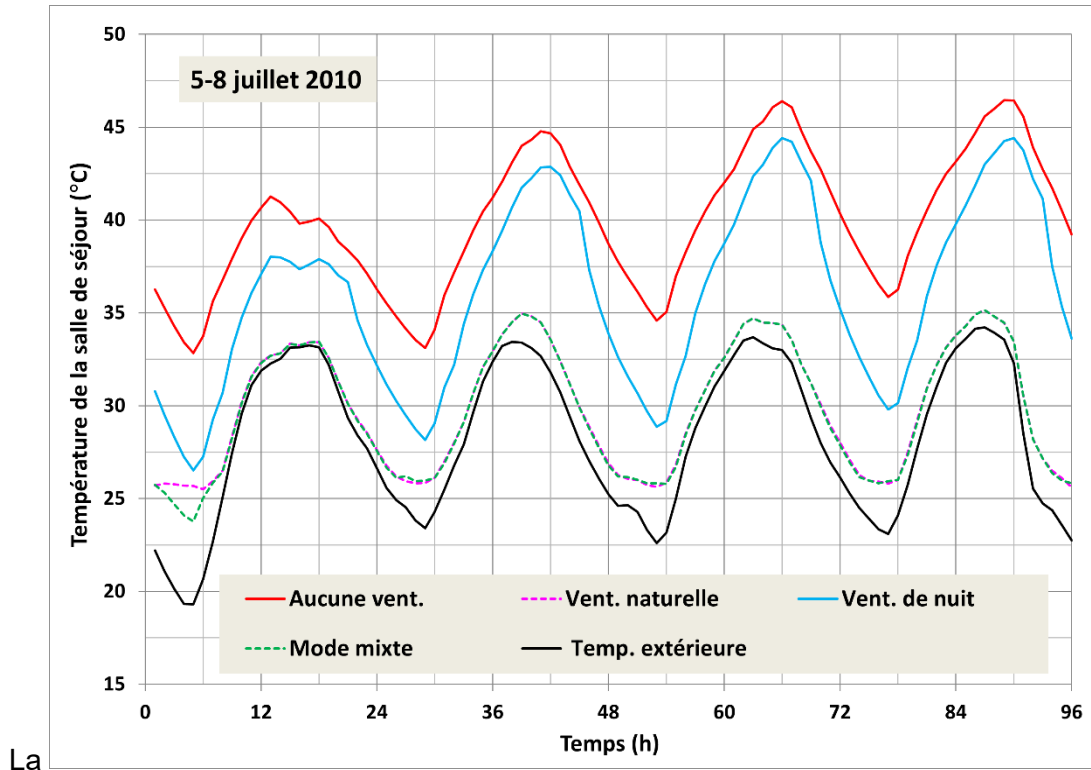


Figure 28 illustre l'effet des stratégies de ventilation des maisons sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons de construction légère actuelle avec des fenêtres types. La ventilation naturelle peut réduire les pics de température intérieure au cours de la journée jusqu'à 11,5°C par rapport à l'absence de ventilation, suivie par une réduction de 2°C pour la ventilation nocturne.

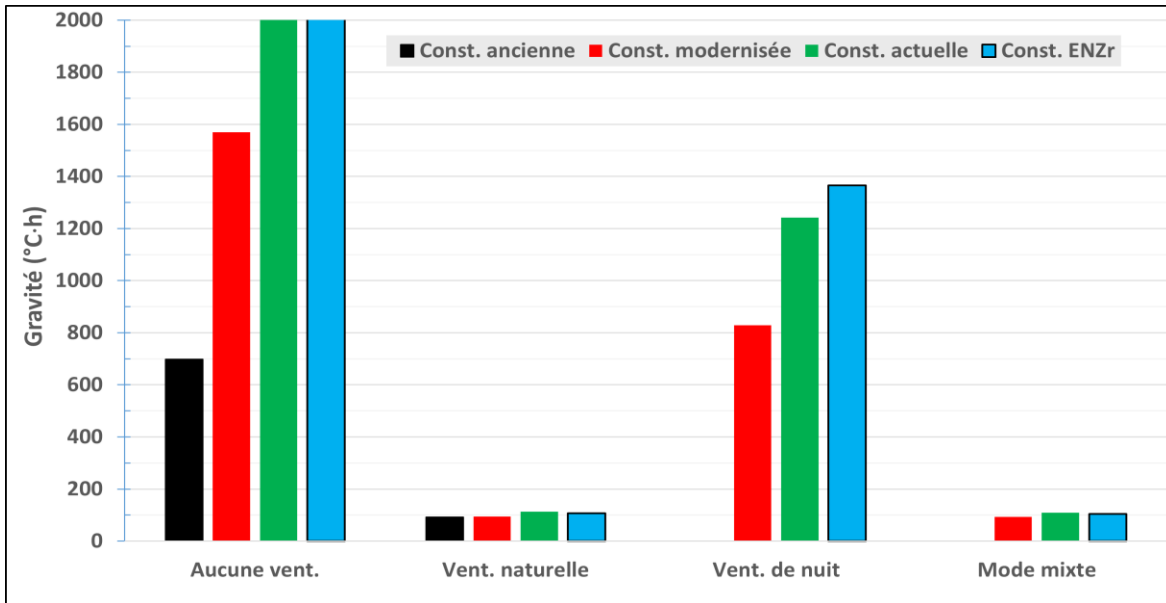


Figure 27. Effet de la ventilation à l'échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)

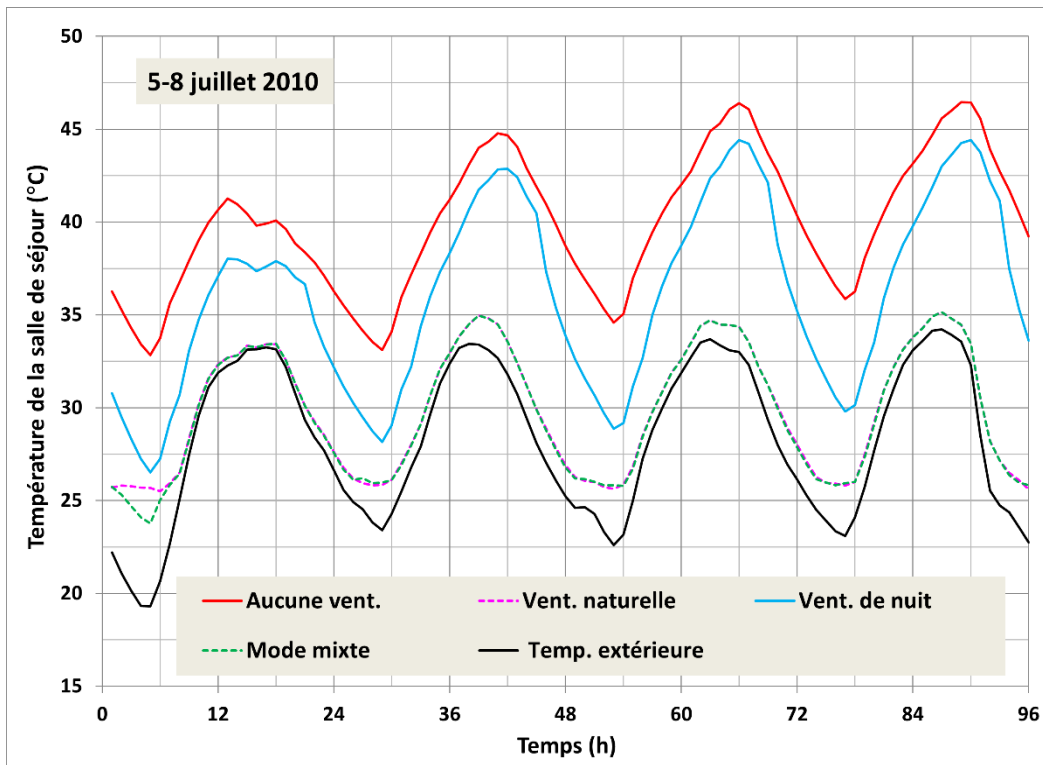


Figure 28. Effet des stratégies de ventilation à l'échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types (Dclear+eH) et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles

La

Ventilation par ventilateur

La ventilation par ventilateur peut être une mesure alternative à la ventilation de nuit. La combinaison d'une ventilation par ventilateur et d'une ventilation naturelle (ouverture des fenêtres sur au moins une façade) est efficace pour réduire le risque de surchauffe dans les maisons anciennes ou à niveau d'isolation élevé.

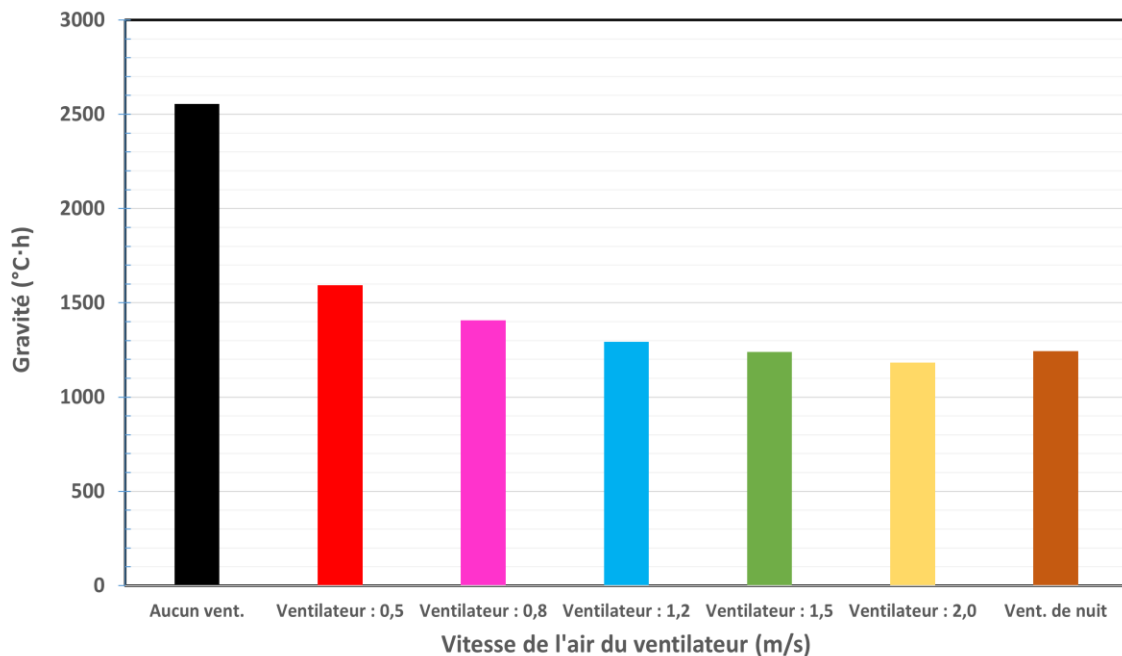


Figure 29 illustre l'effet de la ventilation par ventilateur (au plafond ou portable) (commandée en fonction de l'occupation de l'espace) sur la gravité de la surchauffe dans des maisons avec des fenêtres types et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles. Les ventilateurs créent un déplacement d'air autour du corps des occupants, engendrant ainsi un effet de refroidissement, mais n'affectent pas la température intérieure. La vitesse de l'air produite par le ventilateur peut réduire le risque de surchauffe de 37 à 54 %, en fonction de la vitesse de l'air

à proximité du corps de l'occupant. Des vitesses d'air de ventilateur proches de 2 m/s ont entraîné le même niveau de surchauffe qu'en cas de ventilation de l'espace de nuit à l'aide d'extracteurs (fonctionnant entre 22 h 00 et 9 h 00). Pour minimiser ou éliminer le risque de surchauffe, la stratégie de ventilation par ventilateur doit être combinée avec d'autres mesures.

La ventilation naturelle est l'une des mesures couramment utilisées dans les bâtiments en évolution libre, par exemple l'ouverture des fenêtres, mentionnée précédemment. Cependant, pour que la ventilation naturelle soit efficace, un flux d'air transversal dans les espaces de la maison doit être créé de manière à ce que l'air extérieur puisse entrer par une façade et sortir par la façade opposée. Pour illustrer ces propos, la

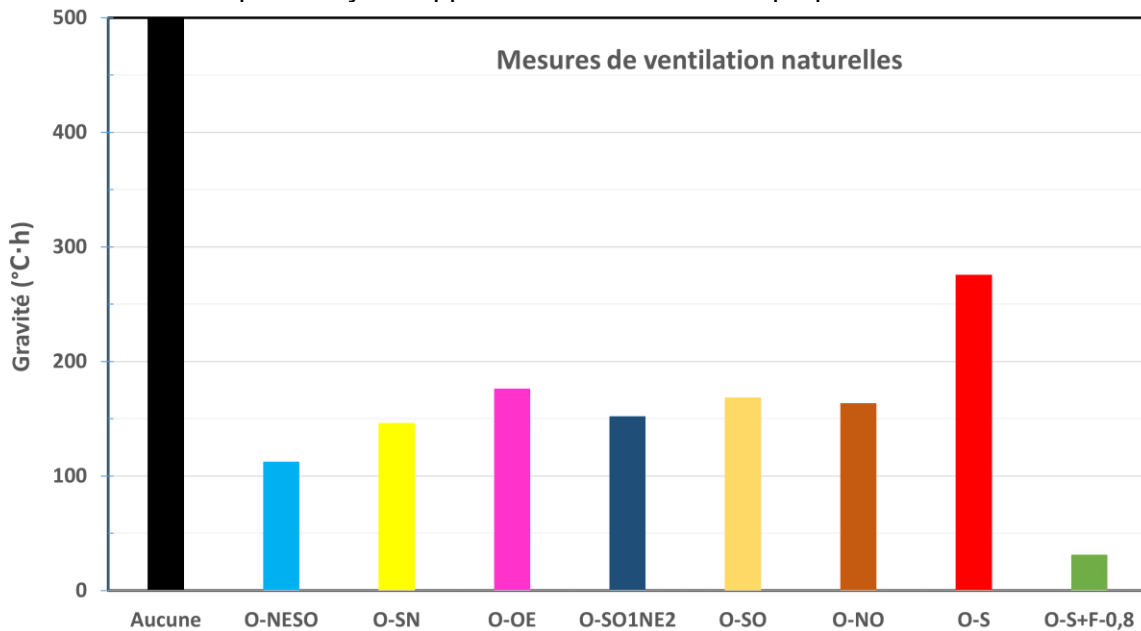


Figure 30 montre l'effet de plusieurs combinaisons d'ouverture de fenêtres de façade comme : l'ouverture à 25 % de toutes les fenêtres de la maison (NESO, ventilation transversale), l'ouverture des fenêtres des façades sud et nord (SN, ventilation transversale), l'ouverture des fenêtres des façades ouest et est (OE, ventilation transversale), l'ouverture des fenêtres des façades sud et ouest du premier étage et celles des façades nord et est du deuxième étage (SO1NE2, effet cheminée et ventilation transversale), l'ouverture des fenêtres des façades sud et ouest (SO, ventilation sur les deux faces), l'ouverture des fenêtres des façades nord et ouest (NO, ventilation sur deux faces), et l'ouverture des fenêtres de la façade sud uniquement (S, ventilation sur une face). Tous ces cas de ventilation ont prouvé leur efficacité en réduisant ou en éliminant le risque de surchauffe, à l'exception de la stratégie de ventilation sur une face (S). La combinaison d'une ventilation naturelle sur une face et d'une ventilation au moyen de ventilateurs (S+F-0,8) peut s'avérer plus efficace qu'une ventilation transversale seule, en réduisant, voire en éliminant, le risque de surchauffe dans les maisons.

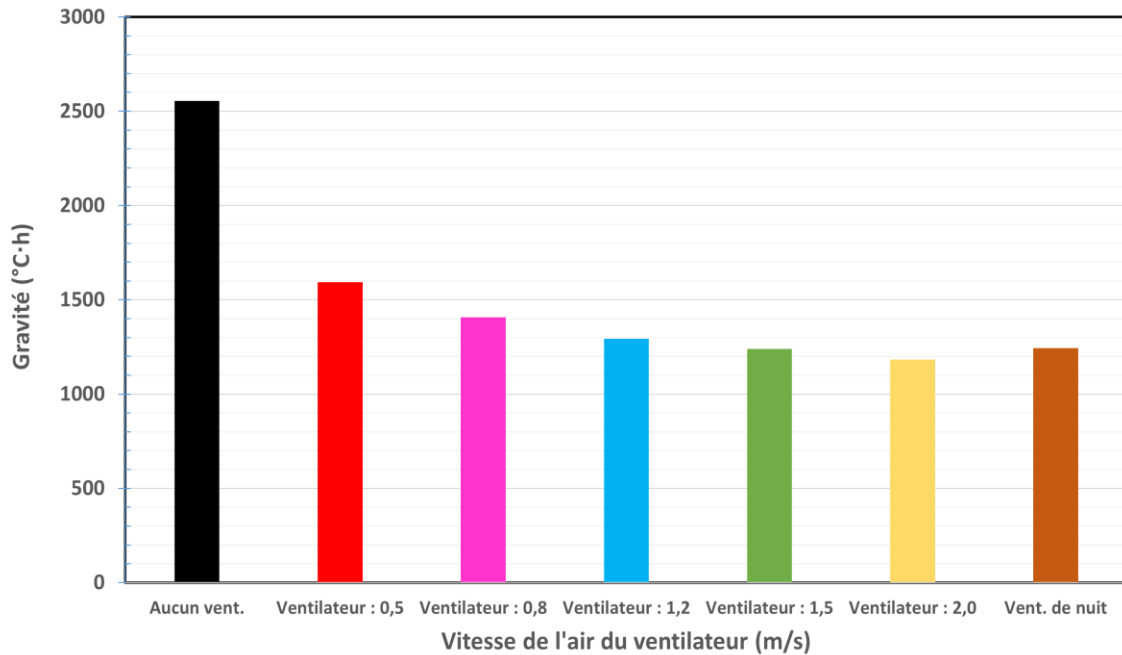


Figure 29. Effet de la ventilation au moyen de ventilateurs sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles

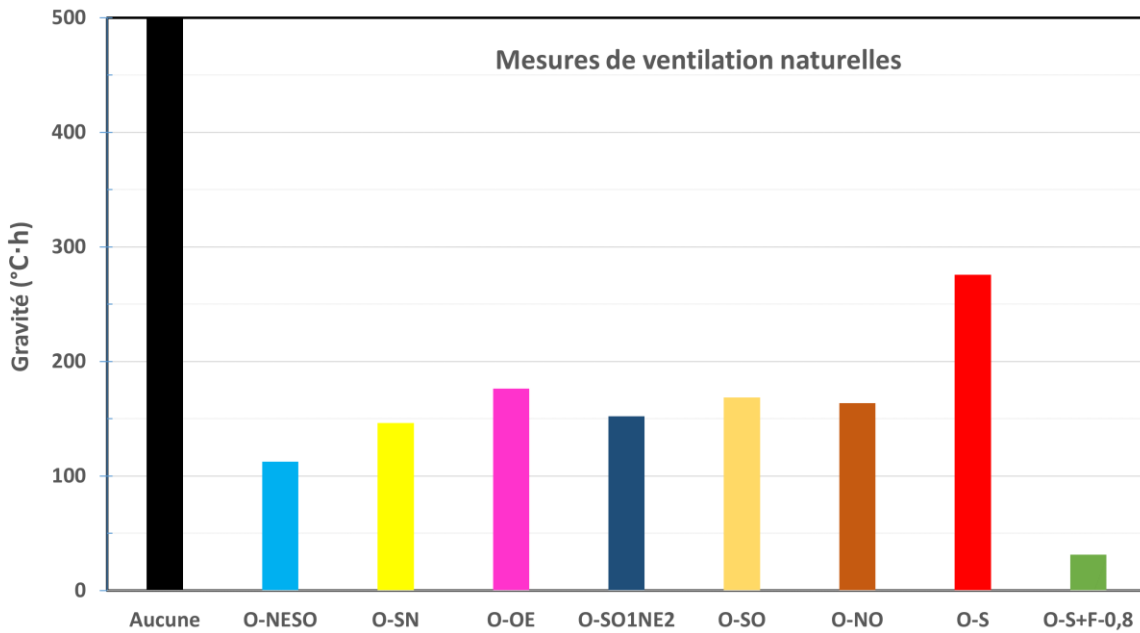


Figure 30. Effet de la stratégie d'ouverture des fenêtres sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec des fenêtres types et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles

11.4 Effet du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé

L'activation d'un système de refroidissement centralisé ou d'un climatiseur de fenêtre au cours d'événements de chaleur extrême en été avec un point de consigne (supérieur) abaissé est quelquefois nécessaire pour réduire le coût prohibitif du refroidissement des maisons. En outre, cette stratégie présente l'avantage supplémentaire de réduire la demande en électricité pendant les heures de pointe. La

Figure 31 illustre la manière dont cette stratégie affecte le risque de surchauffe dans des maisons bâties selon quatre pratiques de construction locales différentes. L'abaissement de la température du point de consigne de refroidissement à 31°C (correspondant à une valeur SET de 30°C, sensation légèrement tiède) peut réduire efficacement le risque de surchauffe au cours des événements de chaleur extrême, voire l'éliminer dans les maisons anciennes (gravité < 230°C*h). Cependant, l'élimination du risque de surchauffe dans les maisons à niveau d'isolation élevé peut nécessiter de combiner cette stratégie à d'autres stratégies passives telles que l'ouverture de fenêtres ou l'utilisation de la ventilation mécanique au cours de la nuit pour évacuer de la maison tous les gains de chaleur interne excessive accumulés au cours de la journée.

Refroidissement mécanique

Le refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé (31°C) est efficace pour éliminer le risque de surchauffe dans les maisons anciennes, mais nécessite des mesures passives supplémentaires, comme une ventilation nocturne, pour réduire le risque de surchauffe dans les maisons à niveau d'isolation élevé.

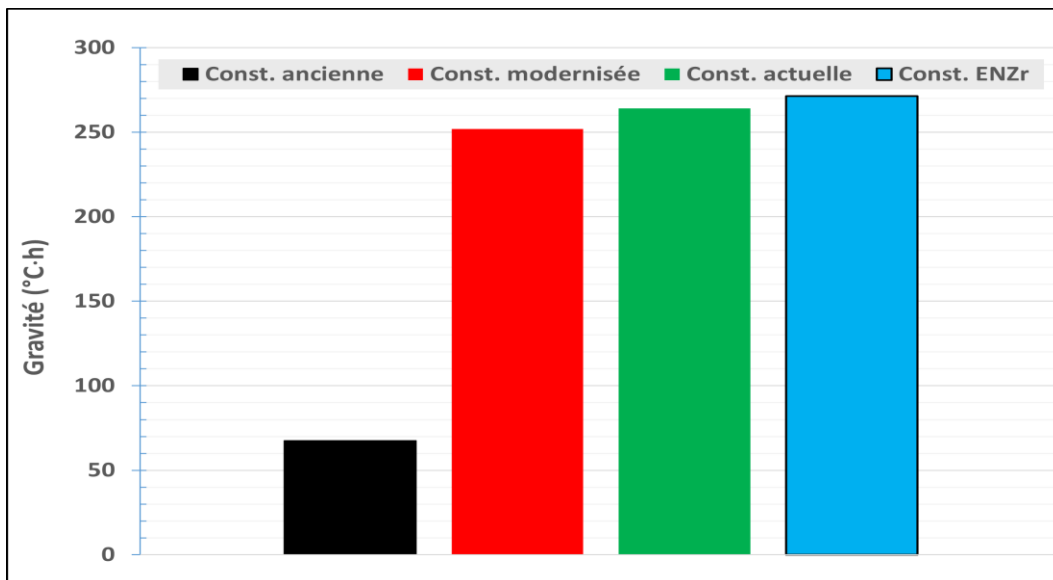


Figure 31. Effets du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec fenêtres types protégées par des stores

intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

11.5 Effet du type de construction

La surchauffe a été évaluée avec deux types de constructions (voir Tableau 22) : (1) construction légère, avec bardage vinyle; et (2) construction moyenne, avec parement de brique.

La

Types de constructions

Le type de construction (masse légère ou moyenne) n'a aucun effet significatif sur le risque de surchauffe.

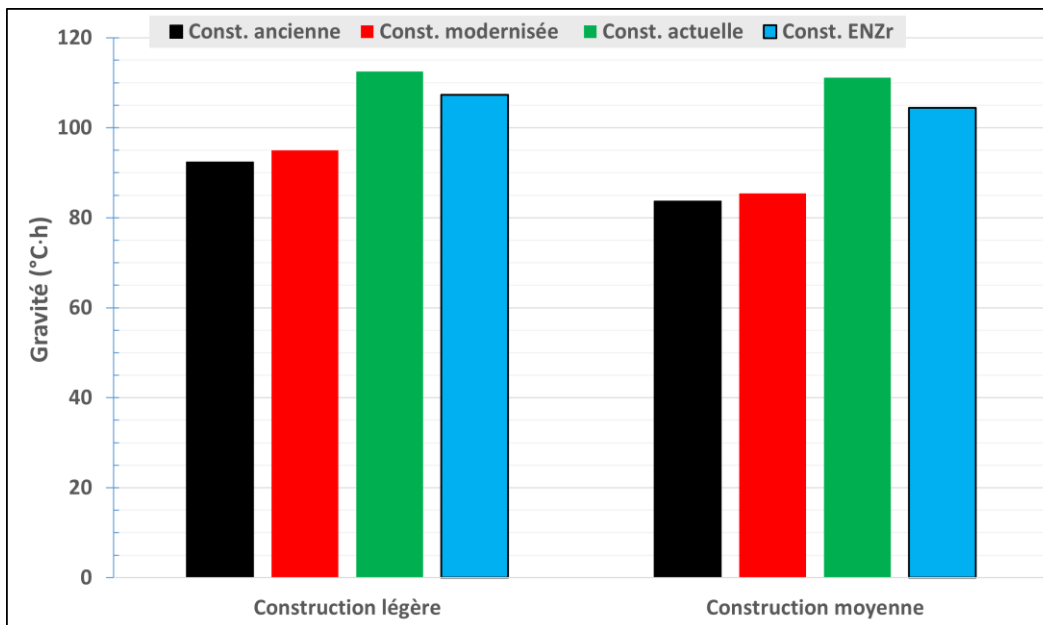


Figure 32 illustre l'effet du type de construction sur la gravité de la surchauffe dans des maisons équipées de fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr). Dans ces maisons, les fenêtres sont considérées comme étant ouvertes pour assurer une ventilation naturelle passive. Les deux types de constructions ont des effets négligeables sur le risque de surchauffe. Cela peut être dû au fait que le niveau élevé d'isolation derrière le bardage de masse moyenne empêche la chaleur emmagasinée dans le bardage d'atteindre l'espace intérieur.

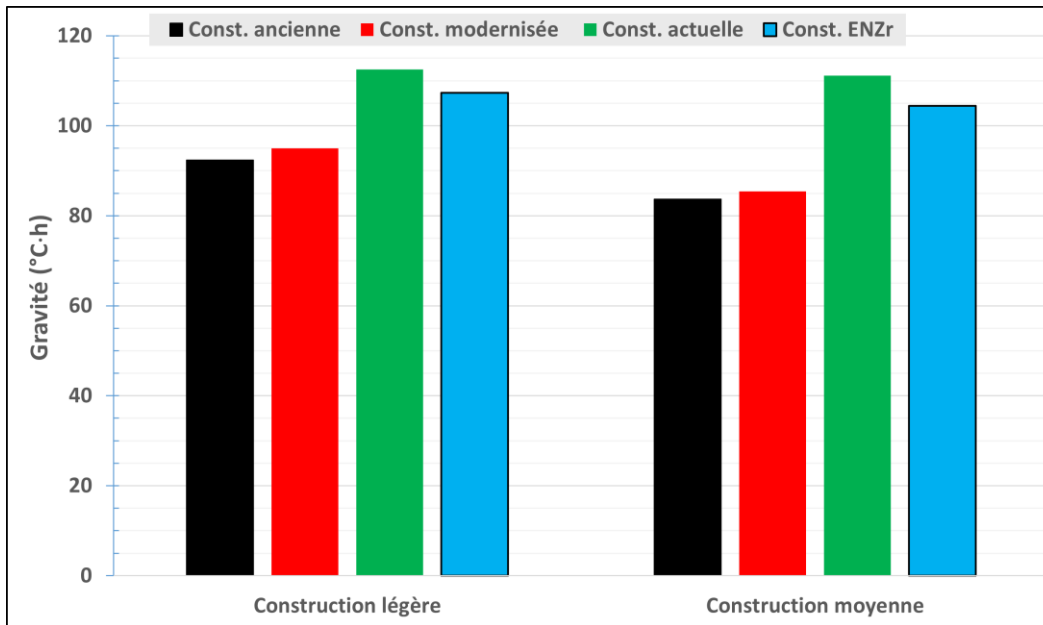


Figure 32. Effets du type de construction sur la gravité de la surchauffe dans des maisons individuelles avec fenêtres types ouvertes protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

11.6 Consommation énergétique et risque de surchauffe des bâtiments

La relation entre la consommation énergétique totale (électricité et gaz) et le risque de surchauffe dans les bâtiments est très importante en matière de conception de bâtiments résilients thermiquement, afin de garantir des environnements sains et sûrs. Les exigences applicables aux bâtiments afin d'atteindre une efficacité énergétique élevée se sont multipliées au cours des dernières décennies, afin de contrecarrer l'effet toujours plus important des émissions de gaz à effet de serre sur le climat; néanmoins, peu d'exigences associées au risque de surchauffe existent.

La

Consommation énergétique et surchauffe

Le risque de surchauffe est inversement proportionnel à la consommation énergétique totale dans les maisons hermétiques ou non ventilées naturellement. Des mesures passives ou actives doivent par conséquent être prises dans les maisons à niveau d'isolation élevé, afin de réduire le risque de surchauffe.

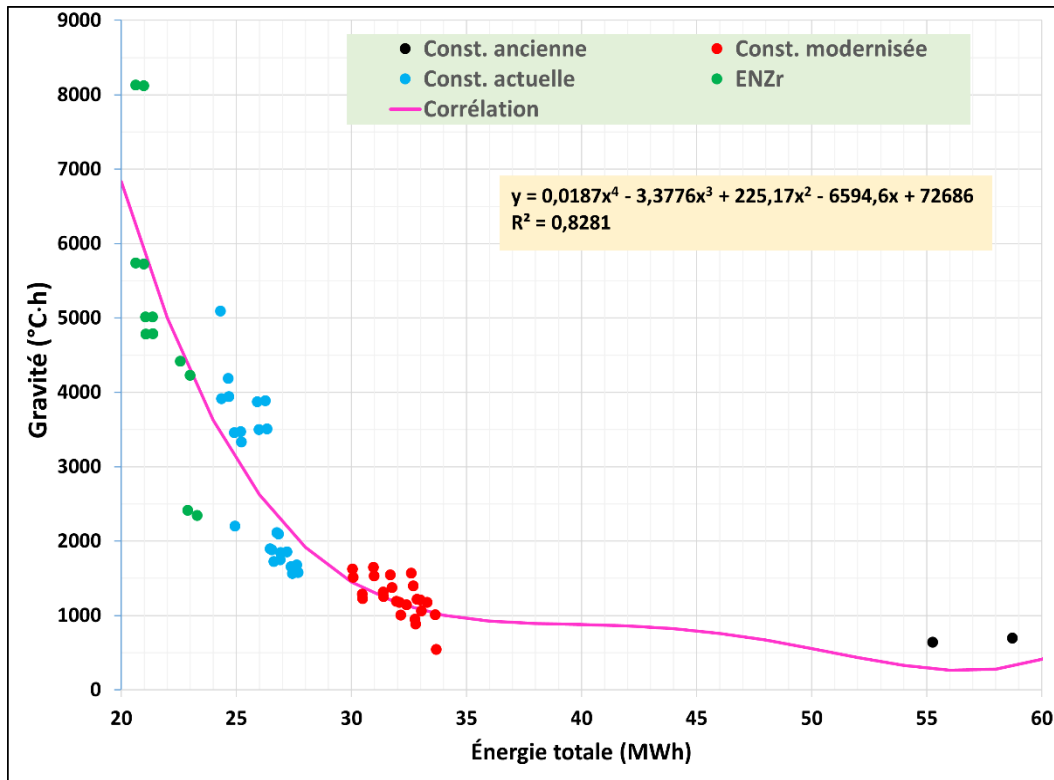


Figure 33 illustre la manière dont la consommation énergétique (électricité et gaz) totale du bâtiment est liée à la gravité de la surchauffe. Les données sont tracées pour tous les types de constructions et de fenêtres. Les fenêtres sont considérées comme fermées (aucune ventilation naturelle) et protégées par des dispositifs d’ombrage intérieurs (comprenant des fenêtres dynamiques, mais les dispositifs d’ombrage extérieurs ont été exclus). Il apparaît clairement que la consommation énergétique totale est inversement proportionnelle au risque de surchauffe dans les maisons hermétiques ou non ventilées naturellement. Plus les exigences en matière d’efficacité énergétique sont strictes (ou la consommation énergétique est faible), plus le risque de surchauffe est important. Il est par conséquent recommandé de mettre en œuvre des mesures passives ou actives, afin de réduire le risque de surchauffe dans les maisons neuves ou ENZr futures, si le refroidissement mécanique ne constitue pas une option viable. Ces mesures peuvent inclure des stores extérieurs avec ou sans ventilation par ventilateur, une ventilation naturelle (s’il est possible d’ouvrir les fenêtres en été), une ventilation mécanique utilisant des ventilateurs par alimentation ou des extracteurs, des ventilateurs récupérateurs de chaleur, mais avec des débits d’air supérieurs aux valeurs nominales, avec option de dérivation en été afin d’éviter le préchauffage de l’air extérieur.

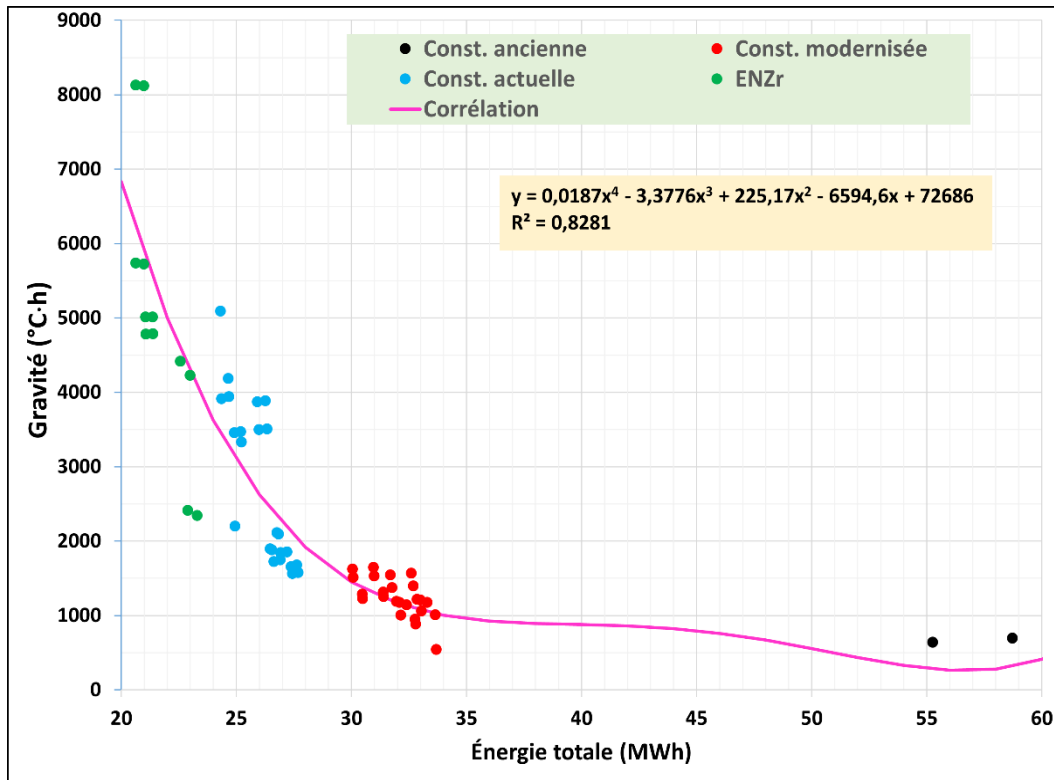


Figure 33. Relation entre la consommation énergétique (électricité et gaz) totale et le risque de surchauffe dans des maisons individuelles non ventilées naturellement et bâties selon quatre pratiques de construction locales différentes (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

11.7 Effet du réchauffement planétaire sur le risque de surchauffe et l'énergie

Des simulations ont été menées pour les sept scénarios de réchauffement climatique suivants, représentant des hausses de température à l'échelle planétaire de 0,5°C à 3,5°C : RP0,0 (climat actuel), RP0,5 (2001 - 2031), RP1,0 (2013 - 2043), RP1,5 (2024 - 2054), RP2,0 (2034 - 2064), RP2,5 (2044 - 2074), RP3,0 (2053 - 2083) et RP3,5 (2062 - 2092). Les

Figure 34 à

Figure 36 illustrent l'effet du réchauffement planétaire sur la gravité et l'intensité des événements de surchauffe dans les maisons modernisées, neuves (actuelles) et ENZr, respectivement, avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées). Toutes les fenêtres étaient équipées de stores intérieurs types, considérés comme fermés pendant l'été. La gravité et l'intensité des événements de surchauffe augmentent avec le degré de réchauffement planétaire. D'ici la fin du 21^e siècle, la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons modernisées augmenteront respectivement de 219 % (sans ventilation naturelle) à 1252 % (avec ventilation naturelle), et de 40 % (sans ventilation naturelle) à 422 % (avec ventilation naturelle), par rapport au climat actuel (RP0,0). La forte hausse évidente de la gravité de la surchauffe dans les maisons ventilées naturellement est due au fait que les événements de surchauffe dans ce type de maison sont plus courts que dans les maisons sans ventilation naturelle. La ventilation naturelle peut être une mesure efficace pour éliminer le risque de surchauffe jusqu'à RP1,0 (2013 - 2043). De la même manière, la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons neuves ou ENZr augmenteront respectivement de 100 % (sans ventilation naturelle) à 1165 % (avec ventilation naturelle), et de 14 % (sans ventilation naturelle) à 282 % (avec ventilation naturelle). D'ici la fin du scénario de réchauffement climatique RP1,0, la ventilation naturelle dans ces maisons restera efficace, mais nécessitera d'être combinée avec d'autres mesures afin de minimiser ou d'éliminer le risque de surchauffe (gravité < 230°C·h).

Sur la

Figure 37, l'effet du réchauffement planétaire est représenté dans les variations relatives (par rapport à RP0,0) en matière de consommation énergétique liée au chauffage, liée au refroidissement et totale (chauffage + refroidissement) des maisons modernisées, neuves (actuelles) et ENZr. Le réchauffement planétaire réduit la consommation énergétique liée au chauffage, mais augmente celle liée au refroidissement. D'ici la fin du 21^e siècle, la consommation énergétique liée au chauffage et au refroidissement des maisons modernisées

Réchauffement planétaire

Le RP augmente la gravité et l'intensité des événements de surchauffe jusqu'à 1252 % et 422 % respectivement, dans les maisons ventilées naturellement. D'ici la fin du RP1,0, des mesures supplémentaires combinées à la ventilation naturelle devront être prises dans les maisons neuves ou ENZr afin de réduire le risque de surchauffe. En outre, le RP peut réduire la consommation énergétique liée au chauffage jusqu'à 31 % et augmenter la consommation énergétique liée au refroidissement jusqu'à 35 % dans les maisons neuves ou ENZr.

sera respectivement réduite de 30 % et augmentée de 43 %. Pour les maisons neuves (ou ENZr), la consommation énergétique baissera de 29 % (31 %) pour le chauffage et augmentera de 35 % (32 %) pour le refroidissement.

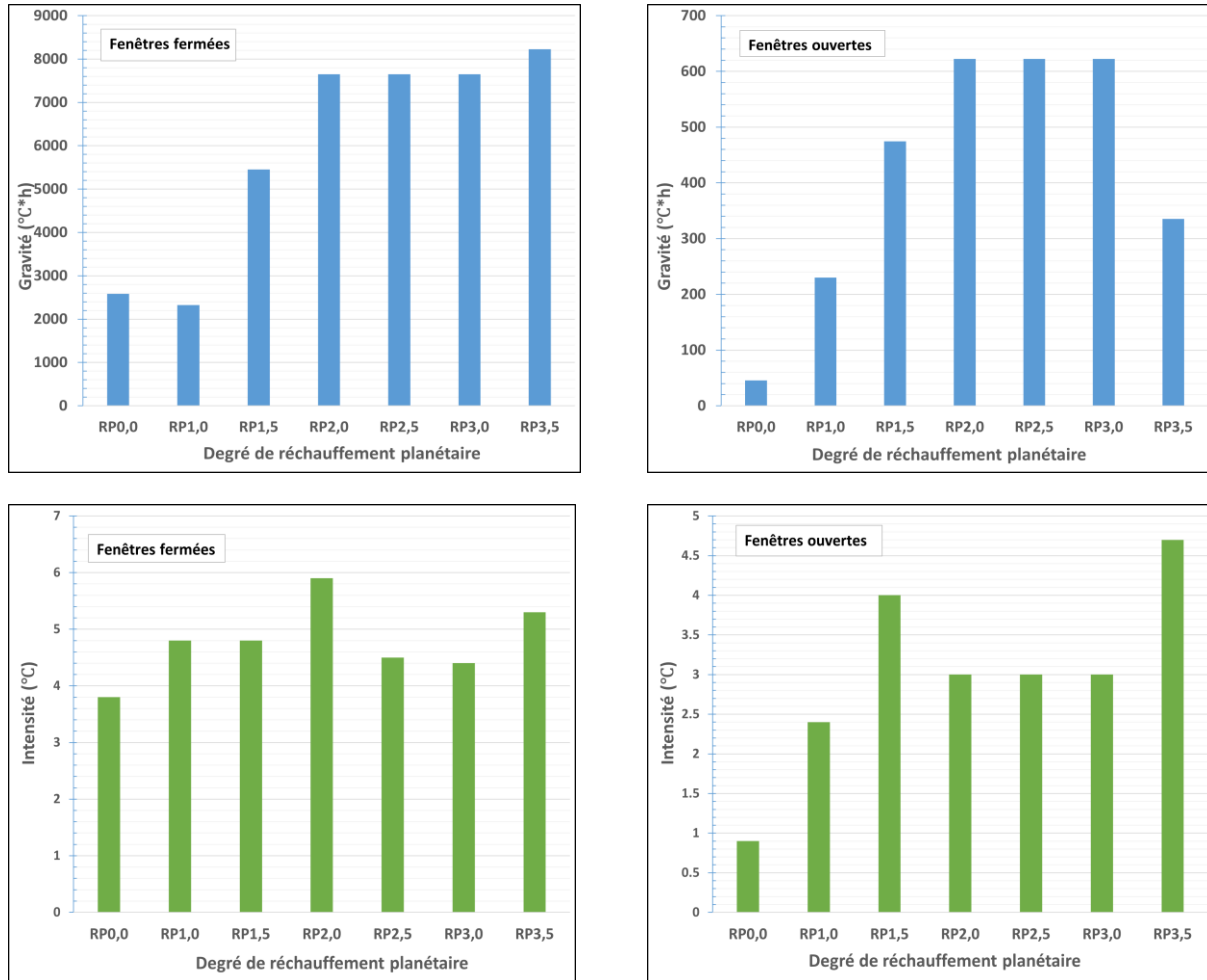


Figure 34. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons individuelles modernisées avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).

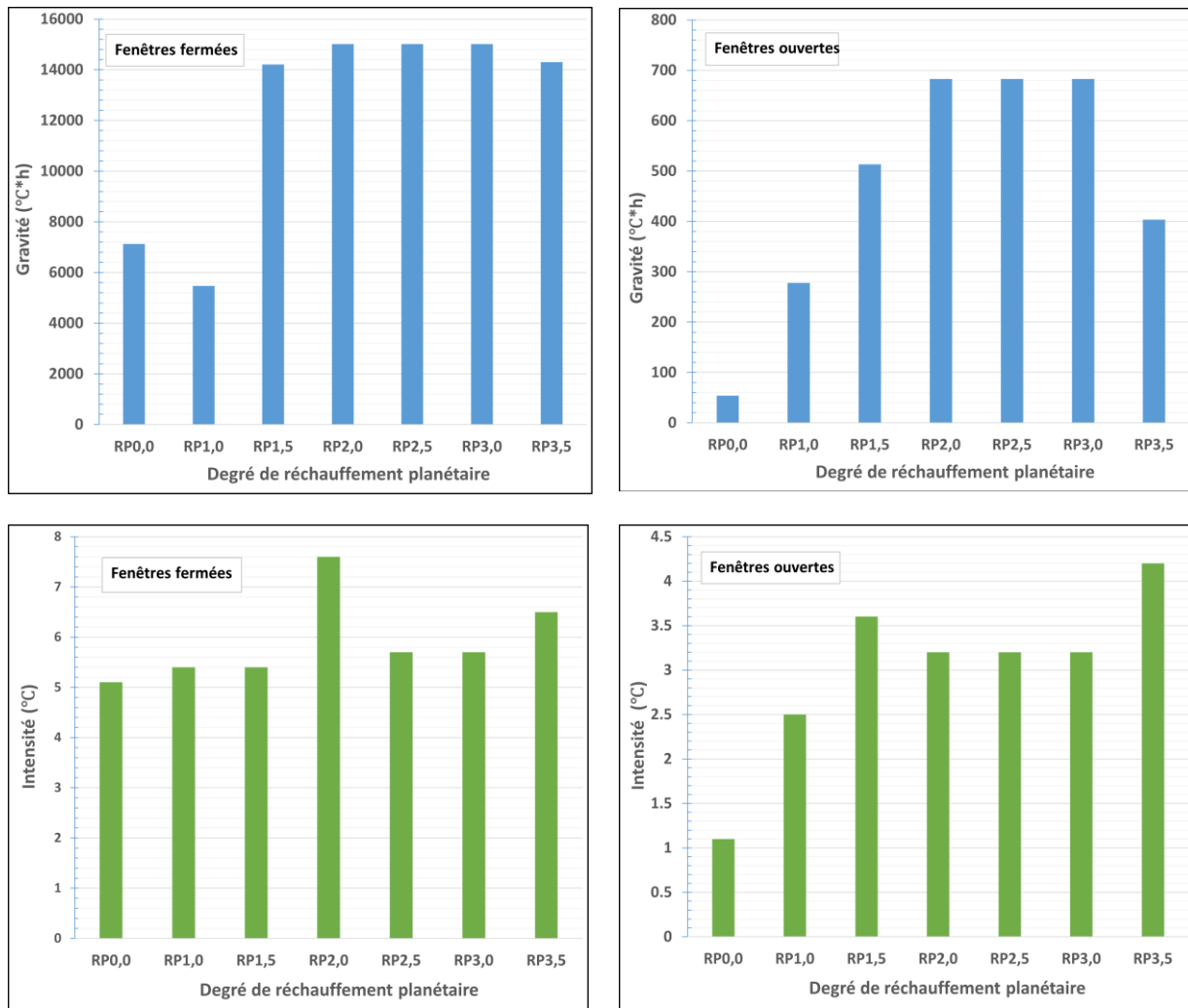


Figure 35. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons individuelles neuves avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).

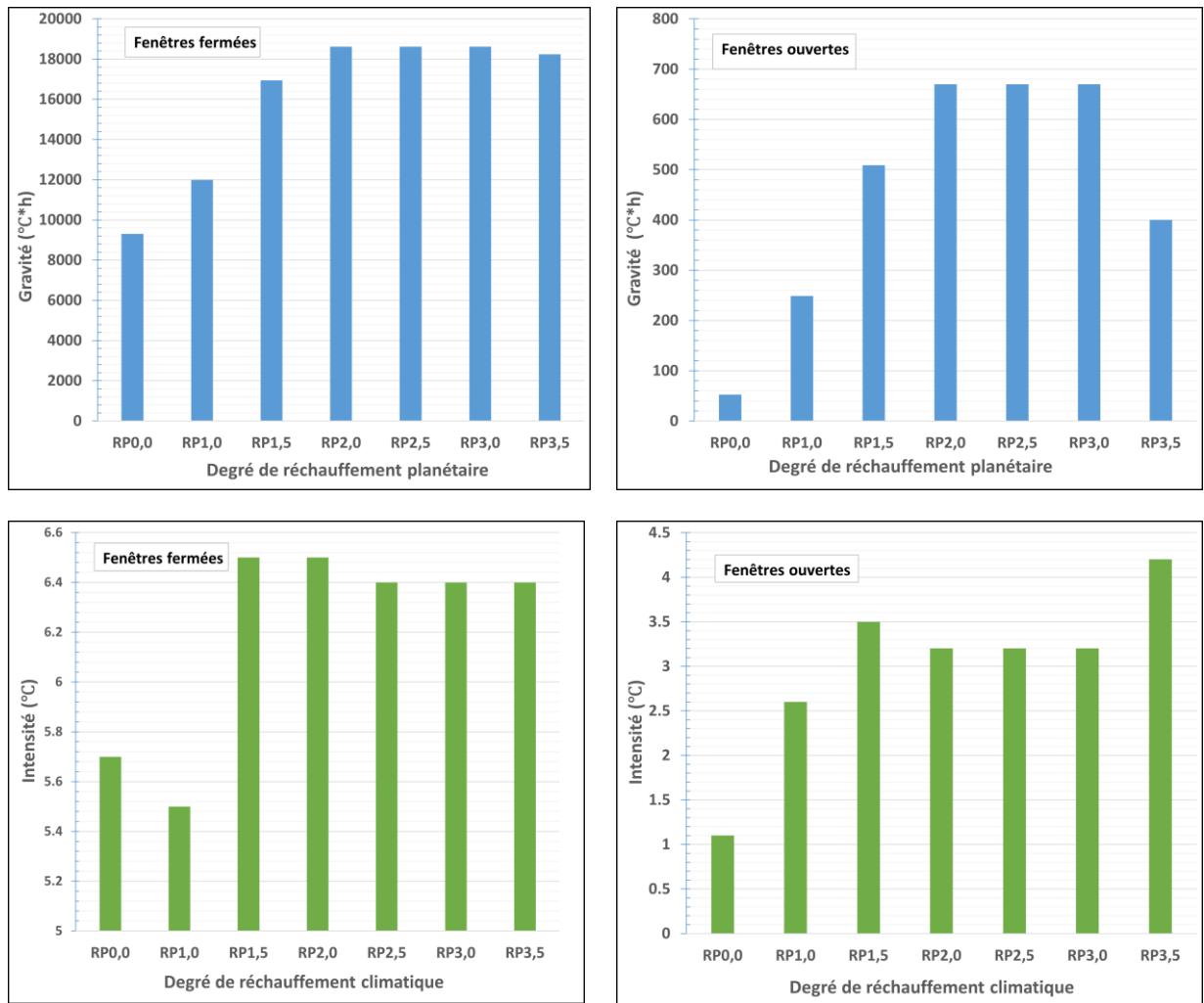


Figure 36. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons individuelles ENZr avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).

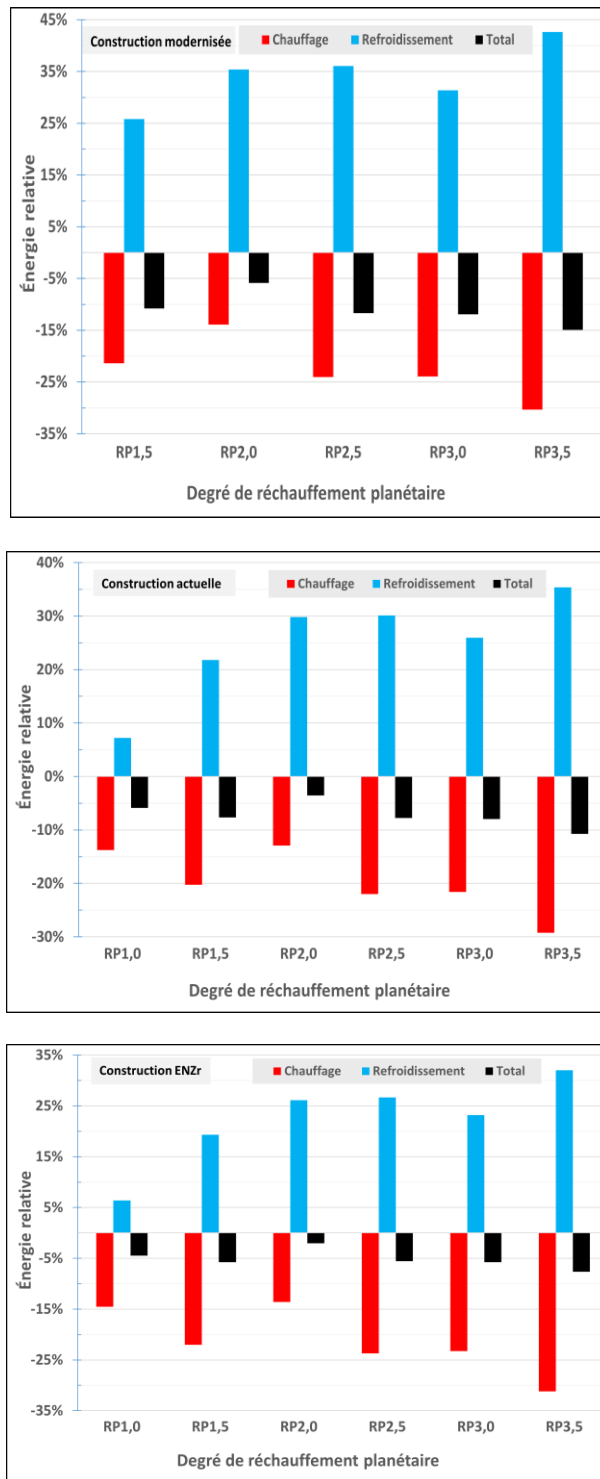


Figure 37. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur les variations relatives de consommation énergétique en matière de chauffage, de refroidissement et totale des maisons individuelles avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs

Maisons en rangée



Crédit photo : <http://skyscraperpage.com>

12 SURCHAUFFE DANS LES MAISONS EN RANGÉE

La méthodologie appliquée aux maisons individuelles (Section 11) est également valable pour les maisons en rangée. Une maison en rangée partage deux murs mitoyens avec les maisons adjacentes, et dispose de deux murs extérieurs (voir

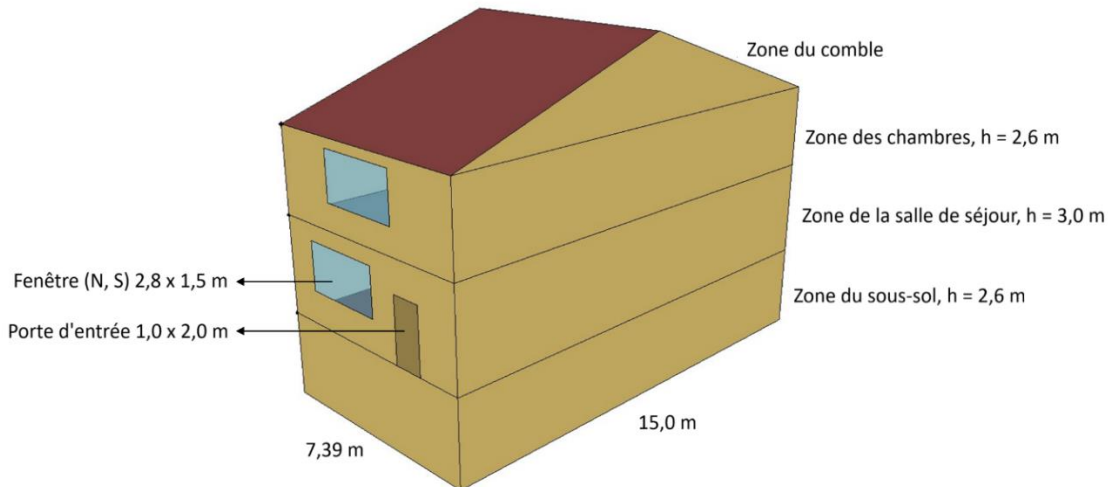
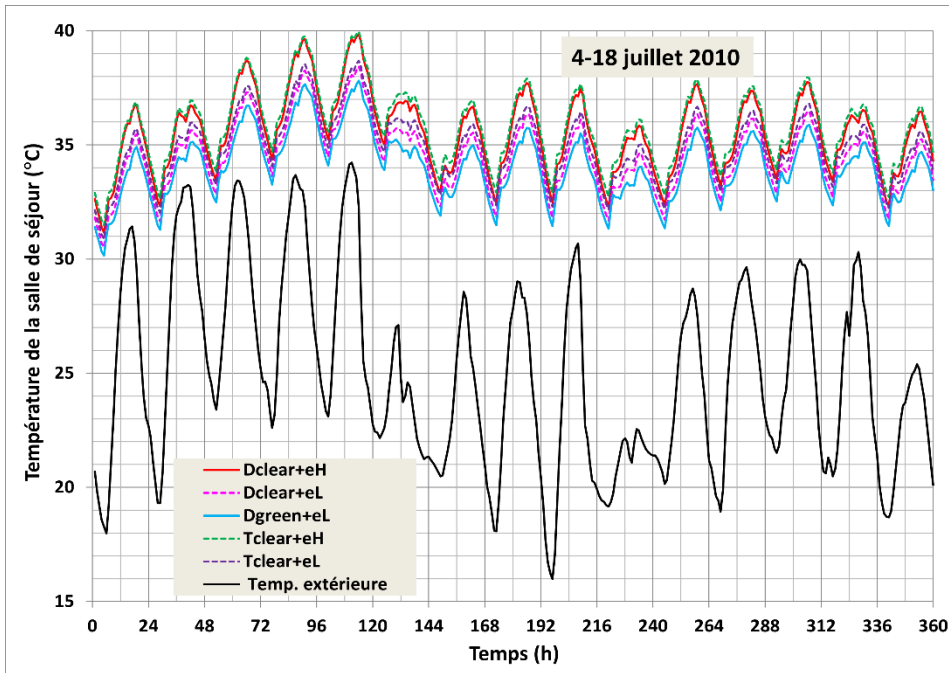


Figure 77, Annexe A). Les murs extérieurs sont considérés comme orientés vers le nord et vers le sud. Des détails supplémentaires sur les caractéristiques des maisons figurent dans l'Annexe A. Les sections suivantes présentent les résultats relatifs à la surchauffe dans ce type de maison pour les mesures choisies, comme décrit dans la Section 10.

12.1 Effet des types de fenêtres

La Figure 38 illustre la gravité de la surchauffe calculée dans les conditions climatiques actuelles pour différents types de fenêtres (voir Tableau 21) de maisons en rangée et diverses pratiques de construction légère (bâtiments anciens, modernisés, actuels et ENZr). Les fenêtres sont considérées comme étant fermées et protégées par des stores intérieurs. Les maisons en rangée présentent un risque de surchauffe largement inférieur à celui des maisons individuelles (Figure 21). La gravité de la surchauffe dans les maisons en rangée peut être réduite de 54 à 78 % par rapport aux maisons individuelles. Le risque de surchauffe dans les maisons en rangée anciennes et mal isolées est légèrement inférieur à la valeur seuil de 230° C*h. En ce qui concerne les maisons modernisées, les fenêtres à vitrage teinté en vert et à revêtement à faible émissivité (Dgreen+eL) peuvent réduire voire éliminer le risque de surchauffe selon les critères susmentionnés dans la Section 6. Les autres types de fenêtres peuvent devoir être combinés avec des mesures différentes afin de réduire le risque de surchauffe. Les fenêtres à vitrage teinté en vert à revêtement à faible émissivité (Dgreen+eL; CARS = 0,30) dans les maisons neuves affichent le risque de surchauffe le plus faible, d'environ 30 % par rapport aux fenêtres à double vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Dclear+eH; CARS = 0,67), suivies des fenêtres à double vitrage clair à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité (Dclear+eL; CARS = 0,42) avec une

valeur de 20 %. Dans les maisons neuves ou ENZr, les fenêtres à faibles valeurs CARS (< 0,42) doivent être combinées à d'autres mesures afin de réduire le risque de surchauffe. Paradoxalement, les fenêtres à triple vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Tclear+eH; CARS = 0,57) entraînent un risque de surchauffe largement supérieur, en particulier dans les maisons ENZr.



La

Figure 39 montre la manière dont le type de fenêtre affecte les températures intérieures de la salle de séjour (premier étage) pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans une maison en rangée de construction légère actuelle. Les températures intérieures maximales au cours de la journée dans les maisons en rangée sont inférieures de 7°C par rapport à celles de maisons individuelles (

Figure 22). Les fenêtres dont les valeurs CARS sont faibles (comme Dgreen+eL et Dclear+eL) peuvent réduire les températures intérieures jusqu'à 2°C. Les fenêtres dont les valeurs CARS sont élevées (Dclear+eH, Tclear+eH) présentent les pics de température intérieure au cours de la journée les plus importants (40°C).

La

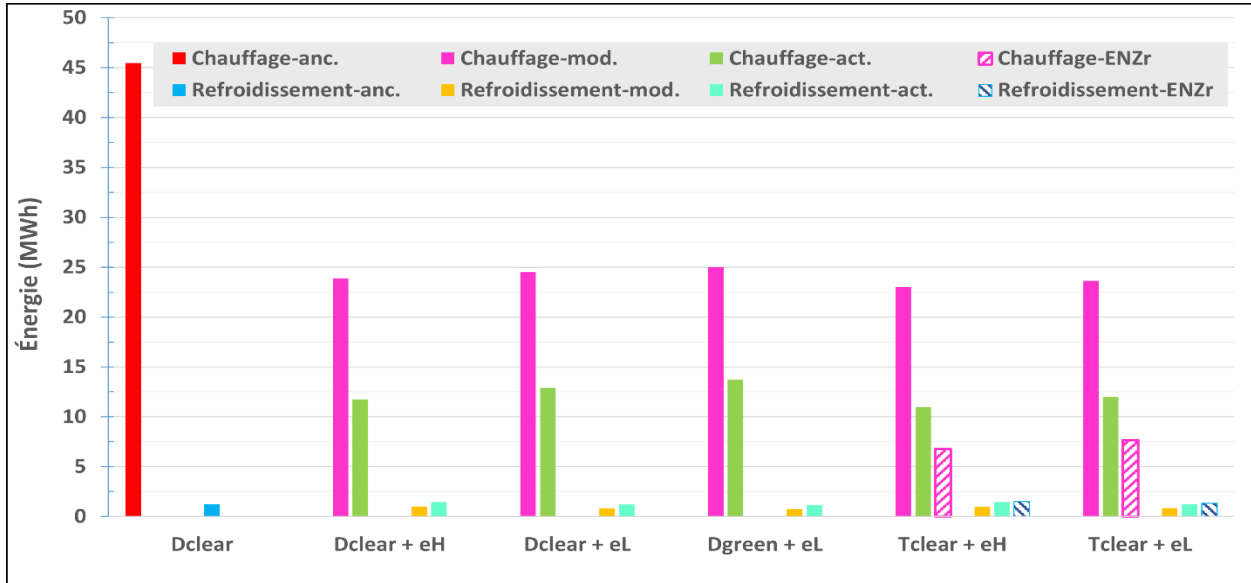


Figure 40 illustre l'effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement des maisons en rangée. Par rapport aux maisons individuelles (

Figure 23), l'effet des types de fenêtres sur la consommation énergétique en chauffage n'est pas significatif (différence de 5 %) du fait de la surface inférieure du vitrage des fenêtres. Il est par conséquent recommandé de choisir des types de fenêtres réduisant le risque de surchauffe indépendamment de la consommation énergétique dans ce type de maison. À cet effet, des fenêtres à valeur CARS faible (< 0,42) doivent être envisagées, mais devront être combinées avec d'autres mesures passives comme une ventilation au moyen de ventilateurs, une ventilation à l'échelle de la maison, ou d'autres mesures visant à réduire ou éliminer le risque de surchauffe.

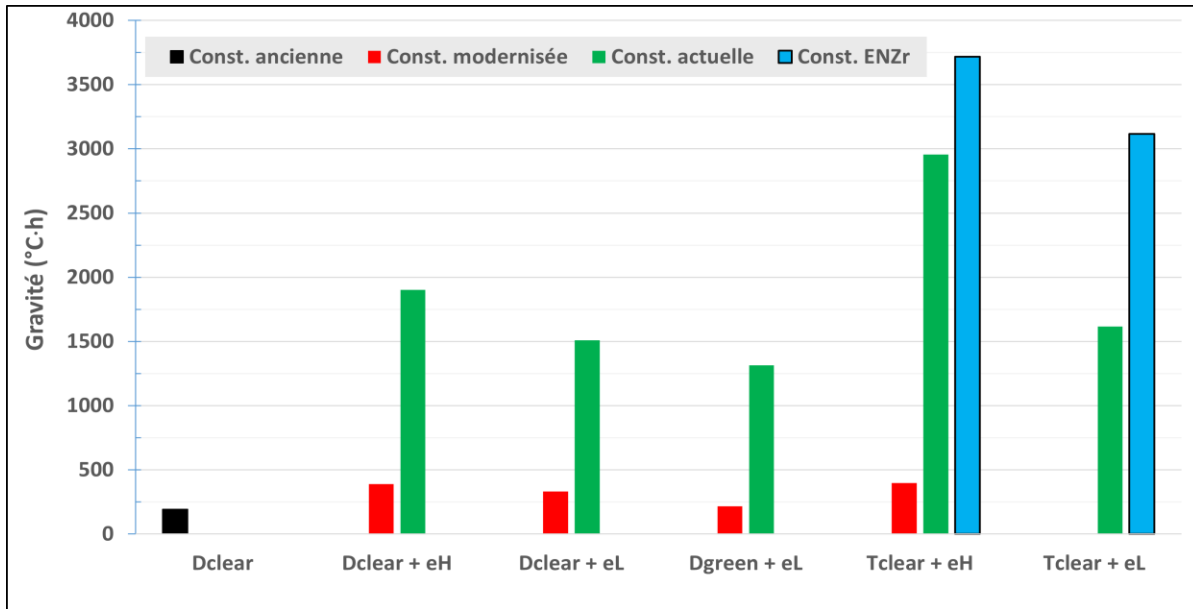


Figure 38. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée, bâties selon des pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

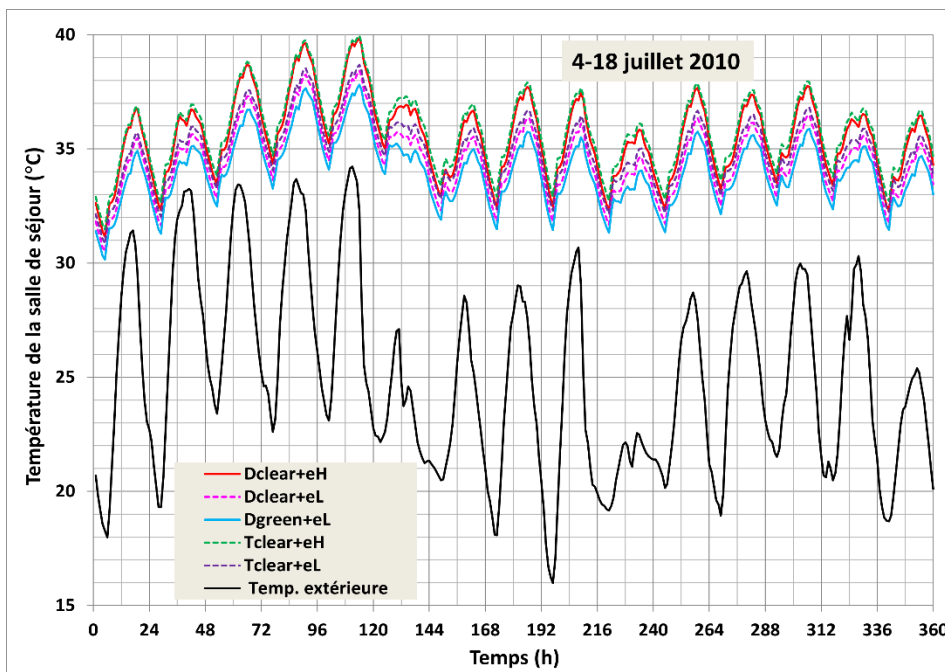


Figure 39. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons en rangée de construction légère

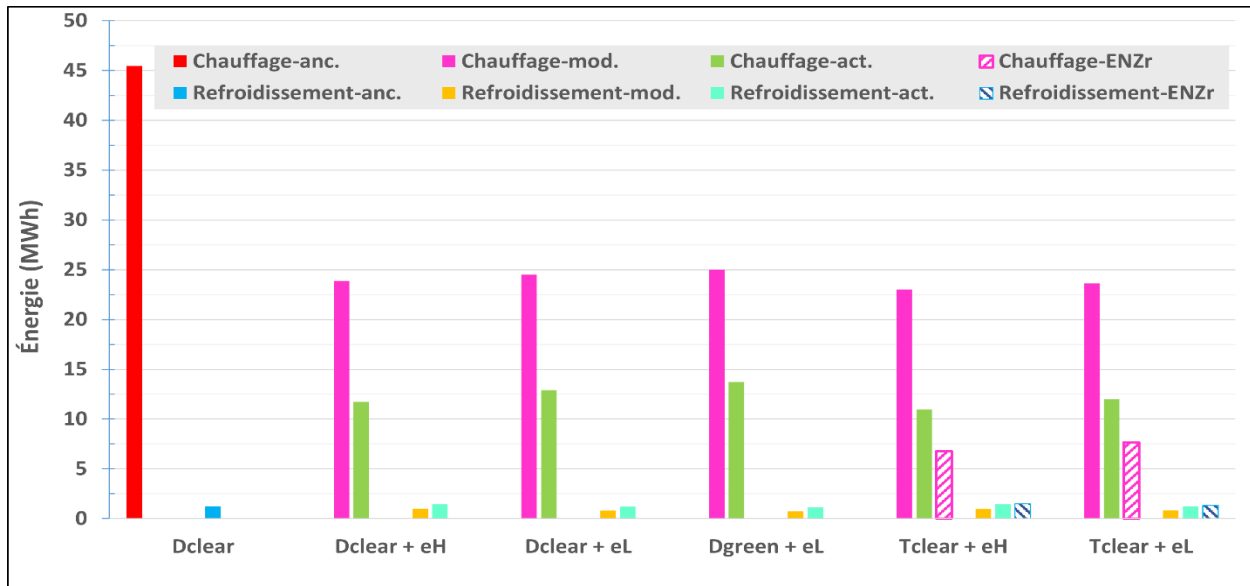


Figure 40. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement de maisons en rangée de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

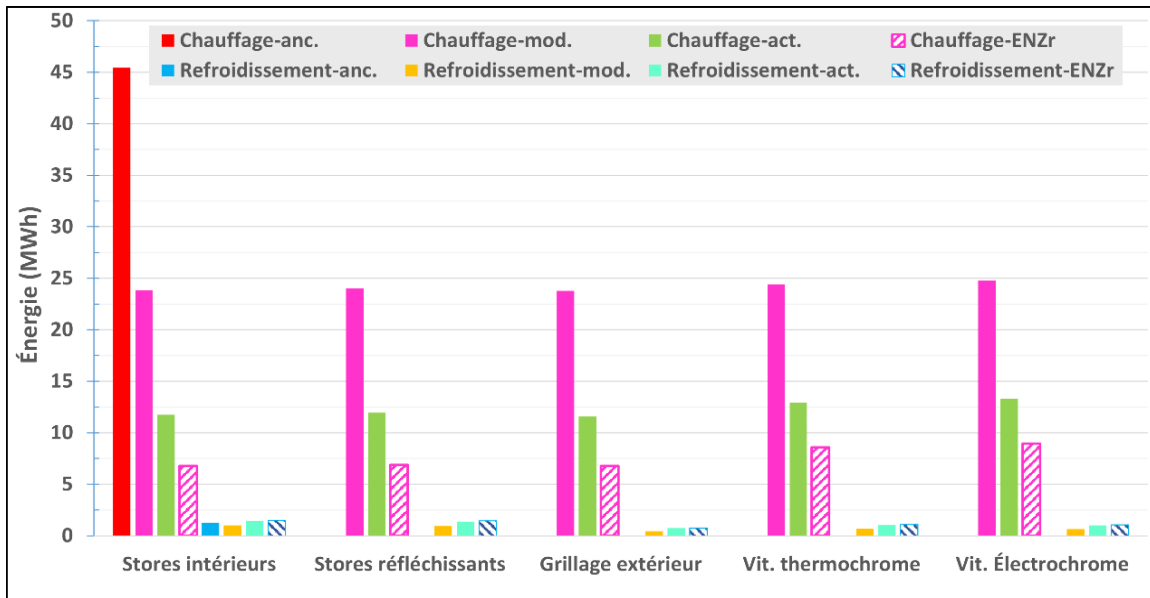
12.2 Effet des dispositifs d'ombrage

La Figure 41 illustre la gravité de la surchauffe calculée dans les conditions climatiques actuelles pour différents types de dispositifs d'ombrage (voir Tableau 20) de maisons en rangée avec des fenêtres types, et de construction légère diverse (bâtiments anciens, modernisés, actuels et ENZr). Les dispositifs d'ombrage sont considérés comme fermés pendant l'été et ouverts le reste du temps. Les dispositifs d'ombrage extérieurs sont les dispositifs d'ombrage les plus efficaces, indépendamment du type de maison, suivis par les fenêtres dynamiques (vitrage électrochrome ou thermochrome), puis les stores intérieurs réfléchissants. Par rapport aux dispositifs d'ombrage intérieurs dans les maisons neuves ou ENZr, les dispositifs d'ombrage extérieurs peuvent réduire le risque de surchauffe de plus de 80 %, suivis des fenêtres dynamiques avec une réduction de 40 %, puis des stores intérieurs réfléchissants (14 %). Dans les maisons modernisées, les dispositifs d'ombrage extérieurs et fenêtres dynamiques sont aptes à réduire ou éliminer le risque de surchauffe selon les critères de la Section 6 (gravité < 230°C*h). Dans les maisons neuves ou ENZr, les dispositifs d'ombrage extérieurs et les fenêtres dynamiques doivent être combinés avec d'autres mesures pertinentes, comme une ventilation à l'échelle de la maison ou une ventilation par ventilateur, afin de réduire ou d'éliminer le risque de surchauffe.

Effets de l'ombrage

Les dispositifs d'ombrage extérieurs et les fenêtres dynamiques s'avèrent efficaces pour réduire le risque de surchauffe dans les maisons modernisées. En ce qui concerne les maisons neuves ou ENZr, les dispositifs d'ombrage extérieurs ou fenêtres dynamiques doivent être combiné(e)s à d'autres mesures, comme une ventilation à l'échelle de la maison toute entière, afin de réduire ou d'éliminer le risque de surchauffe.

La Figure 42 illustre l'effet des dispositifs d'ombrage sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans une maison en rangée de construction légère actuelle avec des fenêtres types (Dclear+eH). Les dispositifs d'ombrage extérieurs peuvent largement réduire les pics de température intérieure au cours de la journée jusqu'à 5°C par rapport à des stores intérieurs, suivis par une réduction de 2°C obtenue pour les fenêtres à vitrage électrochrome ou thermochrome.



La

Figure 43 illustre l'effet des dispositifs d'ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement de maisons en rangée. Les dispositifs d'ombrage conventionnels (intérieurs et extérieurs) réduisent principalement la consommation énergétique liée au refroidissement en été, mais leur effet sur la consommation énergétique liée au chauffage en hiver n'est pas significatif. Néanmoins, les fenêtres dynamiques (à vitrage électrochrome ou thermochrome) peuvent augmenter la consommation énergétique en chauffage jusqu'à 32 % par rapport aux stores intérieurs, du fait de leur valeur CARS inférieure (< 0,41), en particulier dans les maisons ENZr



Figure 41. Effet des dispositifs d'ombrage sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec fenêtres types et bâties selon des pratiques de construction légère (ancienne : Dclear; modernisée : Dclear+eH; actuelle : Dclear+eH; et ENZr : Tclear+eH)

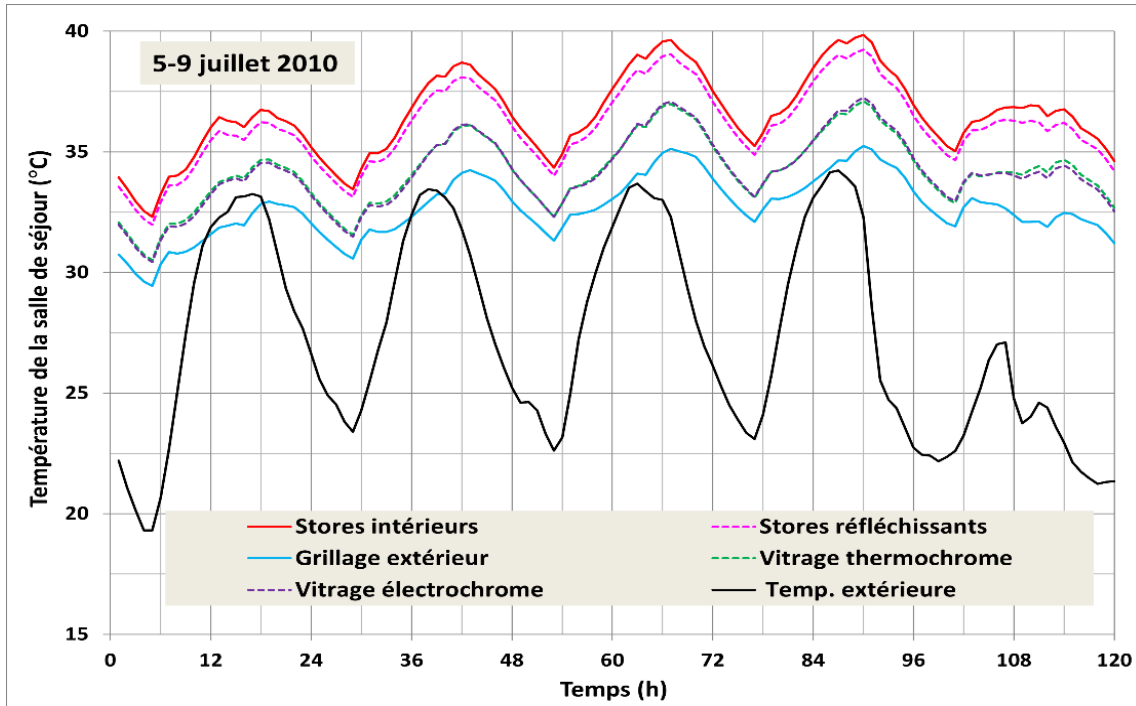


Figure 42 : effet des dispositifs d’ombrage sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons en rangée de construction légère actuelle avec des fenêtres types

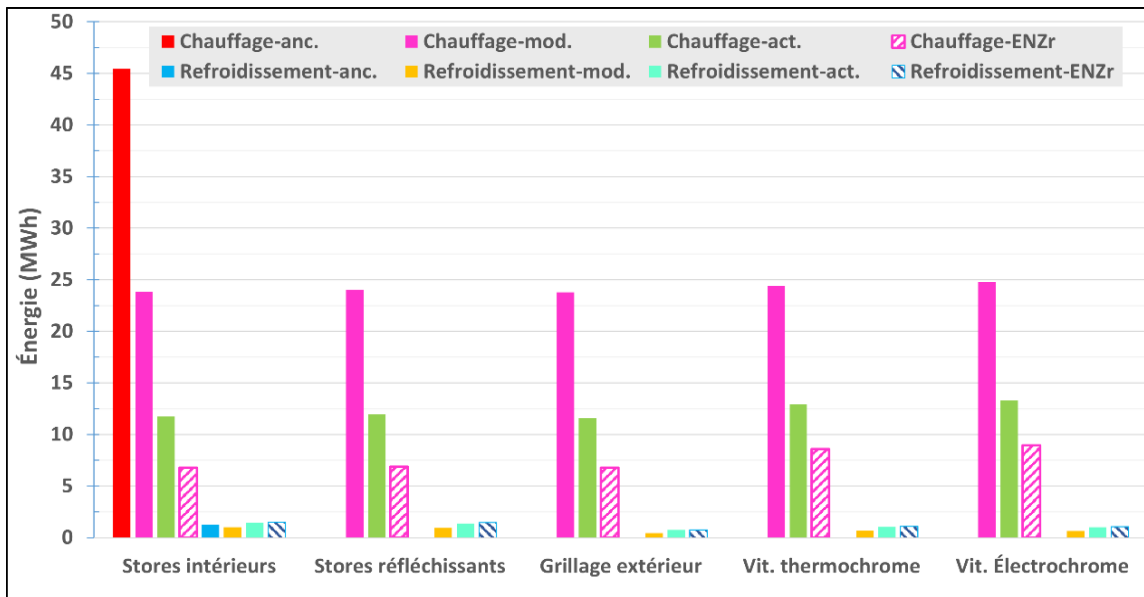


Figure 43. Effet des dispositifs d’ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement dans des maisons en rangée avec des fenêtres types et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)

12.3 Effet de la ventilation des maisons

Trois stratégies de ventilation ont été évaluées dans le cadre de la surchauffe dans des maisons en rangée : (1) la ventilation naturelle en ouvrant 25 % de la surface des fenêtres de la maison lorsque la température intérieure de chaque zone thermique excède 26°C ainsi que la température extérieure; (2) la ventilation de nuit en activant les extracteurs (cuisine et salle de bains), et en augmentant leur débit d'air à 10 fois la valeur nominale (à savoir, 220 litres/s ou 466 PCM) de 22 h 00 à 9 h 00; et (3) le mode mixte, à savoir la ventilation naturelle + la ventilation de nuit. La stratégie de ventilation au moyen de ventilateurs applicable aux maisons individuelles est également valable pour les maisons en rangée, et ne sera donc pas abordée à nouveau ici.

La Figure 44 illustre l'effet des stratégies de ventilation sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée équipées de fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr). Dans les maisons modernisées, la ventilation naturelle ou de nuit est efficace pour réduire ou éliminer le risque de surchauffe selon les critères de la Section 6. La ventilation naturelle peut aussi minimiser voire éliminer le risque de surchauffe dans les maisons neuves ou ENZr. En outre, la ventilation de nuit dans ce type de maison peut réduire le risque de surchauffe de 68 % par rapport à l'absence de ventilation, mais cette configuration nécessite néanmoins la mise en œuvre de mesures supplémentaires,

comme une ventilation au moyen de ventilateurs au cours de la journée, pour réduire ou éliminer le risque de surchauffe. La ventilation en mode mixte ne produit cependant aucun effet

Ventilation des maisons

La ventilation naturelle est une stratégie efficace pour réduire le risque de surchauffe dans tous les types de maisons en rangée. La ventilation de nuit est aussi efficace, mais doit être combinée avec d'autres mesures, comme la ventilation par ventilateur, afin de réduire le risque de surchauffe dans les maisons neuves et ENZr.

significatif supplémentaire par rapport à la ventilation naturelle. La

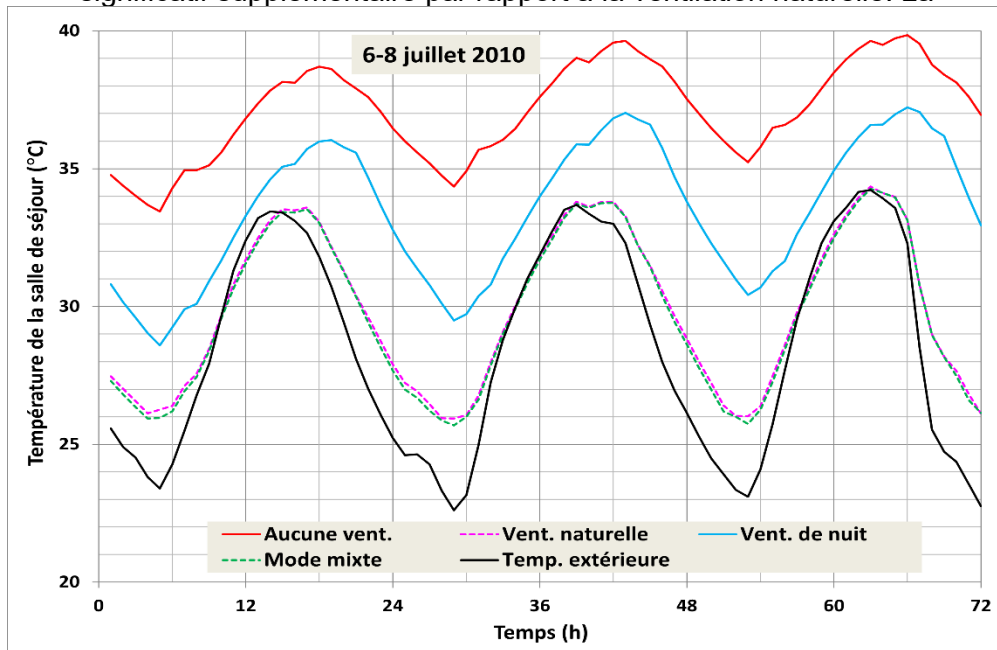


Figure 45 illustre l’effet des stratégies de ventilation à l’échelle de la maison sur la température de la salle de séjour pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des maisons en rangée de construction légère actuelle avec des fenêtres types. La ventilation naturelle peut réduire les pics de température intérieure au cours de la journée jusqu’à 6°C par rapport à l’absence de ventilation, suivie par une réduction de 3°C pour la ventilation nocturne.

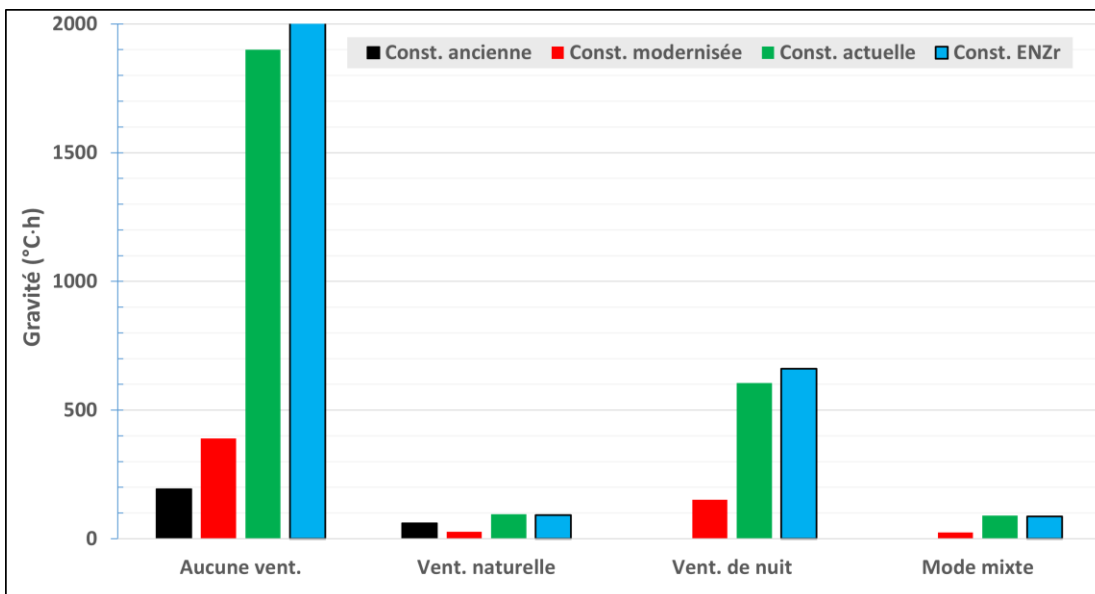


Figure 44. Effet de la ventilation à l’échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction

légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)

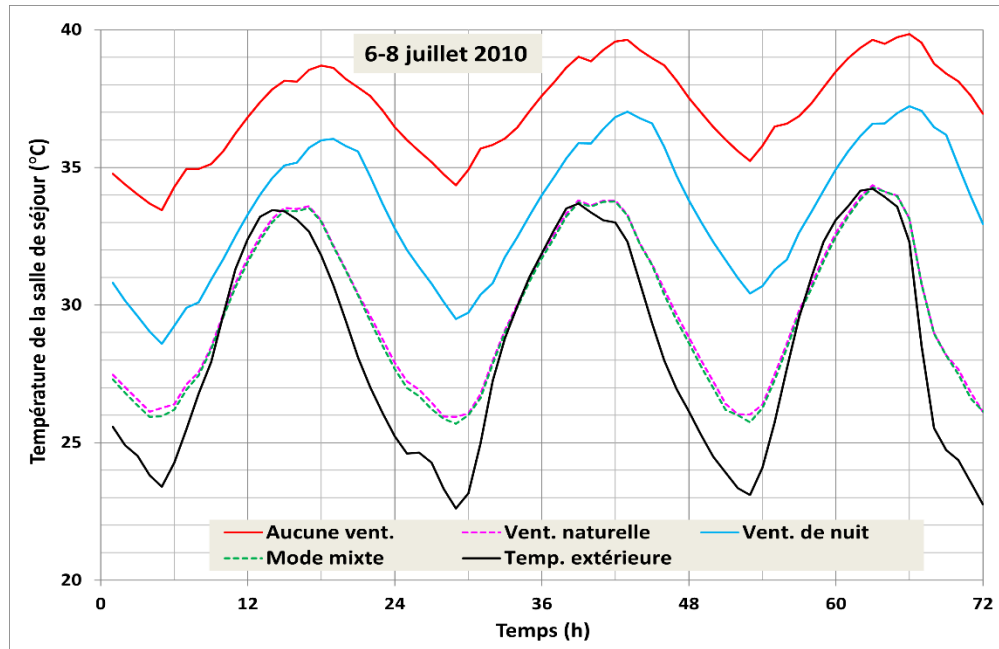


Figure 45. Effet des stratégies de ventilation à l'échelle de la maison sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec des fenêtres types et bâties selon les pratiques de construction légère actuelles

12.4 Effet du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé

La

Refroidissement mécanique

Le refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé s'avère efficace pour réduire ou éliminer le risque de surchauffe dans les maisons anciennes et modernisées, mais nécessite d'être combiné avec d'autres mesures passives, comme la ventilation par ventilateur ou la ventilation de nuit dans les maisons neuves ou ENZr.

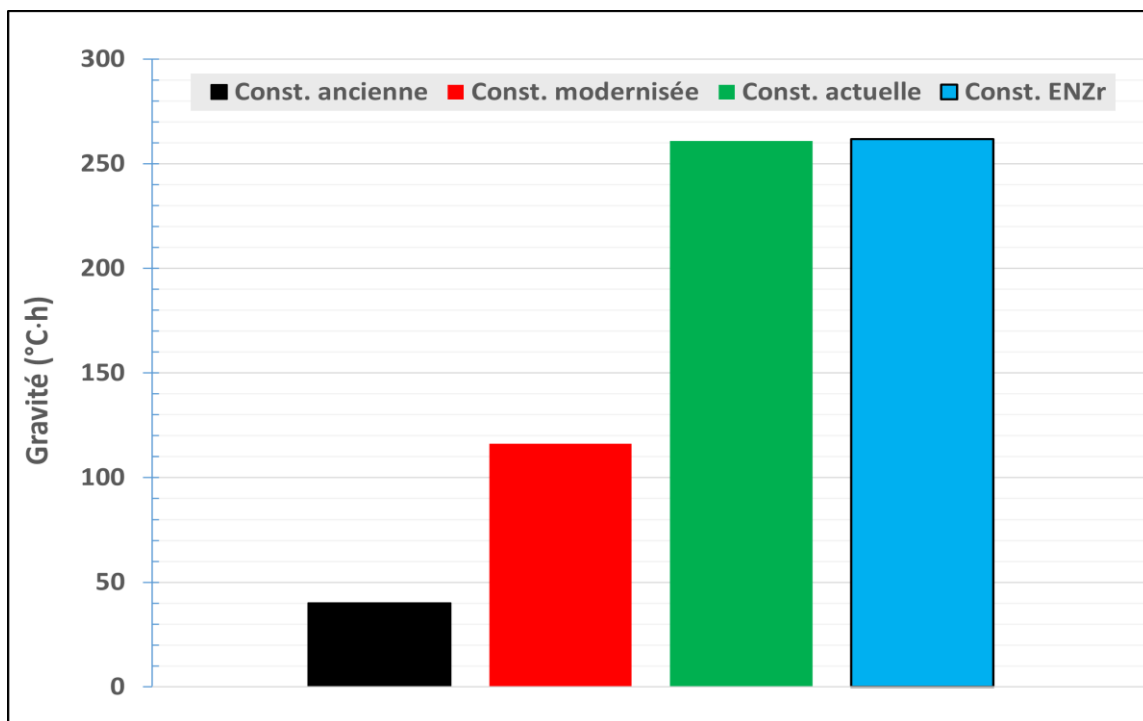


Figure 46 montre l'effet du refroidissement mécanique avec une température du point de consigne (supérieur) abaissé sur le risque de surchauffe dans des maisons en rangée avec des

fenêtres types protégées par des stores intérieurs et bâties selon différentes pratiques de construction locales. L'abaissement de la température du point de consigne de refroidissement à 31°C (correspondant à une valeur SET de 30°C, sensation légèrement tiède) peut réduire efficacement le risque de surchauffe au cours des événements de chaleur extrême, voire l'éliminer dans les maisons anciennes et modernisées (gravité < 230°C*h). Cependant, la réduction ou l'élimination du risque de surchauffe dans les maisons en rangée neuves ou ENZr requiert la mise en œuvre de stratégies passives complémentaires telles que la ventilation au moyen de ventilateurs, l'ouverture de fenêtres ou l'utilisation de la ventilation mécanique au cours de la nuit pour évacuer de la maison tous les gains de chaleur interne excessive accumulés au cours de la journée.

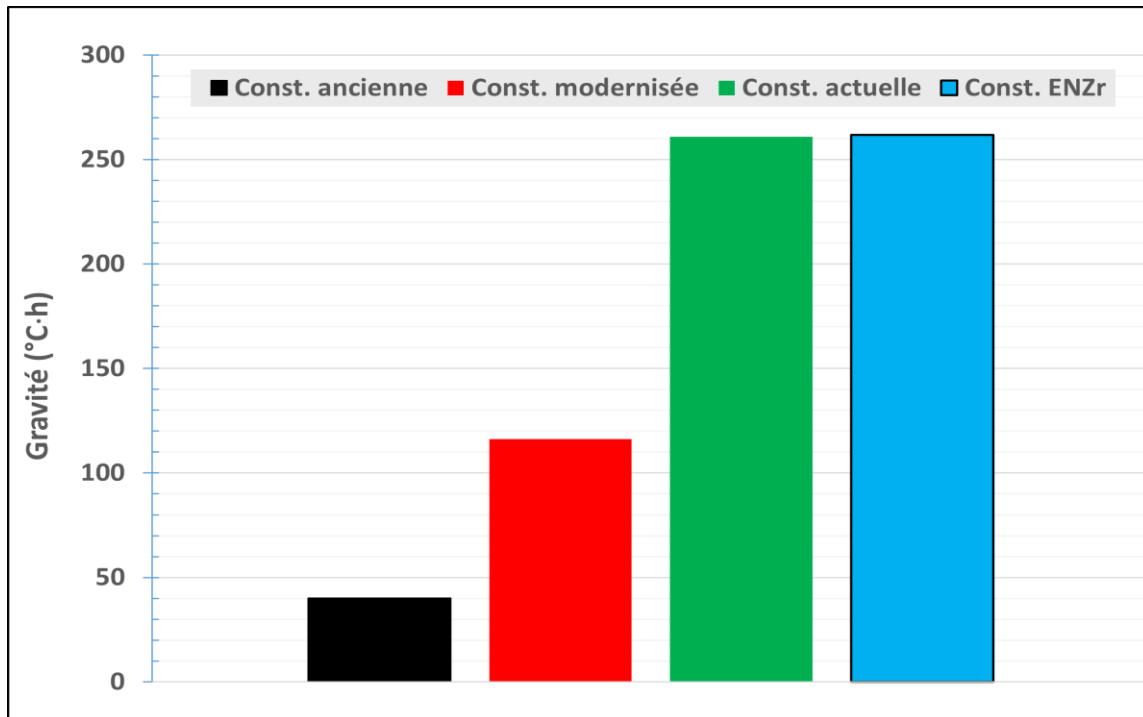


Figure 46. Effets du refroidissement mécanique avec température du point de consigne abaissé sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

12.5 Effet du type de construction

La surchauffe a été évaluée avec deux types de constructions (voir Tableau 22) : (1) construction légère avec bardage vinyle; et (2) construction moyenne avec parement de brique.

La Figure 47 illustre l'effet du type de construction sur la gravité de la surchauffe dans des maisons équipées de fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon des pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr).

Pour tenir compte de la ventilation naturelle passive dans ces maisons, les fenêtres étaient ouvertes si la température intérieure excédait 26°C ainsi que la température extérieure. De la même manière que pour les maisons individuelles (voir

Types de constructions
Le type de construction (masse légère ou moyenne) n'a aucun effet significatif sur le risque de surchauffe.

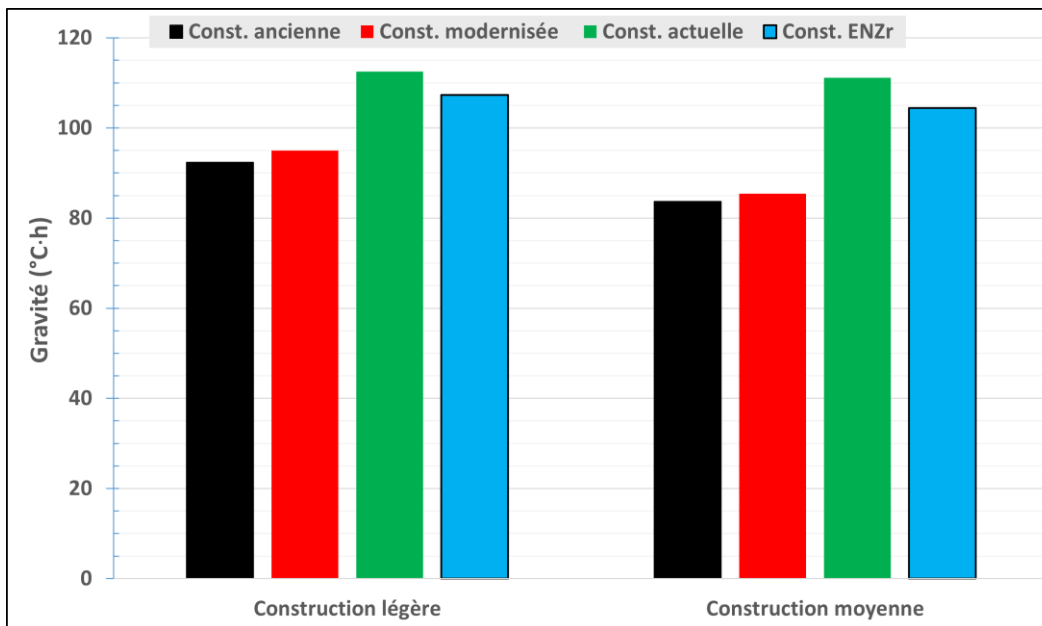


Figure 32), les deux types de constructions ont des effets négligeables sur le risque de surchauffe. Cela peut être dû au fait que le niveau élevé d'isolation derrière le parement de brique (masse moyenne) limite le stockage de chaleur dans le bardage, et réduit aussi la quantité de chaleur qui atteint l'espace intérieur.

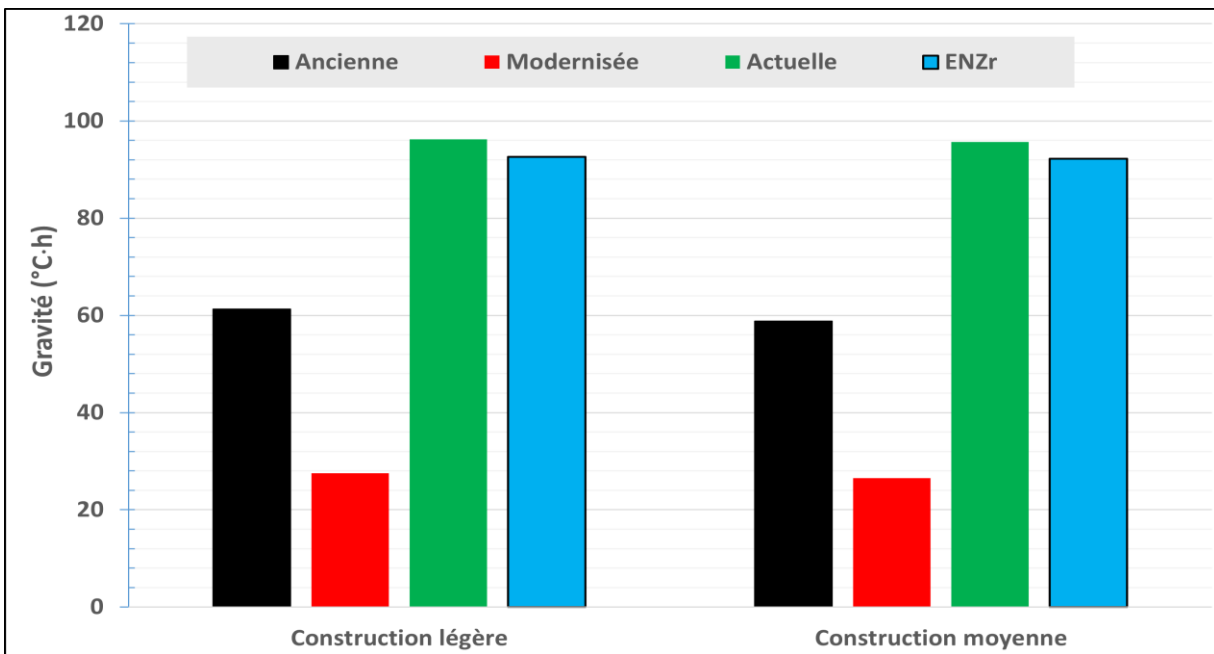


Figure 47. Effets du type de construction sur la gravité de la surchauffe dans des maisons en rangée ventilées naturellement avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

12.6 Consommation énergétique et risque de surchauffe des bâtiments

La

Figure 48 illustre la relation entre la consommation énergétique totale (en électricité et en gaz) des bâtiments et la gravité de la surchauffe. Les

données sont tracées pour tous les types de constructions comprenant des fenêtres protégées par des dispositifs d'ombrage intérieurs (y compris des fenêtres dynamiques, mais hors dispositifs d'ombrage extérieurs). Les maisons sont considérées comme non ventilées naturellement. Il apparaît clairement que la consommation énergétique totale est inversement proportionnelle au risque de surchauffe dans les maisons hermétiques ou non ventilées naturellement. Plus les exigences en matière d'efficacité énergétique sont strictes (ou la consommation énergétique est faible), plus le risque de surchauffe est important. Il est par conséquent recommandé de mettre en œuvre des mesures passives ou actives afin de réduire le

risque de surchauffe dans les maisons neuves ou ENZr futures, si le refroidissement mécanique ne constitue pas une option viable. Ces mesures peuvent inclure des stores extérieurs avec ou sans ventilation par ventilateur, une ventilation naturelle (s'il est possible d'ouvrir les fenêtres en été), une ventilation mécanique utilisant des ventilateurs par alimentation ou des extracteurs, des ventilateurs récupérateurs de chaleur, mais avec des débits d'air supérieurs jusqu'à 10 fois les valeurs nominales, avec option de dérivation en été afin d'éviter le préchauffage de l'air extérieur.

Consommation énergétique et surchauffe

Le risque de surchauffe est inversement proportionnel à la consommation énergétique totale dans les maisons hermétiques ou non ventilées naturellement. Des mesures passives ou actives doivent par conséquent être prises dans les maisons à niveau d'isolation élevé, afin de réduire le risque de surchauffe.

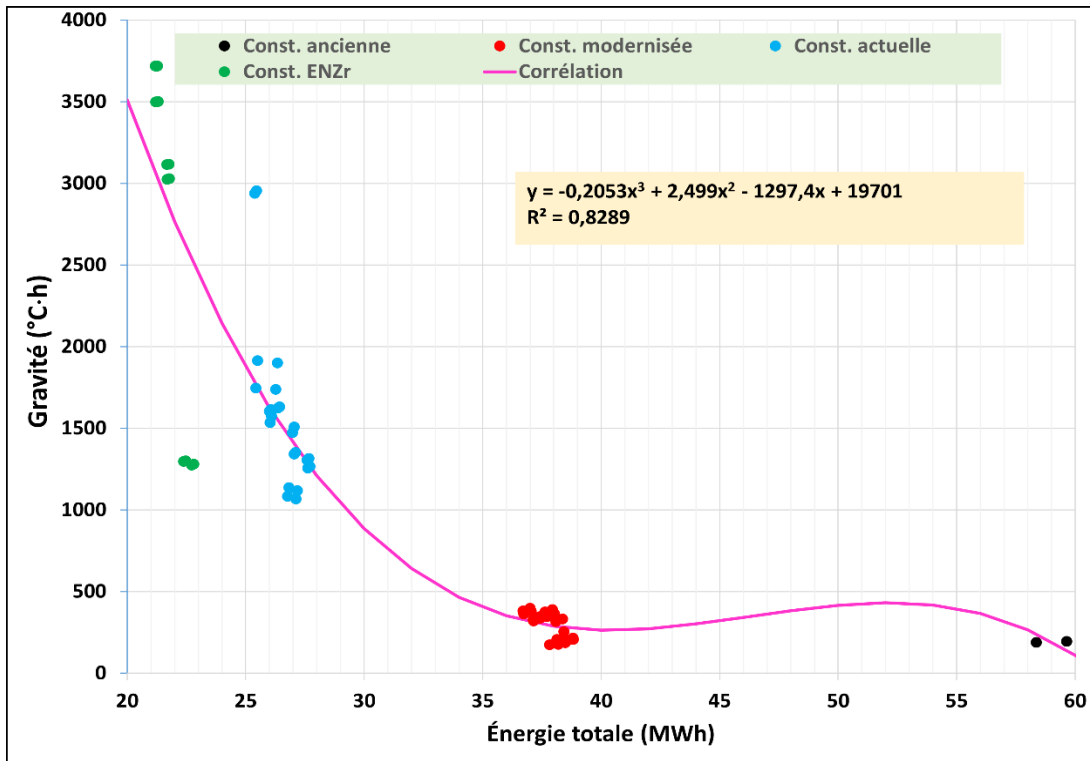


Figure 48. Relation entre la consommation énergétique totale et le risque de surchauffe dans des maisons en rangées non ventilées naturellement et bâties selon quatre pratiques de construction locales différentes (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

12.7 Effet du réchauffement planétaire sur le risque de surchauffe et l'énergie

De la même manière que pour les maisons individuelles (Section 11), des simulations ont été menées pour sept scénarios de réchauffement climatique : RP0,0 (climat actuel), RP0,5 (2001 - 2031), RP1,0 (2013 - 2043), RP1,5 (2024 - 2054), RP2,0 (2034 - 2064), RP2,5 (2044 - 2074), RP3,0 (2053 - 2083) et RP3,5 (2062 - 2092). Les Figure 49 à Figure 51 illustrent l'effet du degré de réchauffement planétaire sur la gravité et l'intensité des événements de surchauffe dans les maisons modernisées, neuves (actuelles) et ENZr, respectivement, avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées). Toutes les fenêtres typiques des maisons sont protégées par des stores intérieurs en été. La gravité et l'intensité des événements de surchauffe augmentent avec le degré de réchauffement planétaire. D'ici la fin du 21^e siècle, la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons modernisées sans ventilation naturelle pourront respectivement augmenter jusqu'à 435 % et 46 % par rapport au climat actuel (RP0,0). La mise en œuvre d'une ventilation naturelle dans de telles maisons peut réduire le risque de surchauffe jusqu'à 70 %, et réduire ou éliminer le risque de surchauffe jusqu'à RP1,0 (2013 - 2043). De la même manière, la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons neuves ou ENZr augmenteront respectivement de 116 % (sans ventilation naturelle) à 3360 % (avec ventilation naturelle), et de 48 % (sans ventilation naturelle) à 400 % (avec ventilation naturelle). D'ici la fin du scénario de réchauffement climatique RP1,0, la ventilation naturelle dans ce type de maison nécessitera d'être combinée avec d'autres mesures afin de minimiser ou d'éliminer le risque de surchauffe au cours des prochains scénarios de réchauffement planétaire.

Sur la

Figure 52, l'effet du réchauffement planétaire est représenté dans les variations relatives (par rapport à RP0,0) en matière de consommation énergétique liée au chauffage, liée au refroidissement et totale (chauffage + refroidissement) des maisons modernisées, neuves (actuelles) et ENZr. Le réchauffement planétaire réduit la consommation énergétique liée au chauffage, mais augmente celle liée au refroidissement. D'ici la fin du 21^e siècle, la consommation énergétique liée au chauffage et au refroidissement des maisons modernisées sera respectivement réduite de 33 % et augmentée de 60 %. Pour les maisons neuves (ou ENZr), la consommation énergétique relative baissera de 35 % (39 %) pour le chauffage et augmentera de 43 % (37 %) pour le refroidissement.

Réchauffement planétaire

Le RP augmente la gravité et l'intensité des événements de surchauffe jusqu'à 3360 % et 400 % respectivement, dans les maisons ventilées naturellement. D'ici la fin du RP1,0, des mesures supplémentaires combinées à la ventilation naturelle devront être prises dans les maisons neuves ou ENZr afin de réduire ou d'éliminer le risque de surchauffe.

Le RP peut réduire la consommation énergétique liée au chauffage jusqu'à 39 % et augmenter la consommation énergétique liée au refroidissement jusqu'à 43 % dans les maisons neuves ou ENZr.

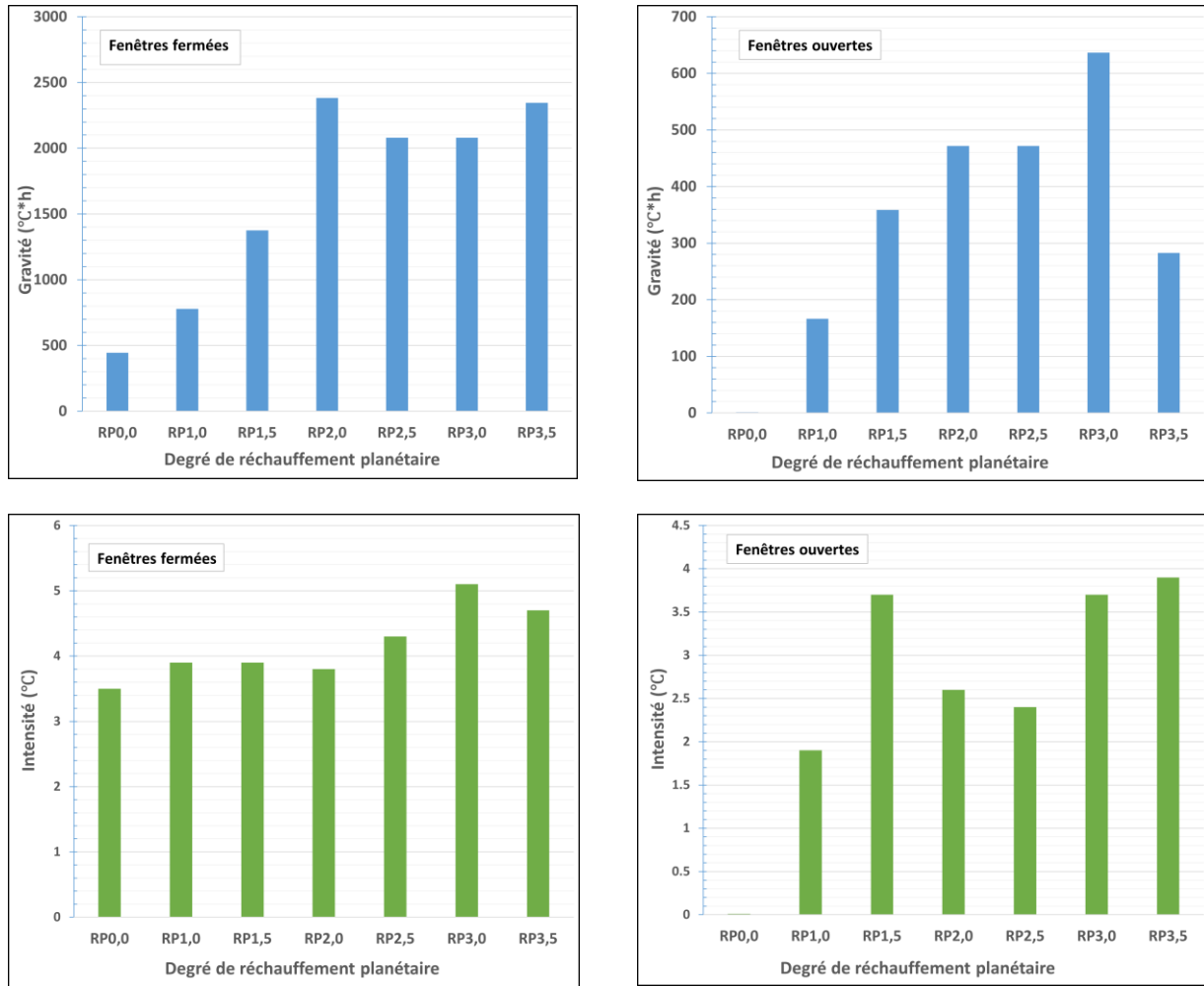


Figure 49. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons en rangée modernisées avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).

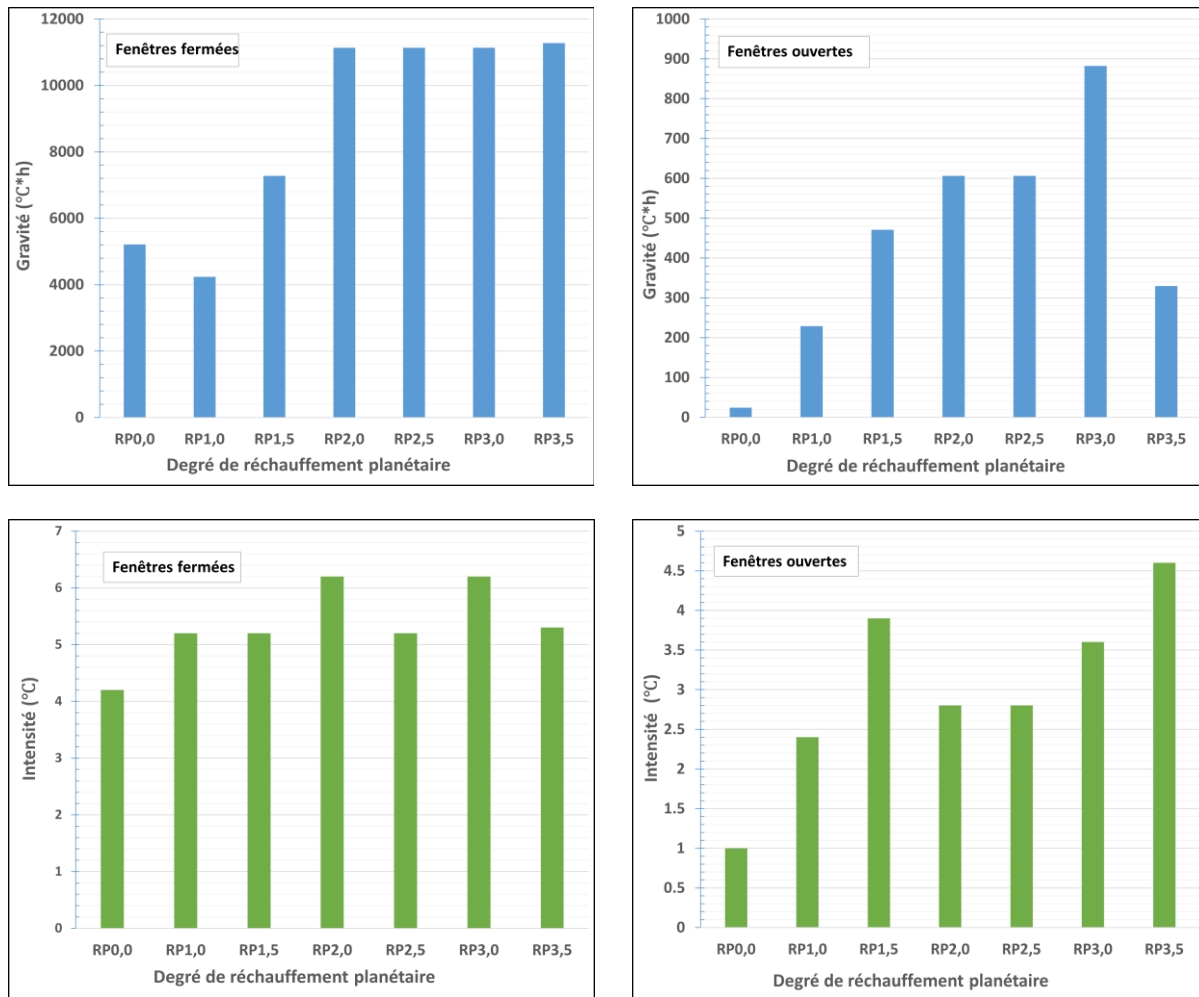


Figure 50. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons en rangée neuves (actuelles) avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).

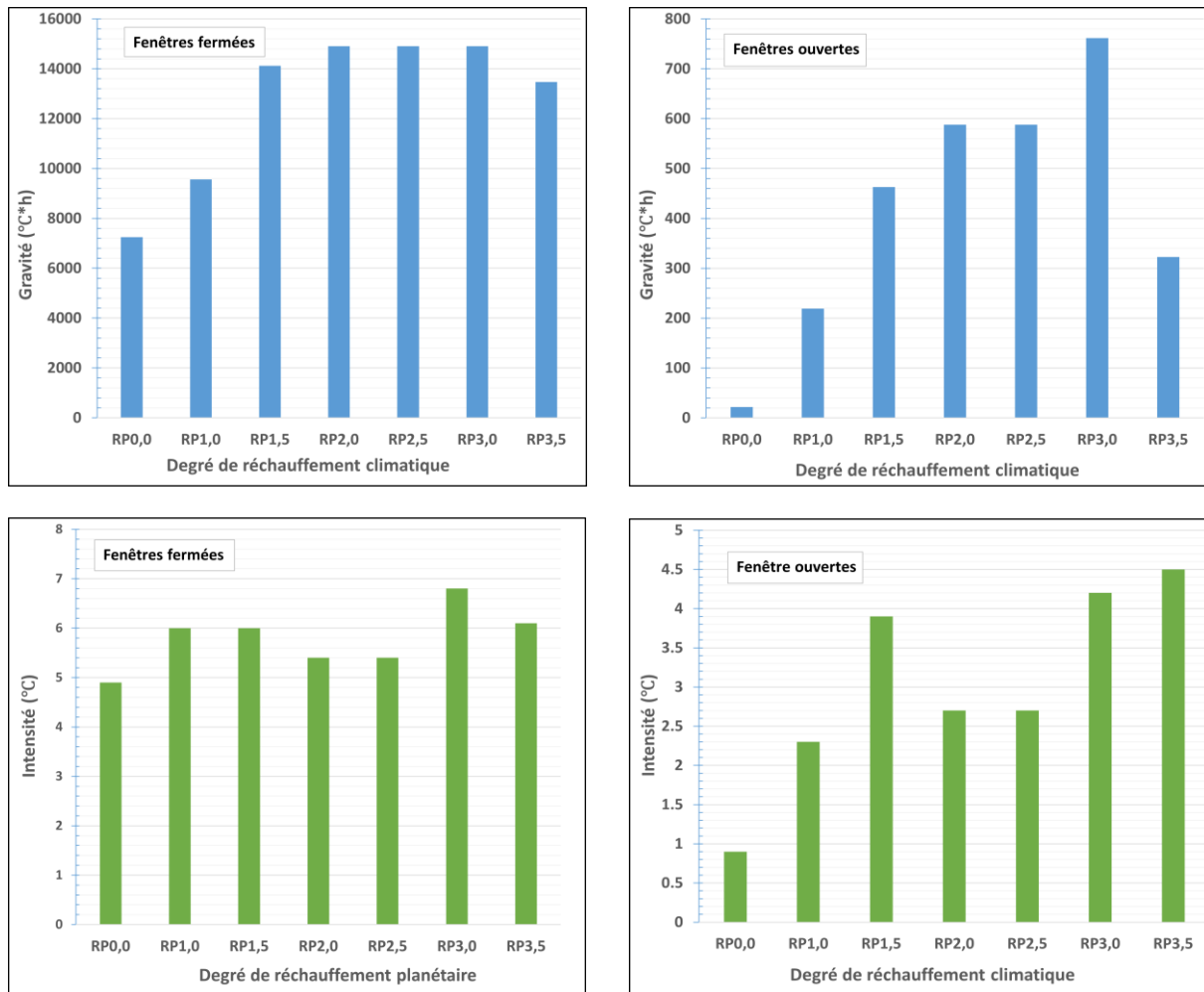


Figure 51. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les maisons en rangée ENZr avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs et avec ventilation naturelle activée (fenêtres ouvertes) ou non (fenêtres fermées).

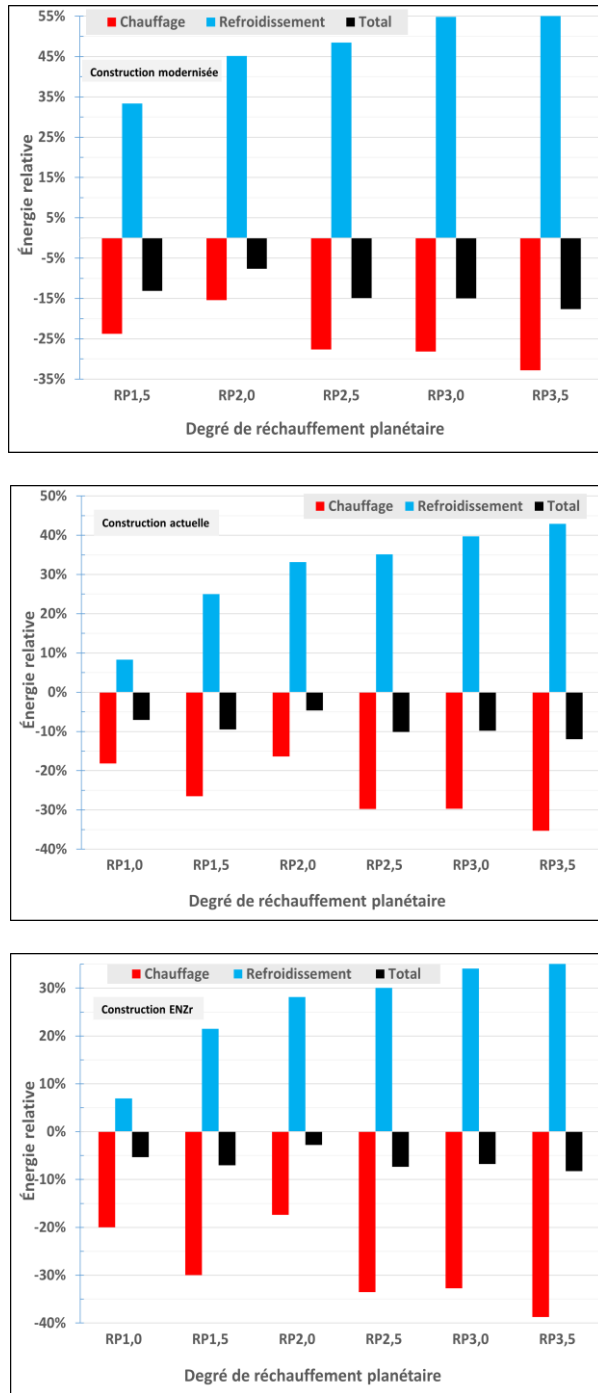


Figure 52. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur les variations relatives de consommation énergétique en matière de chauffage, de refroidissement et totale des maisons en rangée avec fenêtres types protégées par des stores intérieures

Immeubles résidentiels à logements multiples et de moyenne hauteur



Crédit photo : www.dreamstime.com

13 SURCHAUFFE DANS LES IRLM DE MOYENNE HAUTEUR

La méthodologie d'évaluation de la surchauffe présentée dans les Sections 6 et 9 a été appliquée à des immeubles résidentiels à logements multiples (IRLM) de moyenne hauteur dans les conditions climatiques actuelles et pour les projections à Ottawa (Ontario). L'IRLM de moyenne hauteur considéré ici est un bâtiment de quatre étages dont les façades les plus longues sont orientées vers le nord et vers le sud (voir Figure 79, Annexe A). Chaque étage du bâtiment est constitué d'une série de suites séparées par un couloir central (Figure 79). Chaque suite se divise en deux zones thermiques (salle de séjour et chambre). Les occupants sont considérés comme vivant dans la salle de séjour la journée ou dormant dans la chambre la nuit. Au premier étage, une suite située à l'extrémité est (SE, Figure 79) est convertie en deux bureaux uniquement occupés pendant la journée. Ces bureaux ne sont pas pris en compte dans l'analyse de la surchauffe. Un escalier intérieur relie verticalement les différents étages.

La procédure de simulation de bâtiment a été utilisée pour obtenir les résultats de la surchauffe dans les IRLM de moyenne hauteur types construits selon trois types de constructions (légère, moyenne et lourde) et quatre pratiques de construction locales : bâtiment ancien (années 1980), bâtiment modernisé conformément aux exigences du code national du bâtiment (CNB) en vigueur (CNRC, 2015), bâtiment actuel (ou neuf) conformément au CNB, et bâtiment à énergie nette zéro (ENZr) (avec une augmentation de 30 % des niveaux d'isolation des enveloppes de bâtiment). Les détails du modèle de simulation figurent dans l'Annexe A. Les sections suivantes présentent les résultats relatifs à la surchauffe pour les mesures choisies, comme décrit dans la Section 10.

13.1 Effet des types de fenêtres

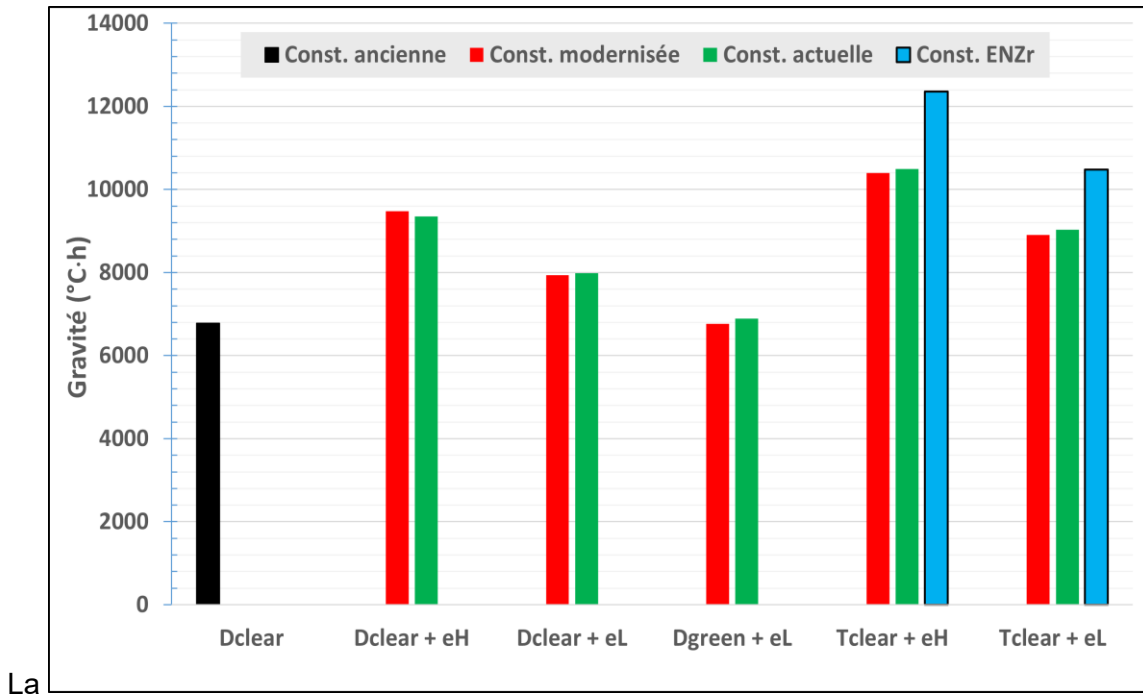


Figure 53 illustre la gravité maximale de la surchauffe dans les suites de l'IRLM calculée dans les conditions climatiques actuelles pour différents types de fenêtres (voir Tableau 21) et diverses pratiques de construction légère (bâtiments anciens, modernisés, actuels et ENZr). Les fenêtres sont considérées comme étant fermées et protégées par des stores intérieurs pendant l'été. Selon les critères de surchauffe donnés dans la Section 6, la totalité ou une partie des suites de l'IRLM est concernée par la surchauffe (gravité >> 230 °C·h). Les suites de l'extrémité ouest (SO), en particulier au quatrième étage, sont soumises au risque de surchauffe le plus élevé, alors que les suites face au nord (N1, N2) du premier étage sont les moins concernées par ce risque. En outre, le risque de surchauffe augmente proportionnellement à la hauteur de l'étage (voir les Figure 62 à Figure 65 pour plus de détails). Le risque de surchauffe dépend de la pratique de construction locale appliquée. Concrètement, les IRLM anciens et mal isolés présentent un risque largement inférieur de surchauffe, suivis par les IRLM modernisés ou neufs, puis les IRLM ENZr futurs. Les fenêtres ayant une valeur CARS faible permettent d'abaisser le risque de surchauffe, mais la surchauffe ne peut néanmoins pas être éliminée avec cette seule mesure. Les fenêtres à double vitrage teinté en vert à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité (Dgreen+eL; CARS = 0,30) donnent les meilleurs résultats en matière de réduction du risque, et sont en mesure de réduire le risque de surchauffe de 29 % par rapport aux fenêtres à double vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Dclear+eH; CARS = 0,67),

Effets des fenêtres

Choisir des fenêtres dont la valeur CARS et le coefficient U sont faibles (< 0,42 et < 1,6 W/m².C respectivement) afin de réduire la consommation énergétique en chauffage ainsi que le risque de surchauffe, en particulier dans les IRLM à ventilation naturelle limitée (les fenêtres restant la majeure partie du temps fermées en été).

suivies des fenêtres à double vitrage clair à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité (Dclear+eL; CARS = 0,42) avec une réduction de 20 %. Paradoxalement, les fenêtres à triple vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Tclear+eH; CARS = 0,57) entraînent le risque de surchauffe le plus important, en particulier dans les IRLM ENZr.

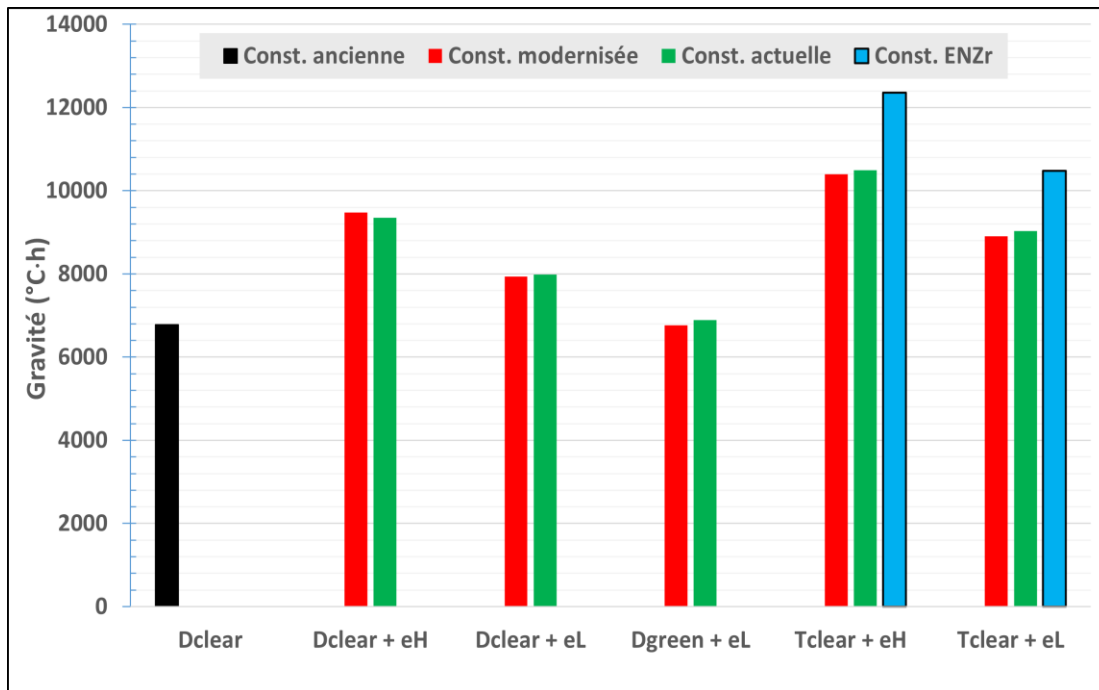


Figure 53. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la gravité maximale de la surchauffe dans les suites d'IRLM bâtis selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

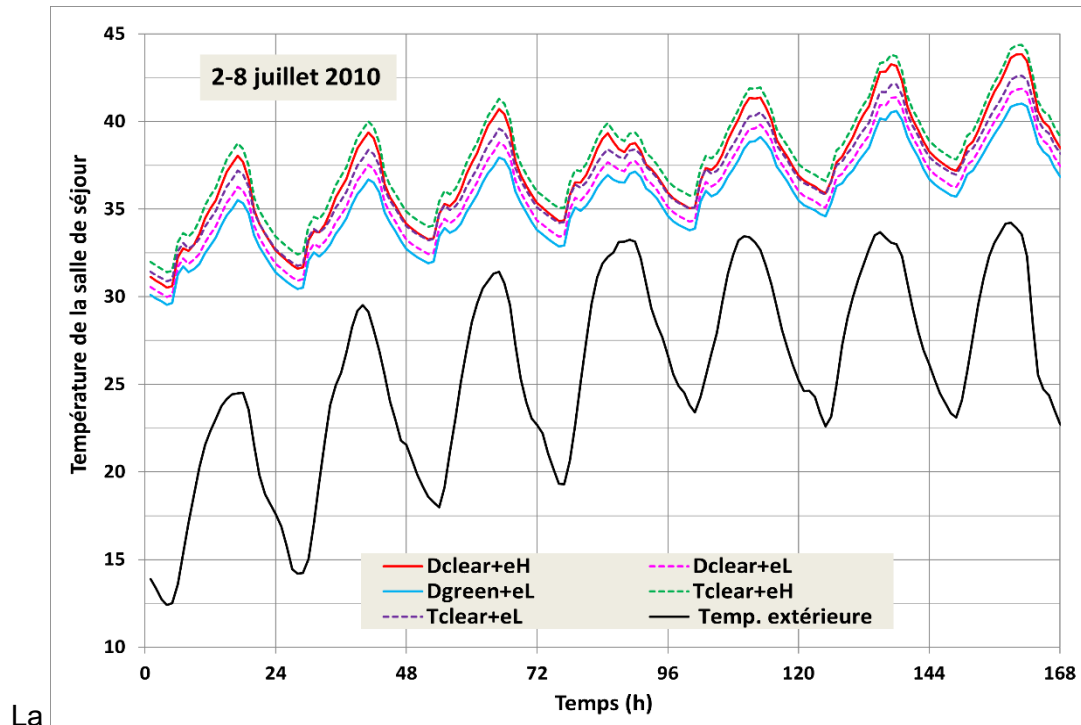


Figure 54 illustre l'effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM de construction légère actuelle. Les fenêtres dont les valeurs CARS sont faibles (comme Dgreen+eL et Dclear+eL) peuvent réduire les pics de température intérieure jusqu'à 2,9°C. Les fenêtres dont les valeurs CARS sont élevées (Dclear+eH, Tclear+eH) présentent les pics de température intérieure les plus importants (43,7°C).

La

Figure 55 illustre l'effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement des IRLM. La consommation énergétique en refroidissement représente une petite partie (< 9 %) de la consommation énergétique en chauffage. Les fenêtres doivent par conséquent être choisies de manière à minimiser la consommation énergétique en chauffage tout en réduisant le risque de surchauffe. Par opposition à la surchauffe, les fenêtres à triple vitrage clair à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité (Tclear+eH) ont entraîné la consommation de chauffage la plus faible (environ 12 % par rapport à Dclear+eH). En outre, les fenêtres à valeur CARS faible (Dgreen+eL et Dclear+eL) entraînent une consommation énergétique en chauffage légèrement supérieure (4 %). Les fenêtres des IRLM doivent être sélectionnées de manière à ce que leurs valeur CARS et coefficient U au centre du vitrage soient faibles (< 0,42 et < 1,6 W/m²C respectivement), en particulier dans les IRLM avec une utilisation limitée de la ventilation naturelle (à savoir que les fenêtres restent fermées au cours des événements de chaleur en période estivale).

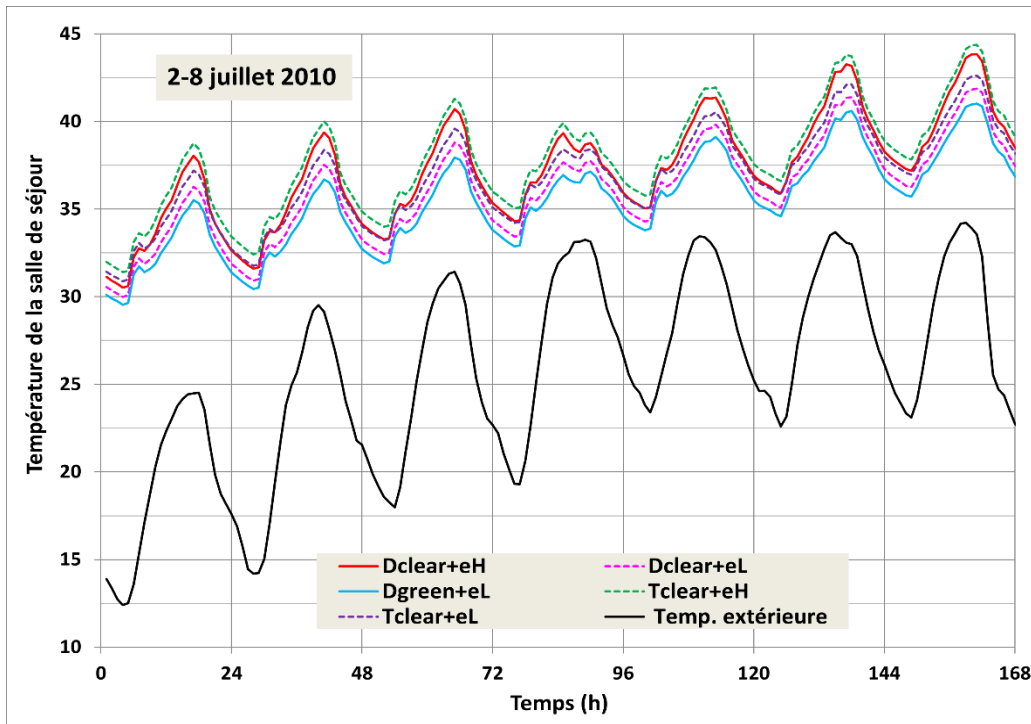


Figure 54. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM de construction légère actuelle

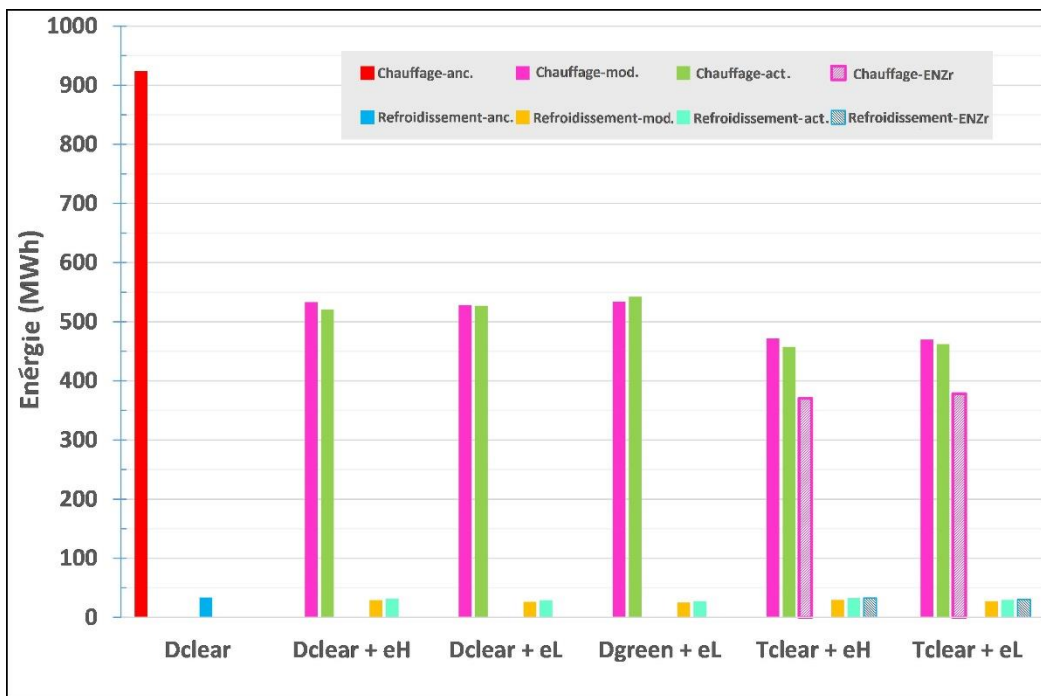


Figure 55. Effet des types de fenêtres protégées par des stores intérieurs sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement d'IRLM de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

13.2 Effet des dispositifs d'ombrage

La

Figure 56 illustre les valeurs maximale et minimale de la gravité de la surchauffe dans les suites, calculées dans les conditions climatiques actuelles pour différents types de dispositifs d'ombrage (voir Tableau 20) dans des IRLM avec des fenêtres types et de construction légère (bâtiments anciens, modernisés, actuels et ENZr). Les dispositifs d'ombrage sont considérés comme fermés pendant l'été et ouverts le reste du temps. Les valeurs maximales de la gravité de la surchauffe ont été obtenues dans les suites du quatrième étage, alors que les valeurs minimales ont été calculées dans les suites du premier étage (voir Figure 62 à Figure 65). Comme prévu, les dispositifs d'ombrage extérieurs sont les plus efficaces, suivis par les fenêtres avec du vitrage électrochrome, les fenêtres avec du vitrage thermochrome, et enfin les stores intérieurs réfléchissants. Par rapport à des stores intérieurs types, les dispositifs d'ombrage extérieurs peuvent réduire la surchauffe de plus de 76 %, suivis par les fenêtres avec vitrage électrochrome (60 %), les fenêtres avec vitrage thermochrome (42 %), puis les stores intérieurs réfléchissants (5 %). Dans les IRLM anciens et modernisés, les dispositifs d'ombrage extérieurs et les fenêtres dynamiques (à vitrage électrochrome ou thermochrome) peuvent éliminer le risque de surchauffe dans certaines suites, en particulier celles situées au rez-de-chaussée. Dans les IRLM neufs ou ENZr, les dispositifs d'ombrage devraient être combinés à d'autres mesures, comme une ventilation à l'échelle de la suite toute entière, afin de réduire le risque de surchauffe. Les fenêtres dynamiques peuvent cependant entraîner une hausse de la consommation énergétique en chauffage, tel qu'on le verra ultérieurement.

La

Figure 57 illustre l'effet des dispositifs d'ombrage sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types et de construction légère actuelle. Les dispositifs d'ombrage extérieurs peuvent largement réduire les pics de température intérieure jusqu'à 7°C par rapport aux stores intérieurs, suivis par une réduction de 5,5°C obtenue pour les fenêtres à vitrage électrochrome ou thermochrome.

La

Figure 58 illustre l'effet des dispositifs d'ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement des IRLM. Les dispositifs d'ombrage conventionnels (intérieurs et extérieurs) réduisent principalement la consommation énergétique liée au refroidissement en été, mais leur effet sur la consommation énergétique liée au chauffage en hiver n'est pas significatif dans les IRLM. Néanmoins, les fenêtres dynamiques dans les IRLM ENZr peuvent augmenter la consommation énergétique en chauffage jusqu'à 20 % par rapport aux stores intérieurs, du fait de leur valeur CARS inférieure ($< 0,41$).

Effets de l'ombrage

Choisir des dispositifs d'ombrage extérieurs ou des fenêtres dynamiques de manière à réduire le risque de surchauffe dans certaines suites d'IRLM modernisés. Dans les IRLM neufs ou ENZr, les dispositifs d'ombrage extérieurs ou fenêtres dynamiques doivent être combiné(e)s à d'autres mesures, comme une ventilation à l'échelle de la suite toute entière, afin de réduire le risque de surchauffe. Les fenêtres dynamiques peuvent néanmoins augmenter la consommation énergétique en chauffage de 20 %.

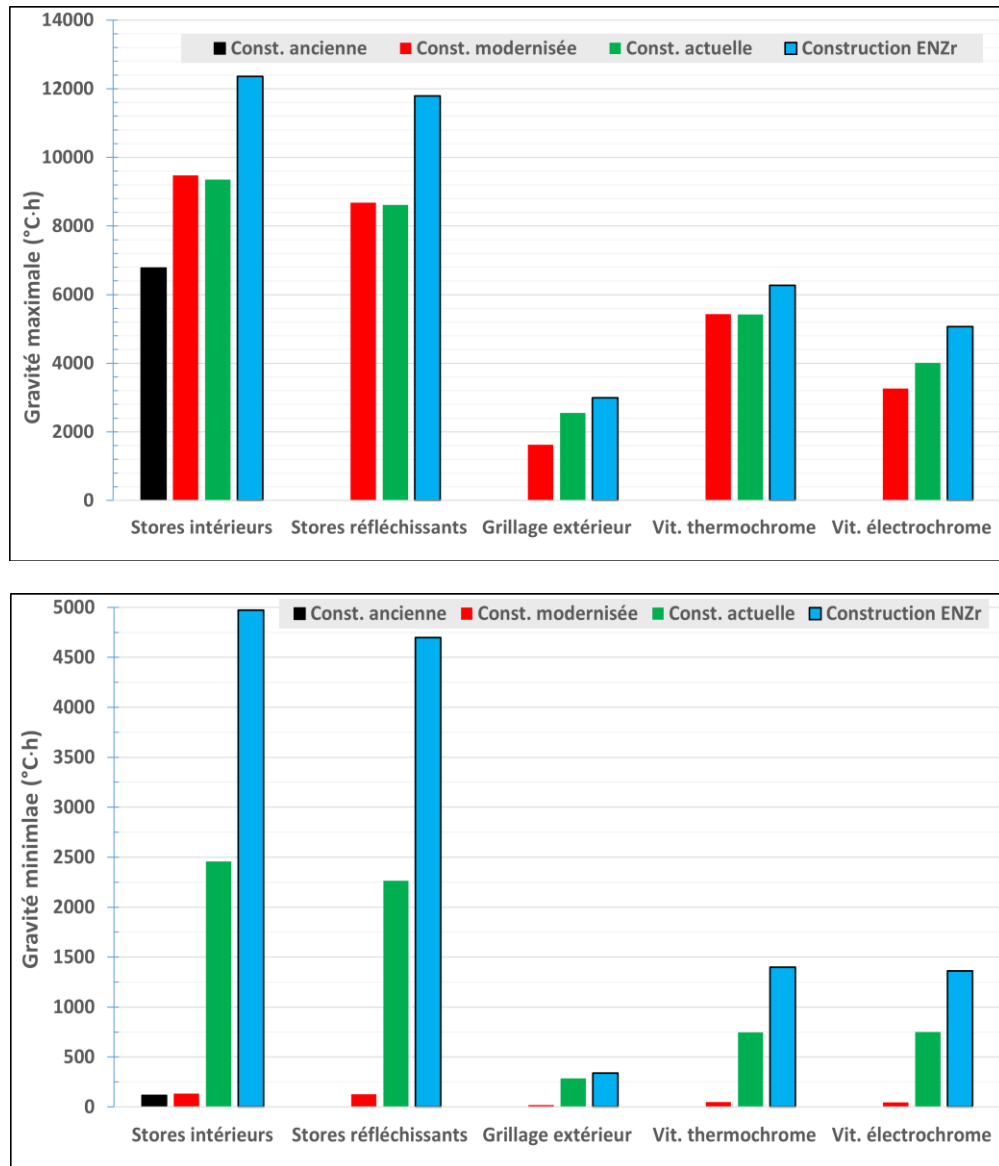


Figure 56. Effet des dispositifs d’ombrage sur la gravité de la surchauffe (valeurs maximale et minimale) dans des suites d’IRLM avec des fenêtres types, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne avec Dclear, modernisée avec Dclear+eH, actuelle avec Dclear+eH et ENZr avec Tclear+eH)

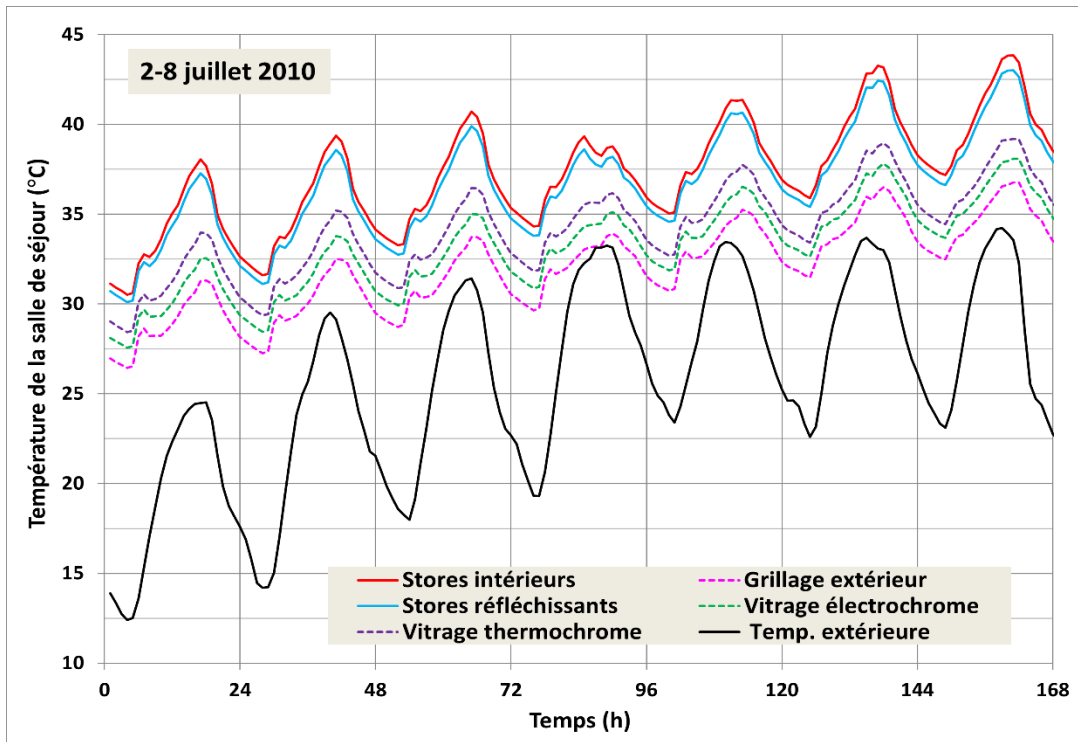


Figure 57. Effet des dispositifs d'ombrage sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types (Dclear+eH) et de construction légère actuelle

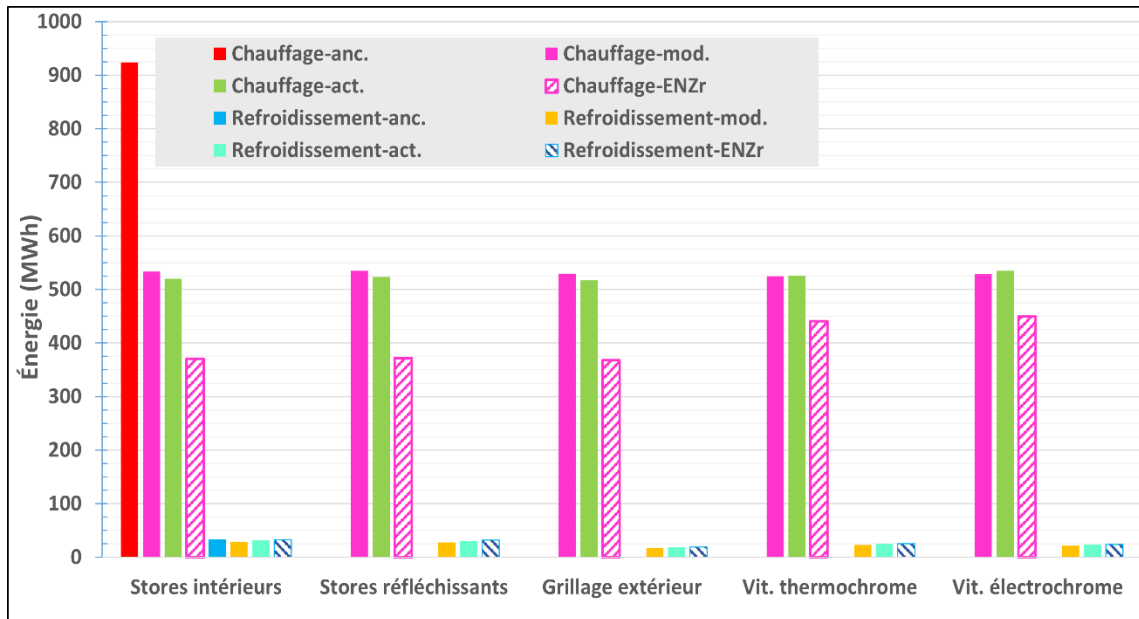


Figure 58. Effet des dispositifs d'ombrage sur la consommation énergétique annuelle en chauffage et en refroidissement d'IRLM avec fenêtres types et bâtis selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

13.3 Effet de la ventilation de la suite

Trois stratégies de ventilation ont été évaluées dans le cadre de l'analyse de la surchauffe dans des IRLM : (1) la ventilation naturelle en ouvrant les fenêtres lorsque la température intérieure de chaque zone thermique excède 26°C ainsi que la température extérieure; (2) la ventilation mécanique de nuit; et (3) le mode mixte, à savoir la ventilation naturelle + la ventilation de nuit. Pour être en mesure de calculer et d'équilibrer les débits de circulation d'air dans les différentes zones thermiques de la suite, la ventilation naturelle et par extracteur est intégrée au réseau de flux d'air de l'IRLM tout entier.

L'ouverture des fenêtres dans les IRLM est généralement réglementée par la loi. En Ontario, les fenêtres situées à plus de deux mètres du sol et n'ayant pas de balcon doivent être équipées d'un mécanisme limitant l'ouverture à 100 mm

(www.toronto.ca/311/knowledgebase/kb/docs/articles/municipal-licensing-and-standards/investigation-services/bylaw-enforcement-window-safety-latches.html). Ainsi, les fenêtres des chambres sont considérées comme ouvertes à 10 %. La porte-fenêtre de la salle de séjour, cependant, est considérée comme ouverte à 50 %.

La ventilation de nuit dans les suites peut être effectuée de deux manières : (1) en activant les extracteurs (salle de bains et cuisine) à leur capacité maximale; ou (2) en utilisant les ventilateurs récupérateurs de chaleur (VRC) des suites, s'ils existent. Pour que la ventilation soit efficace, les débits de circulation d'air doivent excéder les exigences de ventilation de l'espace requises par les codes du bâtiment applicables, ou les normes en matière de ventilation. En outre, le recours aux VRC pour assurer la ventilation de nuit nécessite d'activer l'option de dérivation en été, au besoin (cette option n'est pas disponible sur les VRC vendus dans le commerce au Canada), afin d'éviter le préchauffage de l'air de ventilation.

La Figure 59 illustre l'effet du débit de circulation d'air des extracteurs de la suite sur la température de la chambre au cours de la ventilation de nuit entre 22 h 00 et 9 h 00 (programmation optimisée). Le débit d'air est accru jusqu'à 10 fois celui requis pour la suite (24 litres/s ou 50 CFM pour trois occupants). Un débit d'air de 10 fois (ou 500 CFM) peut induire une chute importante de la température de la chambre jusqu'à 6°C à 6 h 00 et 3°C à la température pic de la journée.

Tel qu'illustré sur la

Figure 60, la ventilation de nuit à l'aide d'extracteurs et de VRC est comparée au débit d'air 10 fois plus important que le débit de ventilation nécessaire pour la suite. Les VRC sont considérés comme fonctionnant en continu (24/7) alors que les extracteurs sont actifs quotidiennement entre 22 h 00 et 9 h 00. Deux options de fonctionnement des VRC ont été évaluées : avec et sans l'option de dérivation en été. Les extracteurs et VRC avec option de dérivation peuvent à peu près assurer l'effet de refroidissement pour la température intérieure. Cependant, un VRC sans cette option (fonctionnement normal à un rendement de récupération

Ventilation de nuit

Installer des extracteurs puissants (débit d'air x10 requis) dans les IRLM anciens ou modernisés pour atteindre un effet de refroidissement important (6°C) au cours de la nuit. Pour les IRLM neufs ou ENZr, utiliser des VRC avec option de dérivation en été avec des extracteurs puissants (débit d'air nominal x10).

de chaleur de 60 %) est moins efficace pour refroidir l'espace intérieur. Dans les présentes lignes directrices, la ventilation de nuit utilisant les extracteurs de la suite avec un débit d'air 10 fois supérieur à celui requis sert de base à la comparaison avec d'autres stratégies de ventilation.

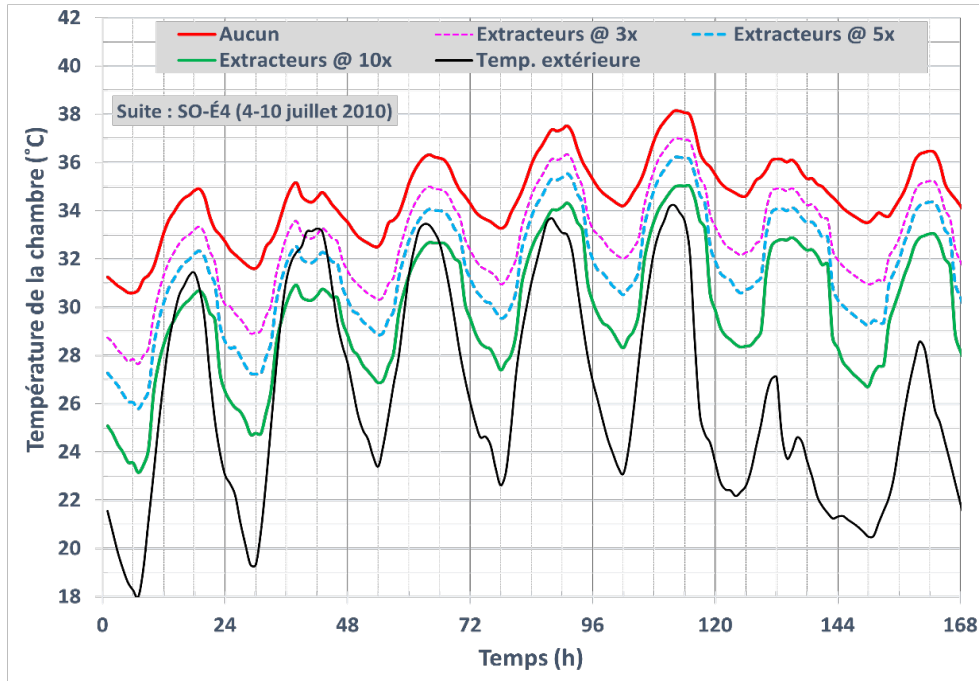


Figure 59. Effet du débit d'air des extracteurs de la suite au cours de la ventilation de nuit (de 22 h 00 à 9 h 00) sur la température de la chambre d'une suite située à l'extrémité ouest (SO) dans un IRLM (construction légère actuelle) au 4^e étage, pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010

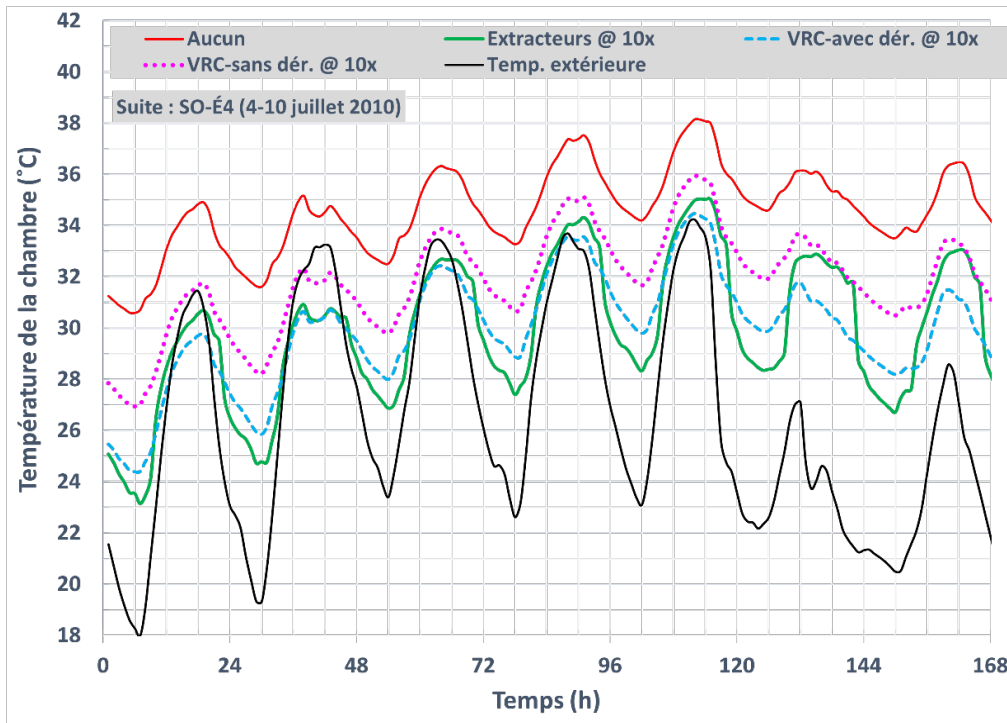


Figure 60. Comparaison de la ventilation de nuit avec un VRC (fonctionnant en continu) et des extracteurs (fonctionnant de 22 h 00 à 9 h 00) sur la température de la chambre d’une suite située à l’extrémité ouest (SO) dans un IRLM (construction légère actuelle) au 4^e étage, pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010

La

Figure 61 illustre l'effet des stratégies de ventilation sur la gravité de la surchauffe (valeurs minimale et maximale) dans des suites d'IRLM équipées de fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon différentes pratiques de construction (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr). La ventilation naturelle est efficace pour réduire, voire éliminer, les risques de surchauffe (gravité maximale < 230°C*h) dans toutes les suites des différents types d'IRLM. La ventilation de nuit dans les IRLM modernisés, neufs ou ENZr peut minimiser ou éliminer le risque de surchauffe dans certaines suites, en particulier aux étages inférieurs, mais cette approche doit être combinée à d'autres mesures (p. ex., dispositifs d'ombrage extérieurs) pour les suites des étages supérieurs. La ventilation en mode mixte ne produit cependant aucun effet significatif supplémentaire par rapport à la ventilation naturelle.

Les Figure 62 à Figure 65 illustrent les cartes spatiales de la gravité de la surchauffe dans les suites avec/sans ventilation naturelle, dans des IRLM anciens, modernisés, neufs ou ENZr, respectivement. Pour les IRLM anciens sans ventilation naturelle, toutes les suites sont touchées par la surchauffe, à l'exception de celles du premier étage, qui affichent des valeurs de gravité inférieures ou très légèrement supérieures à celles de la valeur seuil. Les suites des étages supérieurs sont soumises à un risque de surchauffe plus important que celui des étages inférieurs. Cependant, lorsque la ventilation naturelle est activée, toutes les suites d'IRLM sont soumises à un risque de surchauffe minimal, voire n'y sont pas soumises, selon les critères de surchauffe proposés. De la même manière, pour les IRLM modernisés sans ventilation naturelle, toutes les suites sont surchauffées, sauf certaines du premier étage (suites de l'extrémité ouest (SO, NO)). La ventilation naturelle peut ainsi minimiser voire éliminer le risque de surchauffe dans toutes les suites. Les suites des IRLM neufs ou ENZr sans ventilation naturelle sont néanmoins surchauffées. La ventilation naturelle peut ainsi encore une fois minimiser voire éliminer le risque de surchauffe dans toutes les suites.

À titre d'information, la Figure 66 illustre l'effet des stratégies de ventilation sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types et de construction légère actuelle. La ventilation naturelle peut réduire les pics de température intérieure au cours de la journée jusqu'à 8°C et pendant la nuit jusqu'à 10°C par rapport à l'absence de ventilation, suivie par une réduction de 5,5°C et de 9,5°C respectivement pour la ventilation nocturne. La Figure 67 présente le profil de la température de la salle de séjour de la suite sud (S1) en fonction de l'étage du bâtiment. La température des suites de l'étage supérieur est d'environ 3°C supplémentaire à celle du premier étage au cours de la journée.

Ventilation des suites

La ventilation naturelle peut minimiser voire éliminer le risque de surchauffe dans toutes les suites d'IRLM. La ventilation de nuit est efficace dans les suites des étages inférieurs, mais doit être combinée à d'autres mesures pour les suites des étages supérieurs.

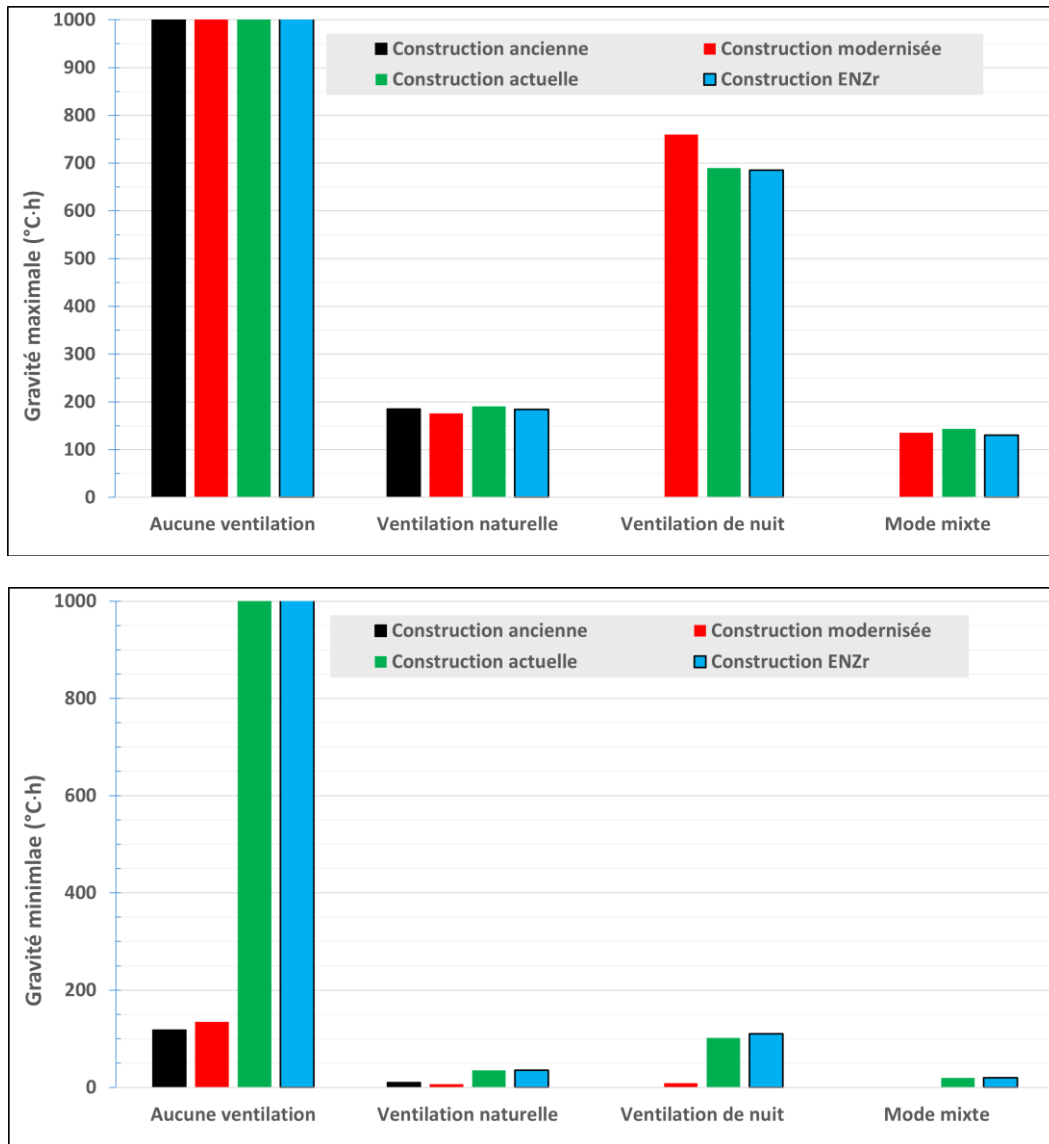


Figure 61. Effet des stratégies de ventilation sur la gravité de la surchauffe (valeurs maximale et minimale) dans des suites d'IRLM avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

Gravité	0 – 50	51 – 100	101 – 150	151 – 200	201 – 250	251 – 300	> 301
Sans ventilation naturelle				Avec ventilation naturelle			
NO 4408	N1 2709	N2 2706	NE 3147	NO 176	N1 157	N2 158	NE 178
Couloir : É4				Couloir : É4			
SO 4990	S1 4464	S2 4458	SE 4466	SO 186	S1 174	S2 174	SE 179
3102	2571	2551	2433	161	145	145	163
Couloir : É3				Couloir : É3			
3231	2673	2653	2486	161	147	148	156
1807	1291	1285	1330	128	111	111	134
Couloir : É2				Couloir : É2			
1859	1513	1497	1288	127	114	114	128
256	140	141	203	46	15	15	51
Couloir : É1				Couloir : É1			
263	148	146	22	46	16	16	0

Figure 62. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM ancien

Gravité	0 – 50	51 – 100	101 – 150	151 – 200	201 – 250	251 – 300	> 301
Sans ventilation naturelle				Avec ventilation naturelle			
NO 7220	N1 4975	N2 5008	NE 5366	NO 168	N1 149	N2 149	NE 176
Couloir : É4				Couloir : É4			
SO 9436	S1 7251	S2 7234	SE 7569	SO 176	S1 161	S2 160	SE 174
5423	4919	4885	4893	161	145	146	170
Couloir : É3				Couloir : É3			
7282	6822	6781	6490	161	148	147	160
2863	2086	2064	2127	128	112	114	140
Couloir : É2				Couloir : É2			
2983	2147	2120	2079	127	116	116	135
452	167	167	245	43	14	14	53
Couloir : É1				Couloir : É1			
467	176	174	29	43	15	14	0

Figure 63. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM modernisé

Gravité	0 – 50	51 – 100	101 – 150	151 – 200	201 – 250	251 – 300	> 301
Sans ventilation naturelle				Avec ventilation naturelle			
NO 5881	N1 5671	N2 5647	NE 5840	NO 180	N1 156	N2 156	NE 185
Couloir : É4				Couloir : É4			
SO 9258	S1 8824	S2 8795	SE 7932	SO 191	S1 175	S2 175	SE 185
5874	7094	7067	5786	180	153	154	184
Couloir : É3				Couloir : É3			
7876	7870	7860	7574	181	159	158	175
5117	5194	5175	4812	169	138	138	171
Couloir : É2				Couloir : É2			
5386	6781	6781	6599	170	140	140	165
3154	2514	2500	2458	128	94	94	133
Couloir : É1				Couloir : É1			
4122	2583	2579	2387	129	98	98	32

Figure 64. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM actuel

Gravité	0 – 50	51 – 100	101 – 150	151 – 200	201 – 250	251 – 300	> 301
Sans ventilation naturelle				Avec ventilation naturelle			
NO 10829	N1 9636	N2 9577	NE 9868	NO 174	N1 153	N2 153	NE 182
Couloir : É4				Couloir : É4			
SO 11800	S1 10789	S2 10747	SE 10987	SO 182	S1 168	S2 168	SE 179
11152	10467	10410	10101	176	153	154	184
Couloir : É3				Couloir : É3			
11797	11551	11201	10969	177	158	157	175
9584	9351	9299	7766	166	139	139	172
Couloir : É2				Couloir : É2			
10282	9960	9942	9723	166	141	141	165
6206	5176	5121	4974	125	95	95	134
Couloir : É1				Couloir : É1			
6820	6675	6681	5134	126	98	97	32

Figure 65. Cartes de la gravité de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans les suites d'un IRLM ENZr

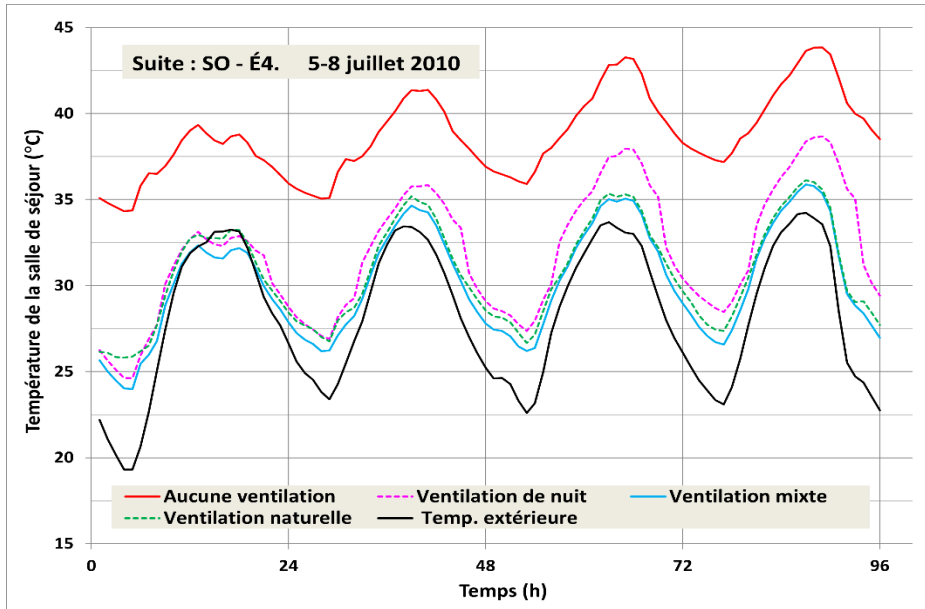


Figure 66. Effet des stratégies de ventilation sur la température de la salle de séjour de la suite de l'extrémité ouest (SO) du quatrième étage pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types et de construction légère actuelle

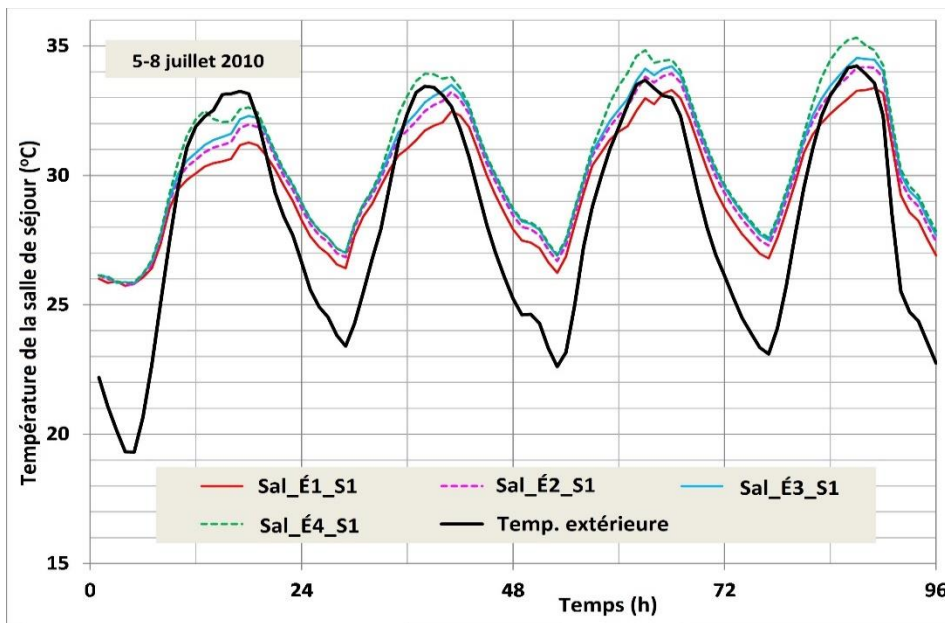


Figure 67. Profil de la température de la salle de séjour de la suite sud (S1) par étage du bâtiment pendant la période de vagues de chaleur estivales de 2010 dans des IRLM avec des fenêtres types et de construction légère actuelle

13.4 Effet du refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé

L'activation d'un système de refroidissement centralisé ou d'un climatiseur de fenêtre au cours d'événements de chaleur extrême en été avec un point de consigne (supérieur) abaissé est quelquefois nécessaire pour réduire le coût prohibitif du refroidissement des maisons. En outre, cette stratégie présenterait l'avantage supplémentaire de réduire la demande en électricité pendant les heures de pointe. La

Refroidissement mécanique

Le refroidissement mécanique avec point de consigne abaissé (31°C) est efficace pour réduire le risque de surchauffe dans les suites de tous les types d'IRLM. Des mesures passives supplémentaires, telles que la ventilation de nuit, sont nécessaires pour éliminer complètement le risque de surchauffe dans les étages supérieurs.

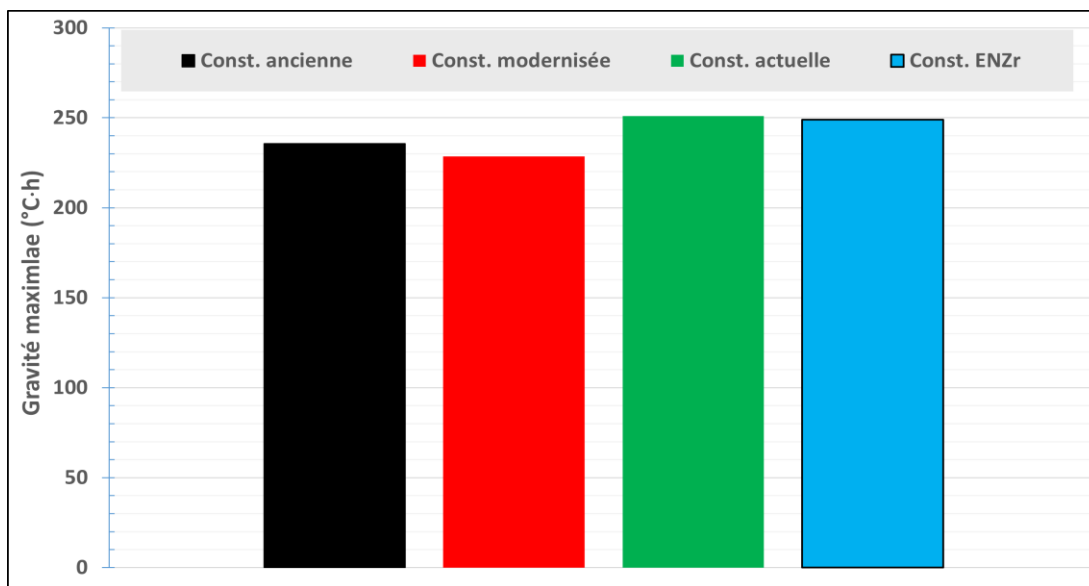


Figure 68 illustre la manière dont cette stratégie affecte le risque de surchauffe dans des suites d'IRLM bâties selon des pratiques de construction différentes. L'abaissement de la température du point de consigne de refroidissement à 31°C (correspondant à une valeur SET = 30°C, sensation légèrement tiède) peut réduire efficacement, voire éliminer, le risque de surchauffe (gravité < 230°C*h) dans certaines suites, indépendamment du type d'IRLM, au cours d'événements de chaleur extrême. Les suites concernées par une légère surchauffe nécessiteront la mise en œuvre de mesures passives supplémentaires, comme l'ouverture des

fenêtres au cours de la nuit ou le recours à la ventilation mécanique de nuit afin d'évacuer du bâtiment tous les gains de chaleur interne excessive accumulés au cours de la journée.

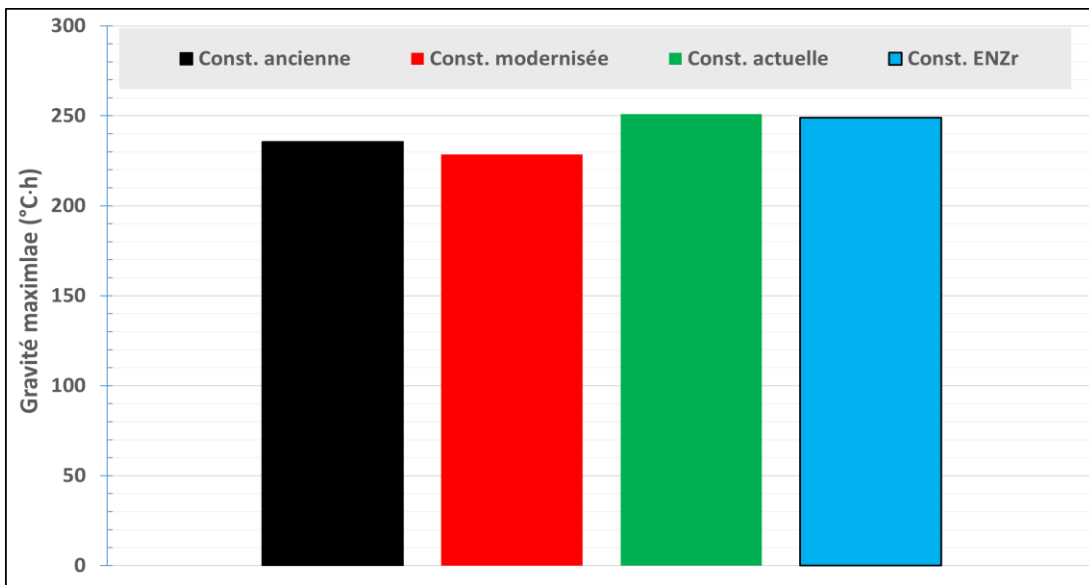


Figure 68. Effets du refroidissement mécanique avec température du point de consigne abaissé sur la gravité maximale de la surchauffe dans des suites d'IRLM avec fenêtres types protégées par des stores intérieurs, et bâties selon quatre pratiques de construction légère (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

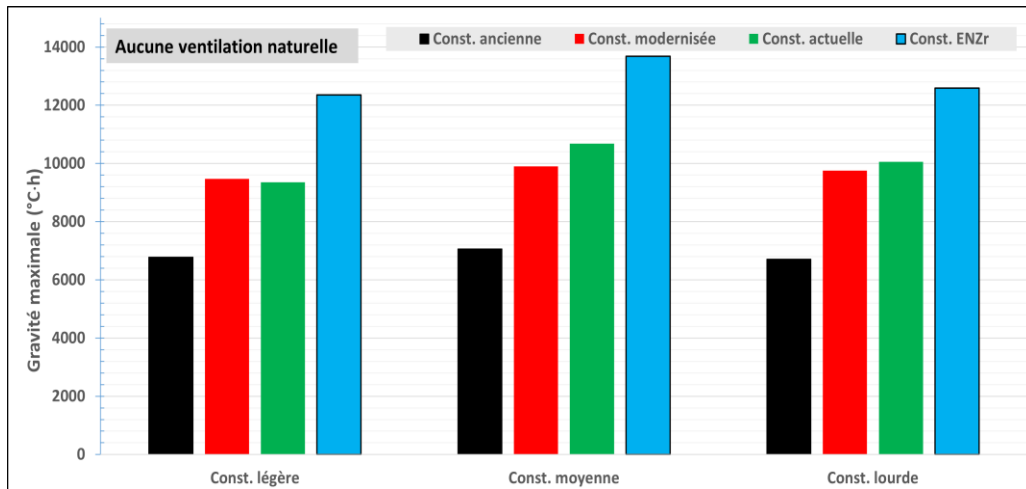
13.5 Effet du type de construction

Trois types de constructions d'IRLM ont été évalués dans le cadre de la surchauffe (voir Tableau 24) :

(1) construction légère avec bardages en panneaux de béton renforcé de fibre; (2) construction moyenne avec parement de brique; (3) construction lourde avec bardages en panneaux de béton renforcé de fibre et murs en béton isolés extérieurement.

La Figure 69 illustre l'effet du type de construction sur la gravité maximale de la surchauffe dans des suites d'IRLM avec et sans ventilation naturelle, et bâties selon différentes pratiques de construction (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr). Les types de constructions des IRLM peuvent légèrement influencer le risque de surchauffe, lorsque le bâtiment est ventilé naturellement ou non. La construction lourde tend à réduire légèrement le risque de surchauffe, jusqu'à 10 % par rapport à la construction légère ou moyenne.

Types de constructions
 Les constructions lourdes tendent à entraîner un risque de surchauffe légèrement inférieur (< 10 %) indépendamment des types d'IRLM.



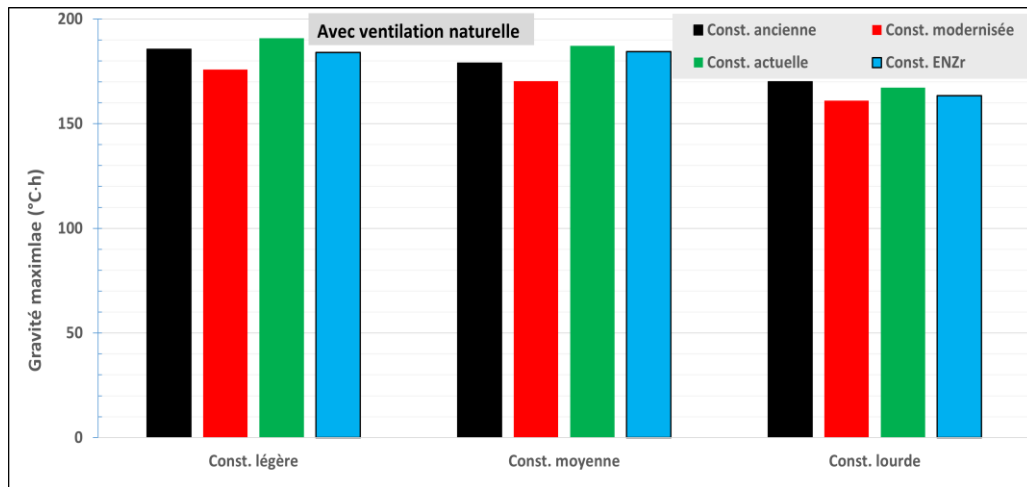


Figure 69. Effet des types de constructions sur la gravité maximale de la surchauffe avec et sans ventilation naturelle dans des suites d'IRLM bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

13.6 Effet des toits réfléchissants

Les toits réfléchissants peuvent réduire les gains de chaleur solaire de la toiture dans les espaces intérieurs situés en dessous. L'effet des toits réfléchissants peut néanmoins être atténué par le niveau d'isolation du toit. Dans les présentes lignes directrices, une réflectivité solaire type de 70 % des toits des IRLM est comparée à des toits classiques.

La

Toits réfléchissants
 Les toits réfléchissants des IRLM réduisent légèrement (< 6 %) le risque de surchauffe dans les suites situées directement en dessous des toits.

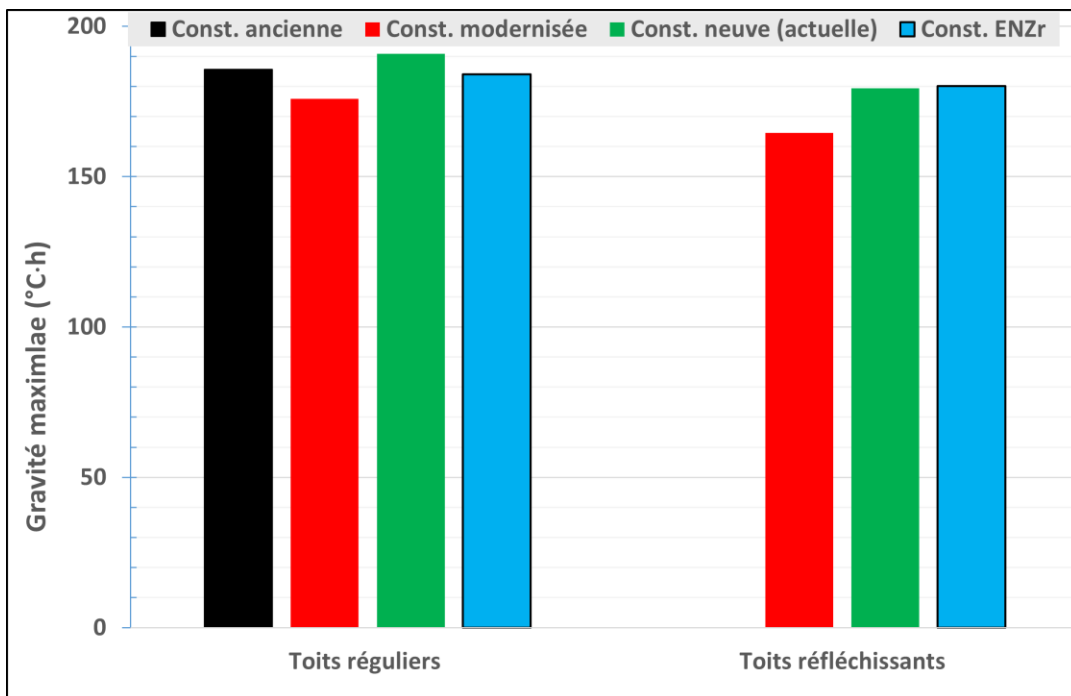


Figure 70 illustre l'effet des toits réfléchissants sur la gravité maximale de la surchauffe dans des suites d'IRLM avec ventilation naturelle, et bâties selon quatre pratiques de construction légère locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr). Les toits réfléchissants réduisent ainsi légèrement (jusqu'à 6 %) le risque de surchauffe, en particulier dans les suites situées directement en-dessous des toits.

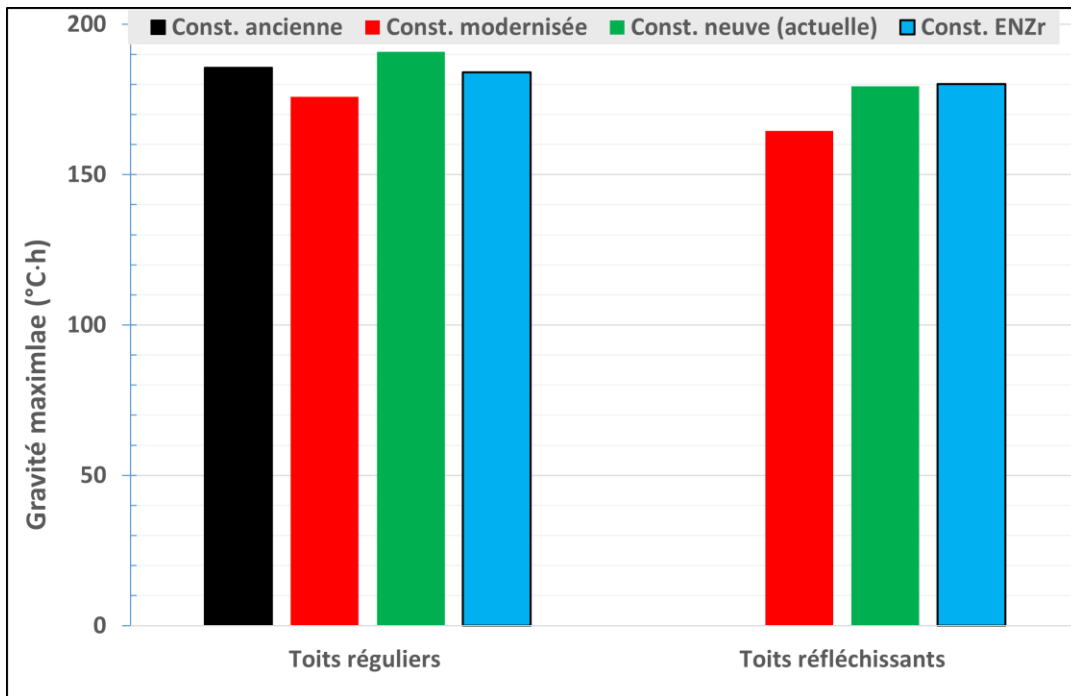


Figure 70. Effets des toits réfléchissants sur la gravité maximale de la surchauffe dans des suites d'IRLM ventilées naturellement et bâties selon quatre pratiques de construction locales (ancienne, modernisée, actuelle et ENZr)

13.7 Consommation énergétique et risque de surchauffe des IRLM

La relation entre la consommation énergétique totale (électricité et gaz) et le risque de surchauffe dans les IRLM est très importante en matière de conception de bâtiments résilients thermiquement, afin de garantir des environnements sains et sûrs. Les exigences applicables aux bâtiments de grande hauteur afin d'atteindre une efficacité énergétique élevée se sont multipliées au cours des dernières décennies, afin de contrecarrer l'effet toujours plus important des émissions de gaz à effet de serre sur le climat, mais peu d'exigences associées au risque de surchauffe existent. La

Consommation énergétique et surchauffe

Le risque de surchauffe est inversement proportionnel à la consommation énergétique totale dans les suites des IRLM hermétiques ou non ventilés naturellement. Des mesures passives ou actives doivent par conséquent être prises dans les IRLM à niveau d'isolation élevé, afin de réduire le risque de surchauffe.

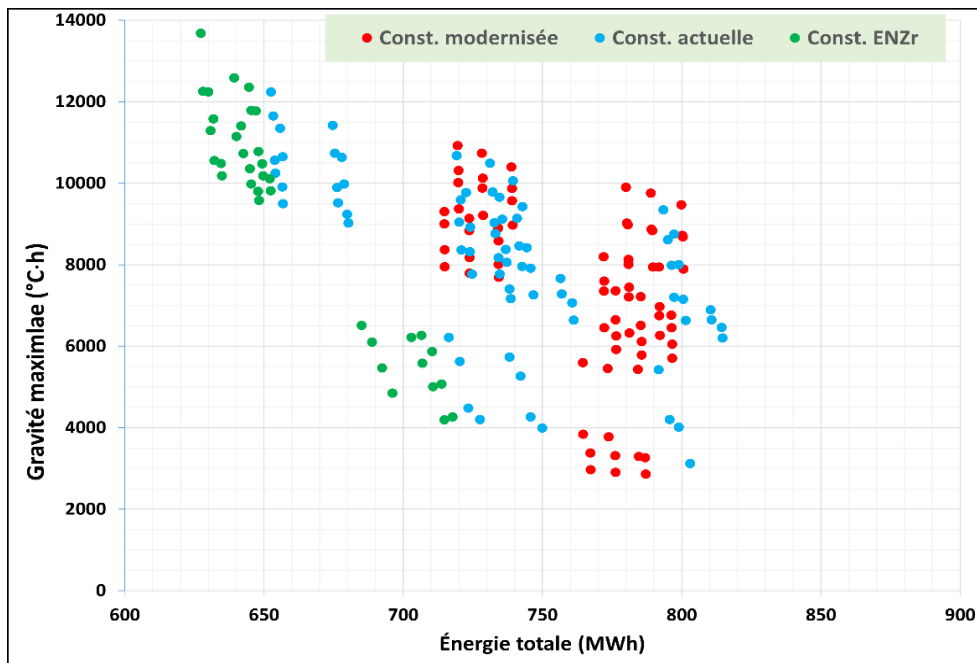


Figure 71 illustre la relation entre la consommation énergétique totale des IRLM à la gravité de la surchauffe dans les suites sans ventilation naturelle. Les données sont tracées pour des IRLM avec tous les types de fenêtres et des dispositifs d'ombrage intérieurs, y compris des fenêtres dynamiques, mais hors dispositifs d'ombrage extérieurs. Il apparaît clairement que la

consommation énergétique totale est inversement proportionnelle au risque de surchauffe dans les IRLM hermétiques ou non ventilés naturellement. Plus les exigences en matière d'efficacité énergétique sont strictes (ou la consommation énergétique est faible), plus le risque de surchauffe est important. Il est par conséquent recommandé de mettre en œuvre des mesures passives ou actives, afin de réduire le risque de surchauffe dans les IRLM modernisés, neufs ou ENZr futurs, si le refroidissement mécanique ne constitue pas une option viable. Ces mesures peuvent inclure des stores extérieurs, une ventilation au moyen de ventilateurs, une ventilation naturelle (s'il est possible d'ouvrir les fenêtres en été), une ventilation mécanique utilisant des ventilateurs par alimentation ou des extracteurs, des ventilateurs récupérateurs de chaleur avec option de dérivation en été et des débits d'air supérieurs aux valeurs nominales.

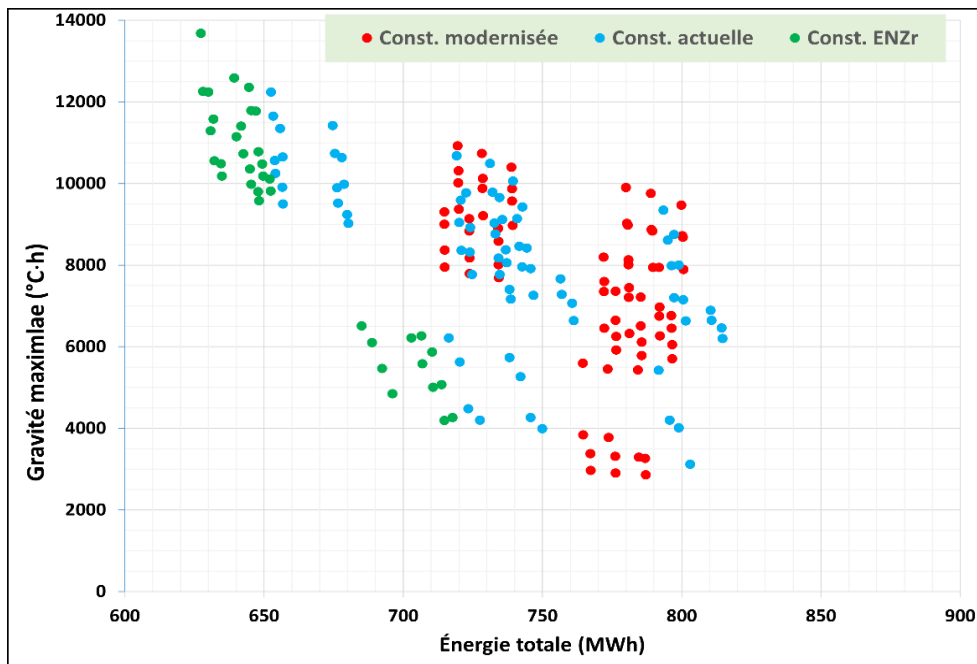


Figure 71. Relation entre consommation énergétique totale (électricité et gaz) des bâtiments et gravité de surchauffe maximale dans les suites d'IRLM sans ventilation naturelle

13.8 Effet du réchauffement planétaire sur le risque de surchauffe et l'énergie

Des simulations ont été menées pour les sept scénarios de réchauffement climatique suivants, représentant des hausses de température à l'échelle planétaire de 0,5°C à 3,5°C : RP0,0 (climat actuel), RP0,5 (2001 - 2031), RP1,0 (2013 - 2043), RP1,5 (2024 - 2054), RP2,0 (2034 - 2064), RP2,5 (2044 - 2074), RP3,0 (2053 - 2083) et RP3,5 (2062 - 2092). Les Figure 72 à

Figure 74 illustrent l'effet du degré de réchauffement planétaire sur la gravité maximale et l'intensité des événements de surchauffe dans les suites d'IRLM modernisés, neufs (actuels) et ENZr, respectivement, avec et sans ventilation naturelle. Toutes les fenêtres des IRLM étaient équipées de stores intérieurs types, considérés comme fermés pendant l'été. La gravité et l'intensité des événements de surchauffe augmentent avec le degré de réchauffement planétaire. D'ici la fin du 21^e siècle, la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les IRLM modernisés augmenteront respectivement de 55 % (sans ventilation naturelle) à 1270 % (avec ventilation naturelle), et de 23 % (sans ventilation naturelle) à 143 % (avec ventilation naturelle), par rapport au climat actuel (RP0,0). La forte hausse de la gravité de la surchauffe dans les IRLM ventilés naturellement est due au fait que les événements de surchauffe dans ces suites sont plus courts que dans les suites sans ventilation naturelle. La ventilation naturelle peut être une mesure efficace pour réduire le risque de surchauffe jusqu'au scénario RP1,0 (2013 - 2043). De la même manière, la gravité et l'intensité de la surchauffe dans les IRLM neufs ou ENZr augmenteront respectivement de 50 % (sans ventilation naturelle) à 1944 % (avec ventilation naturelle), et de 25 % (sans ventilation naturelle) à 117 % (avec ventilation naturelle). La ventilation naturelle dans ces IRLM peut être efficace, mais uniquement jusqu'au scénario RP1,0 (2013 - 2043).

Sur la Figure 75, l'effet du réchauffement planétaire est représenté dans les variations relatives (par rapport à RP0,0) en matière de consommation énergétique liée au chauffage, liée au refroidissement et totale (chauffage + refroidissement) des IRLM modernisés, neufs (actuels) et ENZr. Comme prévu, le réchauffement planétaire réduit la consommation énergétique liée au chauffage et la consommation énergétique totale, mais augmente celle liée au refroidissement. D'ici la fin du

Réchauffement planétaire

Le RP augmente la gravité et l'intensité des événements de surchauffe jusqu'à 1944 % et 143 % respectivement, dans les IRLM ventilés naturellement. La ventilation naturelle s'avère efficace pour réduire le risque de surchauffe dans tous les types d'IRLM, mais jusqu'au scénario RP1,0. Les IRLM neufs ou ENZr nécessitent la mise en œuvre de mesures supplémentaires à combiner avec la ventilation naturelle afin d'éliminer le risque de surchauffe dans les futurs scénarios de RP.

Le RP peut réduire la consommation énergétique liée au chauffage jusqu'à 21 % et augmenter la consommation énergétique liée au refroidissement jusqu'à 48 % dans les IRLM neufs ou ENZr.

21^e siècle, la consommation énergétique liée au chauffage et au refroidissement de tous les IRLM sera respectivement réduite de 21 % et augmentée de 48 %.

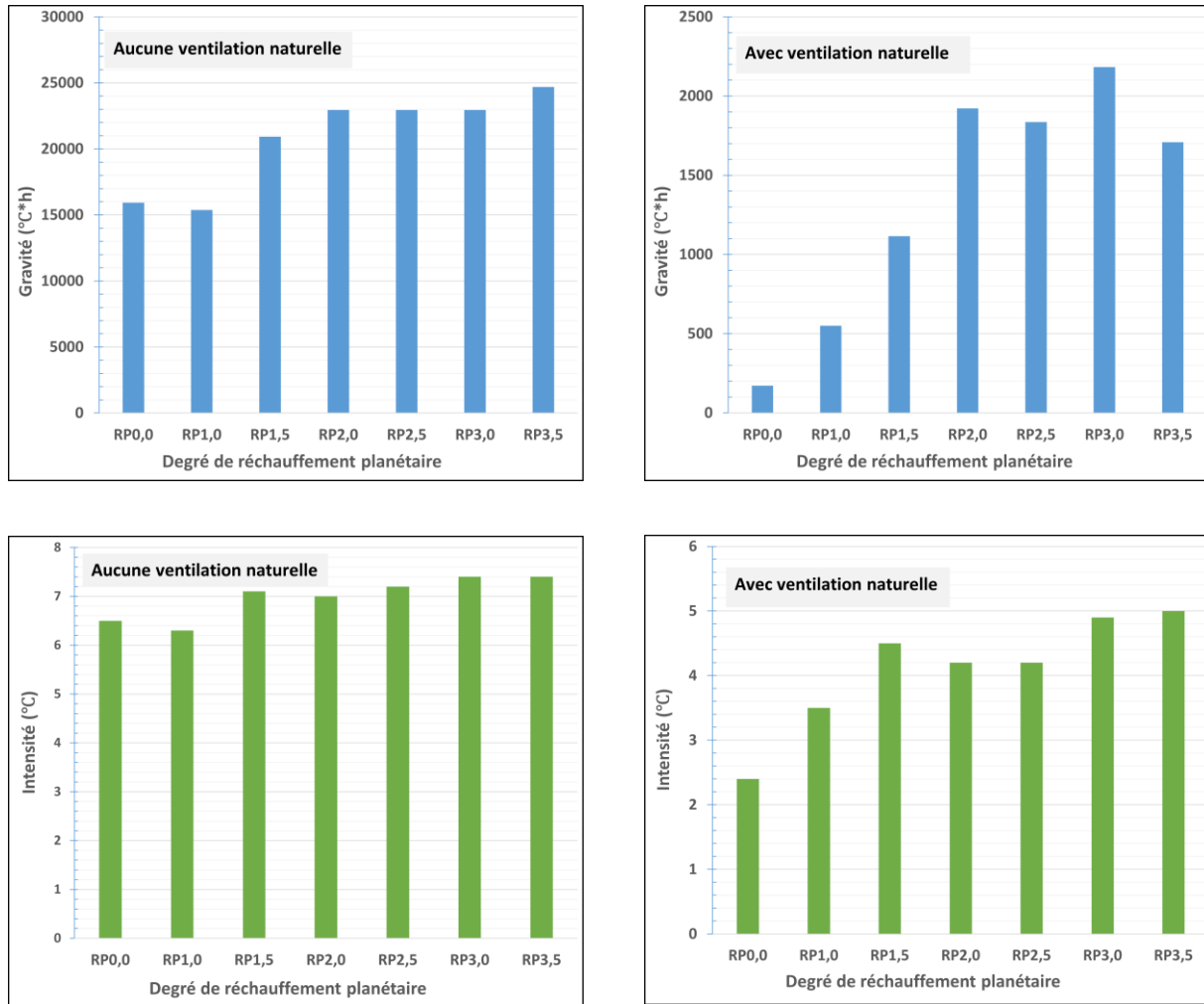


Figure 72. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité maximale et l'intensité de la surchauffe dans les suites d'IRLM modernisés, avec et sans ventilation naturelle.

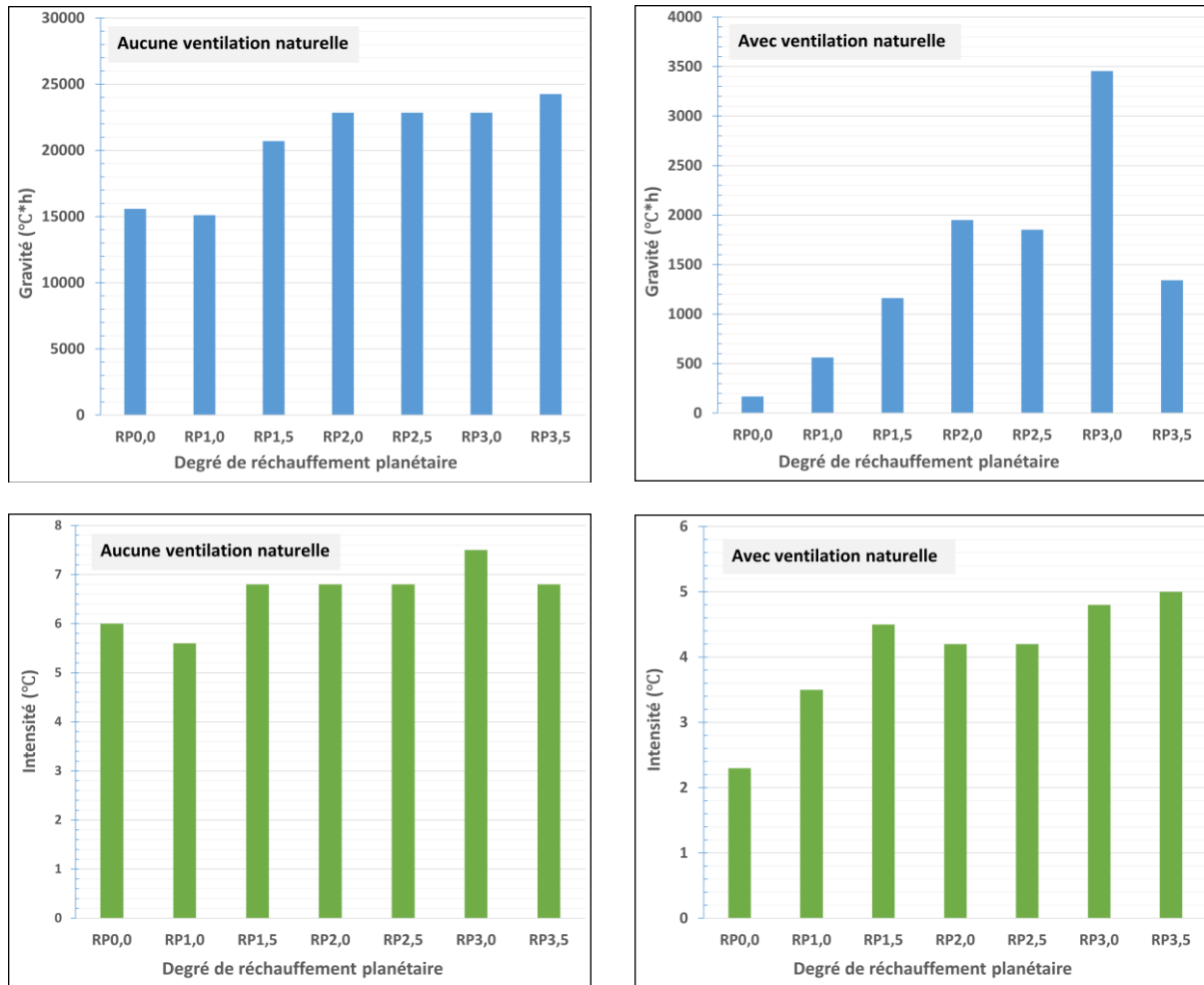


Figure 73. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité maximale et l'intensité de la surchauffe dans les suites d'IRLM actuels, avec et sans ventilation naturelle.

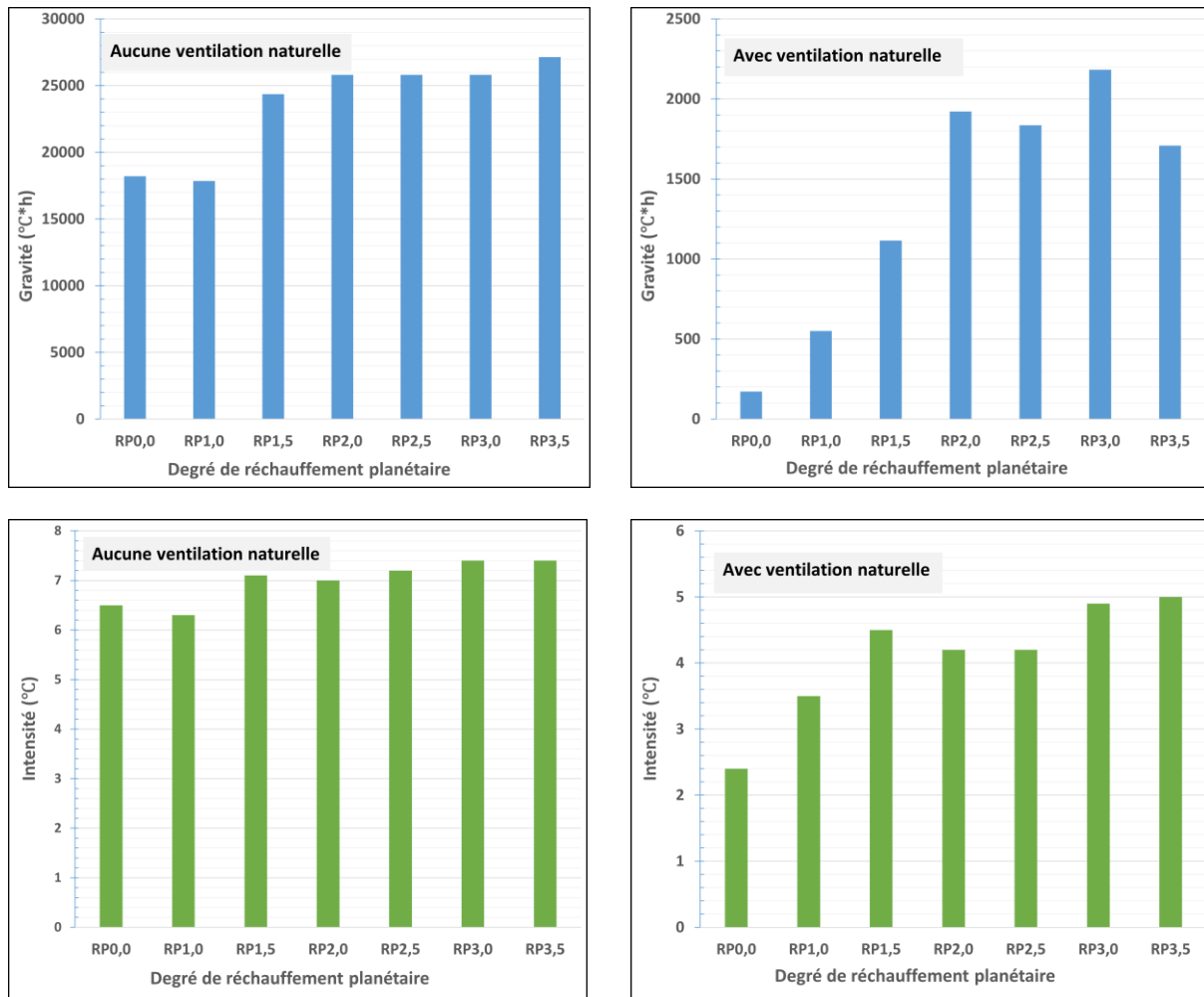


Figure 74. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur la gravité maximale et l'intensité de la surchauffe dans les suites d'IRLM ENZr, avec et sans ventilation naturelle.

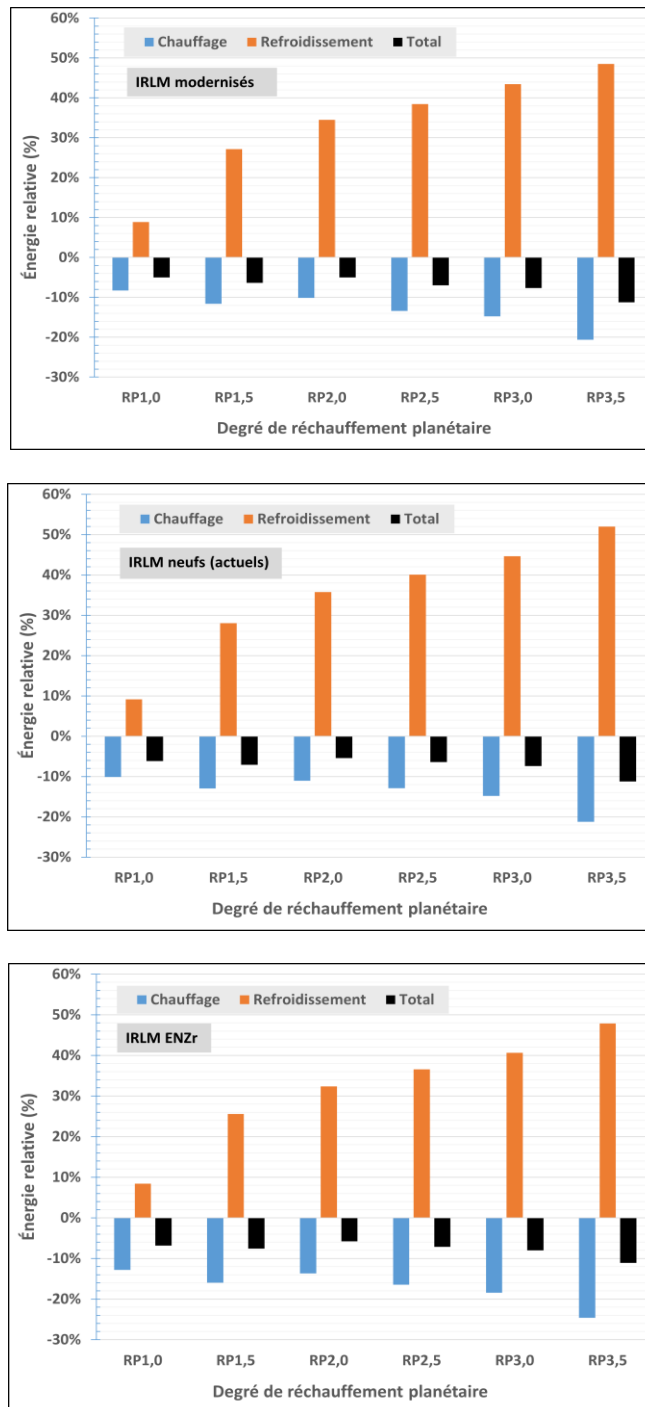


Figure 75. Effets des scénarios de réchauffement climatique sur les variations relatives en matière de consommation énergétique liée au chauffage, au refroidissement et totale (chauffage + refroidissement) dans des IRLM

LIGNES DIRECTRICES SUR LA SURCHAUFFE ASSOCIÉES

1. ASHRAE. 2019. Guideline for the Risk Management of Public Health and Safety in Buildings. ASHRAE, Atlanta.
2. CIBSE. 2015. Guide A. Environmental Design. Chartered Institution of Building Services Engineers. London, UK.
3. CIBSE. 2013. TM52: The limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings. Chartered Institution of Building Services Engineers. London, UK.
4. CIBSE. 2010. KS16: How to manage overheating in buildings CIBSE. Chartered Institution of Building Services Engineers. London, UK.
5. BC Housing. 2019. BC Energy Step Code. Design Guide Supplement S3 on overheating and Air Quality. www.bchousing.org/research-centre/library/residential-design-construction/bc-energy-step-code-design-guide. Colombie-Britannique, Canada.
6. Kesik T., O'Brien W., Peters T. 2019. Enhancing the Liveability and Resilience of Multi-Unit Residential Buildings (MURBs). MURB Design Guide V.2.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Anderson M., Carmichael C., Murray V., Dengel A., Swainson M. 2013. Defining indoor heat thresholds for health in the UK. *Perspectives in Public Health*; 133(3):158-164.
2. Aphas G., Stavrinou P.S., Andreou E., Giannaki C.D. 2019. Hydration status, total water intake and subjective feelings of adolescents living in a hot environment, during a typical school day. *Int J Adolesc Med Health*. 1-7.
3. Arora, V.; Scinocca, J.; Boer, G.; Christian, J.; Denman, K.; Flato, G.; Kharin, V.; Lee, W.; Merryfield, W. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophys. Res. Lett.* 2011, 38.
4. ASHRAE. 2014. ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. ASHRAE, Atlanta, GA.
5. ASHRAE. 2017. ANSI/ASHRAE standard 55-2017. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE, Atlanta, GA.
6. Astrom, D.O., B. Forsberg, J. Rocklov. 2011. Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. *Maturitas*. 69: 99-105.
7. Basu, R. 2009. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health*. 8:40.

8. Begum M.N. and Johnson C.S. 2010. A review of the literature on dehydration in the institutionalized elderly. *e-SPEN, the European e-Journal of Clinical Nutrition and Metabolism* 5(1): e47-e53.
9. Belcher S., Hacker J., Powell S.; Constructing design weather data for future climates; *Building Services Engineering Research and Technology*; 26 (1); 2005; 49-61.
10. Bizikova L, Neale T, Burton I. 2008. Canadian communities' guidebook for adaptation to climate change. Including an approach to generate mitigation co-benefits in the context of sustainable development. First Edition. Environment Canada and University of British Columbia, Vancouver.
11. Brager, G.S.; de Dear, R.J. 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy Build.* 27, 83–96.
12. Cao, T., Lian, Z., Zhu, J. et al. 2021. Parametric study on the sleep thermal environment. *Build. Simul.* <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0840-5>.
13. Casati B., Yagouti B., Chaumont D. 2013. Regional Climate Projections of Extreme Heat Events in Nine Pilot Canadian Communities for Public Health Planning. *AMS*; 52: 2669-2698.
14. CCHST. 2019. Guide santé sécurité du travail dans les environnements chauds Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/heat_control.html. Consulté en janvier 2019.
15. Cheung T., Schiavon S., Parkinson T., Li P., Brager G. 2019. Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment*; 153; 205-217.
16. CIBSE. 2013. TM52- 2013. The Limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings. Chartered Institution of Building Services Engineers. London, UK.
17. CIBSE. 2015. Guide A. Environmental Design. Chartered Institution of Building Services Engineers. London, UK.
18. CSA. 2017. CSA Z412-17 - Lignes directrices sur l'ergonomie des postes de travail. Association canadienne de normalisation. Ottawa, Ontario, Canada.
19. DeGroot, D. W., & Kenney, W. L. (2007). Impaired defense of core temperature in aged humans during mild cold stress. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 292(1), 103–108. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00074.2006>
20. Donnini G.J., Molina J., Martello C. 1997. Field study of occupant comfort and office thermal environments in a cold climate. *ASHRAE Transactions*, 103 (2); 205-220.

21. Eames, M.E. 2016. An update of the UK's design summer years: Probabilistic design summer years for enhanced overheating risk analysis in building design. *Building Services Engineering Research and Technology*. 37: 503-522.
22. Eames, M.E. 2016. An update of the UK's design summer years: Probabilistic design summer years for enhanced overheating risk analysis in building design. *Building Services Engineering Research and Technology*. 37: 503-522.
23. ECCC. 2016. Données et scénarios climatiques pour le Canada : Synthèse des observations et des résultats récents de modélisation. Environnement et Changement climatique Canada. Centre de renseignements à la publication. Gatineau, QC.
24. ECCC. 2017. Conditions atmosphériques et météorologiques - Les événements météorologiques les plus marquants du 20^e siècle. Environnement et Changement climatique Canada. <https://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=6A4A3AC5-1>.
25. ECCC. 2018a. Normales climatiques canadiennes. Environnement et Changement climatique Canada. https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html. Consulté en janvier 2018.
26. ECCC. 2018b. Environnement et Changement climatique Canada. Protocole d'entente entre le Conseil national de recherches du Canada et Environnement et Changement climatique Canada portant sur les immeubles résilients aux changements climatiques et les infrastructures publiques de base : projections des valeurs climatiques de calcul. Projections climatiques de premier palier; Gouvernement du Canada : Ottawa (Ontario), Canada; 48p.
27. EPA. 2016. Excessive Heat Events Guidebook. Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs, Washington, DC.
28. Fanger, P.O. 1972. Thermal comfort. McGraw-Hill, New York.
29. Feliciano L., LeBlanc L. A., Feeney B. J. 2010. Assessment and management of barriers to fluid intake in community dwelling elderly adults. *Journal of Behavioral Health and Medicine*. 1(1): 3-14.
30. Fouillet A., Rey G., Laurent F., Pavillon G., Bellec S., Guihenneuc-Jouyaux C., Clavel J., Jouglu E., Hémon D. 2006. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int Arch Occup Environ Health*. 80(1):16-24.
31. Gachon P., Bussières L., Gosselin P., Raphoz M., Bustinza R., Martin P., Dueymes G., Gosselin D., Labrecque S., Jeffers S., and Yagouti A. 2016. Guide pour l'identification des seuils d'alertes aux canicules au Canada basés sur les données probantes Coédité par l'Université du Québec à Montréal, Environnement et Changement climatique

- Canada, l'Institut national de santé publique du Québec et Santé Canada, Montréal, Québec, Canada. P. 71.
32. Gagge A.P., Stolwijk J.A.J. and Nishi Y. 1986. A standard predictive index of human responses to the thermal environment, AHSRAE Transactions 92: 709-731.
 33. Garriguet D. 2008. Beverage consumption of Canadian adults. Health Reports; 19(4): 23-29.
 34. Gaur, A., M.K. Eichenbaum, S.P. Simonovic. 2018. Analysis and modelling of surface Urban Heat Island in 20 Canadian cities under climate and land-cover change. Journal of Environmental Management. 206: 145-157.
 35. Hajat, S., Kosatky T. 2010. Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity. J Epidemiol Community Health. 64:753-760.
 36. SC. 2011. Adaptation aux périodes de chaleur accablante : lignes directrices pour évaluer la vulnérabilité en matière de santé. Préparé par : Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs Santé Canada, Ottawa.
 37. SC. 2012. Élaboration de systèmes d'avertissement et d'intervention en cas de chaleur afin de protéger la santé : guide des pratiques exemplaires. Préparé par : Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs Santé Canada, Ottawa.
 38. SC. 2019. Événements de chaleur extrême : aperçu. Santé Canada.
<https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/changements-climatiques-sante/chaleur-accablante.html>.
 39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.032>.
 40. Inoue, Y., Nakao, M., Araki, T., & Ueda, H. 1992. Thermoregulatory responses of young and older men to cold exposure. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 65(6), 492–498. <https://doi.org/10.1007/BF00602354>.
 41. IOM. 2011. Climate Change. The Indoor Environment, and Health. Institute of Medicine of the National Academies Press, Washington, DC.
 42. GIEC. 2014: Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer (dir. publ.)]. GIEC, Genève, Suisse. p. 151.
 43. ISO. 2005. ISO 7730:2005 - Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD

et par des critères de confort thermique local. Organisation internationale de normalisation. Genève, Suisse.

44. ISO. 2017. ISO 7243:2017(fr) - Ergonomie des ambiances thermiques - Estimation de la contrainte thermique basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir). Troisième édition. Organisation internationale de normalisation. Genève, Suisse.
45. ISO. 2018. ISO 7933:2018 - Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible. Troisième édition. Organisation internationale de normalisation. Genève, Suisse.
46. Ji L. Laouadi A., Shu C., Wang L., Lacasse M.A. 2021. Evaluation and improvement of thermoregulatory system for the two-node bioheat model. Submitted to Energy and Building Journal.
47. Ji L. Laouadi A., Shu C., Wang L., Lacasse M.A. 2021. Physiological modeling of thermal responses of older people. Submitted to Buildings and Environment Journal
48. Jimoh O.F., Brown T.J., Bunn D., Hooper L. 2019. Beverage Intake and Drinking Patterns-Clues to Support Older People Living in Long-Term Care to Drink Well: DRIE and FISE Studies. *Nutrients*; 11 (2):447.
49. Jones A.C., Kirkpatrick S.I., Hammond D. 2019. Beverage consumption and energy intake among Canadians: analyses of 2004 and 2015 national dietary intake data. *Nutr J.* 18:60. <https://doi.org/10.1186/s12937-019-0488-5>.
50. Kaiser, R., A. Le Tertre, J. Schwartz, C.A. Gotway, W.R. Daley, C.H. Rubin. 2007. The Effect of the 1995 heat Wave in Chicago on All-Cause and Cause-Specific Mortality. *American Journal of Public Health.* 97:1.
51. Kenney W.L. 2021. LES RÉPONSES PHYSIOLOGIQUES À L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE. Chapitre 42 - La chaleur et le froid. Encyclopédie de sécurité et de santé au travail 4^e édition. Consulté en janvier 2021. <http://www.ilocis.org/documents/chpt42e.htm>
52. Kenny, G. P., Flouris, A. D., Yagouti, A., and Notley, S. R. (2018). Towards establishing evidence-based guideline on maximum indoor temperatures during hot weather in temperate continental climates. *Temperature*; 1-26.
53. Kosatsky, T. 2010. Hot Day Deaths, Summer 2009: What Happened and How to Prevent a Recurrence. *BCMJ*; 52, 261.
54. Kuht J., Farmery A.D, 2018. Body temperature and its regulation. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*; 19(9), 507-512.

55. Lan L., Lian Z. 2016. Ten questions concerning thermal environment and sleep quality. *Building and Environment*. 99: 252-259.
56. Lan L., Tsuzuk K., Liu Y.F., Lian Z.W. 2017. Thermal environment and sleep quality: A review. *Energy and Buildings*. 149: 101-113.
57. Lan, L, Xia, L, Tang, J, Zhang, X, Lin, Y, Wang, Z. Elevated airflow can maintain sleep quality and thermal comfort of the elderly in a hot environment. *Indoor Air*. 2019; 29: 1040– 1049. <https://doi.org/10.1111/ina.12599>,.
58. Laouadi A., Bartko M., Lacasse M.A. 2020b. A New Methodology of Evaluation of Overheating in Buildings. *Energy and Buildings*. DOI : 10.1016/j.enbuild.2020.110360.
59. Laouadi A., Gaur A., Lacasse M.A., Bartko M., Armstrong M.M. 2020a. Development of Reference Summer Weather Years for Analysis of Overheating Risk in Buildings. *Journal of Building Performance Simulation*, 13:3, 301-319, DOI : 10.1080/19401493.2020.1727954.
60. Laouadi A., Merhej E., Gaur A. 2020. Climate Resilience of Buildings: Overheating in Buildings — Heat Wave Exposure Mapping for Canadian Cities. Client Report CRBCPI-Y4-C4. NRC-CRC. p. 80.
61. Laouadi A. 2022. A new formulation for the predicted mean vote (PMV) index. Submitted to *Building Simulation Journal*. January 2022.
62. Lavigne, E., A. Gasparini, X. Wang. H. Chen, A. Yagouti, M.D. Fleury. S. Cakmak. 2014. Extreme ambient temperatures and cardiorespiratory emergency room visits: assessing risk by comorbid health conditions in a time series study. *Environmental Health*. 13:5.
63. Lebel G., Bustinza R., Dubé M. 2017. Analyse des impacts des vagues régionales de chaleur extrême sur la santé au Québec de 2010 à 2015. Inst. national de santé publique du Québec. www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2221_impacts_vagues_chaleur_extreme_sante.pdf.
64. Lin Z., Deng S. 2008. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics - Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropic. *Building and Environment*; 43: 905-916.
65. Lin Z., Deng S. 2008a. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics— Developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*; 43: 70-81.
66. Lin Z., Deng S. 2008b. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics - Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropic. *Building and Environment*; 43: 905-916.

67. Liu Y., Song, Cong & Wang, Yingying & Wang, Dengjia & Liu, Jiaping. (2014). Experimental study and evaluation of the thermal environment for sleeping. *Building and Environment*. 82. PP.546-555. [10.1016/j.buildenv.2014.09.024](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.024).
68. Lomas, K.J., S. Porritt. 2017. Overheating in buildings: lessons from research. *Building Research and Information*. 45:1-2, 1-18.
69. Ma T., Xiong J., Lian Z. 2017. A human thermoregulation model for the Chinese elderly. *Journal of Thermal Biology*. 70: 2-14.
70. Medina-Ramon M., Schwartz J. 2007. Temperature, temperature extremes, and mortality: a study of acclimatisation and effect modification in 50 US cities. *Occup. Environ. med.* 64: 827-833.
71. Meinke A., Hawighorst M., Wagner A., Trojan J., Schweiker M. 2017. Comfort-related feedforward information: occupants' choice of cooling strategy and perceived comfort, *Building Research & Information*, 45:1-2, 222-238.
72. NASEM. 2016. Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change. The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC. The National Academies Press. DOI : [10.17226/21852](https://doi.org/10.17226/21852).
73. Ngarambe J. & Geun Young Yun & Kisup Lee & Yeona Hwang, 2019. "Effects of Changing Air Temperature at Different Sleep Stages on the Subjective Evaluation of Sleep Quality," *Sustainability*, MDPI, Open Access Journal, vol. 11(5), pages 1-16, March.
74. NIOSH. 1986. Occupational exposure to hot environments, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 86–113, Washington DC, USA. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/86-113/default.html>.
75. CNRC. 2015. Code national du bâtiment – Canada 2015. Conseil national de recherches du Canada. Ottawa, Ontario.
76. RNCAN. 2011. Enquête 2011 sur l'utilisation de l'énergie par les ménages. Rapport statistique détaillé. Office de l'efficacité énergétique. Ressources naturelles Canada Ottawa, Ontario.
77. RNCAN. 2012. Enquête 2009 sur l'utilisation commerciale et institutionnelle d'énergie. Rapport statistique détaillé. Office de l'efficacité énergétique. Ressources naturelles Canada Ottawa, Ontario.
78. Nunneley S. 2021. PRÉVENTION DE LA CONTRAINTE THERMIQUE. Chapitre 42 - La chaleur et le froid. Encyclopédie de sécurité et de santé au travail 4^e édition. Consulté en janvier 2021. <http://www.ilocis.org/documents/chpt42e.htm>

79. Ogawa T. 2021. MALADIES LIÉES À LA CHALEUR. Chapitre 42 - La chaleur et le froid. Encyclopédie de sécurité et de santé au travail 4^e édition. Consulté en janvier 2021. <http://www.ilocis.org/documents/chpt42e.htm>
80. Orgill JF, Hollands KGT (1977) Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy* 19(4): 357-359.
81. Pan L., Lian Z., Lan L. 2012. Investigation of sleep quality under different temperatures based on subjective and physiological measurements. *HVAC&R RESEARCH* 18(5). 1030-1043.
82. Parsons K. 2014. *Human Thermal Environments. The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance.* Third edition; Taylor & Francis. New York, NY.
83. Périard J.D., Racinais S., Sawka M.N. 2015. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports. *Scand. J. Med. Sci. Sports*; 25 (Suppl. 1):20-38.
84. Pickup J., de Dear R. 2000. *An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT-SET) - Part I- The Model and its Assumptions.* Division of Environmental and Life Sciences, Macquarie University, Sydney, NSW 2109 Australia.
85. Pisacane V. L., Kuznetz L. H., Logan J. S., Clark J. B., Wissler E. H. 2007. Use of Thermoregulatory Models to Enhance Space Shuttle and Space Station Operations and Review of Human Thermoregulatory Control. NASA 1-17.
86. Quinn, A., J.D. Tamerius, M. Perzanowski, J.S. Jacobson, I. Goldstein, L. Acosta, J. Shaman. 2014. Predicting indoor heat exposure risk during extreme heat events. *Science of the Total Environment*. 490: 686-693.
87. Rida, M., N. Ghaddar, K. Ghali, J. Hoballah. 2014. Elderly bioheat modeling: changes in physiology, thermoregulation, and blood flow circulation. *Int. J. Biometeorol.* 58:1825-1843.
88. Rikkert O. M. G.M. 2009. Heat waves and dehydration in the elderly. *BMJ*; 339:119-120.
89. Robine, J.M., S.L.K Cheung, S. Le Roy, H.V. Oyen, C. Griffiths, J.P. Michel, F.R. Herrmann. 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Computer Rendus Biologies*. 331: 171-178.
90. Roelofsen, P. 2017. Healthy ageing: Differences between elderly and non-elderly in temperature sensation and dissatisfied. *Intelligent Buildings International*. 9:3, 123-136. DOI : 10.1080/17508975.2015.1063474.

91. Sagawa S., Shiraki K., Yousef M. K., Miki K. 1988. Sweating and cardiovascular responses of aged men to heat exposure. *Journal of gerontology*, 43(1), M1-M8.
92. Saha S. et al. 2010. CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://rda.ucar.edu/datasets/ds093.1/>
93. Saman W., Boland J., Pullen S., de Dear R., Soebarto V., Miller W., Pocock B., Belusko M., Bruno F., Whaley D., Pockett J., Bennetts H., Ridley B., Palmer J., Zuo J., Ma T., Chileshe N., Skinner N., Chapman J., Vujinovic N., Walsh M., Candido C., and Deuble M. 2013. A framework for adaptation of Australian households to heat waves. National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast. PP. 242.
94. Schellen, L., W. Van Marken Lichtenbelt, M. Loomans, J. Toftum, and M. De Wit. 2010. "Differences Between Young Adults and Elderly in Thermal Comfort, Productivity, and Thermal Physiology in Response to a Moderate Temperature Drift and a Steady-State Condition." *Indoor Air* 20: 273–283.
95. Scinocca, J.; Kharin, V.; Jiao, Y.; Qian, M.; Lazare, M.; Solheim, L.; Flato, G.; Biner, S.; Desgagne, M.; Dugas, B. Coordinated global and regional climate modeling. *J. Clim.* 2016, 29, 17–35.
96. Smith CJ. Pediatric Thermoregulation: Considerations in the Face of Global Climate Change. *Nutrients*. 2019; 11(9):2010. <https://doi.org/10.3390/nu11092010>
97. Smolander, J., Korhonen, O., Ilmarinen, R. 1990, Responses of young and older men during prolonged exercise in dry and humid heat. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61(5-6), pp. 413–418.
98. Soebarto V, Zhang H, Schiavon S., 2019. A thermal comfort environmental chamber study of older and younger people. *Building and Environment*.
99. Song X., Wang S., Hu Y., Yue M., Zhang T., Liu Y., Tian J., Shang K. 2017. Impact of ambient temperature on morbidity and mortality: An overview of reviews. *Science of the Total Environment*. 586: 241-2
100. Stapleton, J. M., Larose, J., Simpson, C., Flouris, A. D., Sigal, R. J., & Kenny, G. P. (2014). Do older adults experience greater thermal strain during heat waves? *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 39(3), 292–298. <https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0317>
101. StatCan. Âge et sexe – Faits saillants en tableaux, Recensement de 2016 <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/hltfst/as/Tableau.cfm?Lang=F&T=12>

102. Touchie M., Tzekova E., Siegel Jeffery, Purcell B., Morier J., 2016. Evaluate Summertime Overheating in Multi-Unit Residential Buildings Using Surveys and In-Suite Monitoring. Proceedings of the thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII International Conference. ASHRAE.
103. Tsuzuki K. and Ohfuku T. 2002. Thermal sensation and thermoregulation in elderly compared to young people in Japanese winter season', *Proceedings of Indoor Air*, (v), pp. 659–664.
104. Tsuzuki, K.; Mori, I.; Sakoi, T.; Kurokawa, Y. 2015. Effects of seasonal illumination and thermal environments on sleep in elderly men. *Build. Environ.*, 88, 82–88.
105. Tsuzuki, K.; Okamoto-Mizuno, K.; Mizuno, K. 2018. The Effects of Low Air Temperatures on Thermoregulation and Sleep of Young Men While Sleeping Using Bedding. *Buildings* 8, 76. <https://doi.org/10.3390/buildings8060076>.
106. Tsuzuki, K.; Sakoi, T.; Sakata, Y. 2021. Effect of Seasonal Ambient Temperature on Sleep and Thermal Comfort in Older People Living in Public Elderly Facilities. *Buildings*, 11, 574. <https://doi.org/10.3390/buildings11120574>.
107. Van Hoof, J.V., L. Schellen, V. Soebarto, J.K.W. Wong, J.K. Kazak. 2017. Ten questions concerning thermal comfort and ageing. *Building and Environment*. 120: 123-133.
108. Van Loenhout, J.A.F., A. Le Grand, F. Duijm, N.M. Vink, G. Hoek, M. Zuurbier. 2016. The effect of high indoor temperature on self-perceived health of elderly persons. *Environmental Research*. 146: 27-34.
109. Vardoulakis, S., C. Dimitroulopoulou, J. Thornes, K.M. Lai, J. Taylor, I. Myers, C. Heaviside, A. Mavrogianni, C. Shrubsole, Z. Chalabi, M. Davies, P. Wilkinson. 2015. Impact of climate change on the domestic indoor environment and associated health risks in the UK. *Environmental International*. 85: 299-313.
110. Vellei M., Ramallo-Gonzalez A.P., Coley D., Lee J., Gabe-Thomas E., Lovett T., Natarajan S. 2017. Overheating in vulnerable and non-vulnerable households. *Building Research and Information*. 45:1-2, 102-118.
111. Volkert D., Kreuel K., Stehle P. 2004. Nutrition beyond 65” – Amount of usual drinking fluid and motivation to drink are interrelated in community living independent elderly people. *Z. Gerontol. Geriat.*; 37: 436-443.
112. OMS. 2009. Improving Public Health Responses to Extreme Weather/Heat-Waves-EuroHeat. Organisation mondiale de la Santé, Bureau régional pour l'Europe. DK-2100 Copenhagen, Denmark.

113. Xiong, J., Ma, T., Lian, Z., & de Dear, R. (2019). Perceptual and physiological responses of elderly subjects to moderate temperatures. *Building and Environment*, 156(March), 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.012>.
114. Yeo, T.P. 2004. Heat Stroke. A Comprehensive Review. *AACN Clinical Issues*. 15:2, 280-293.
115. ZCH. 2016. Next steps in defining overheating. Discussion paper. Zero Carbon Hub. London, UK.
116. Zhang N., Cao B., Zhu Y., 2019. Effects of pre-sleep thermal environment on human thermal state and sleep quality. *Building and Environment*, 148, 600-608.
117. Zhang X, Vincent LA, Hogg WD, Niitsoo A. 2000. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century, *Atmosphere-Ocean*, 38, 3, 395-429.
118. Zhang Y., Chen H., Wang J., Meng Q. 2016. Thermal comfort of people in the hot and humid area of China—impacts of season, climate, and thermal history. *Indoor Air*; 26(5): 820-830.

Annexe A - MODÈLES DE SIMULATION DE BÂTIMENT

A.1 Logiciel de simulation

EnergyPlus V9.2.0 (<https://energyplus.net/>)

A.2 Modèles de bâtiments

A.2.1 Bâtiments types (archétypes)

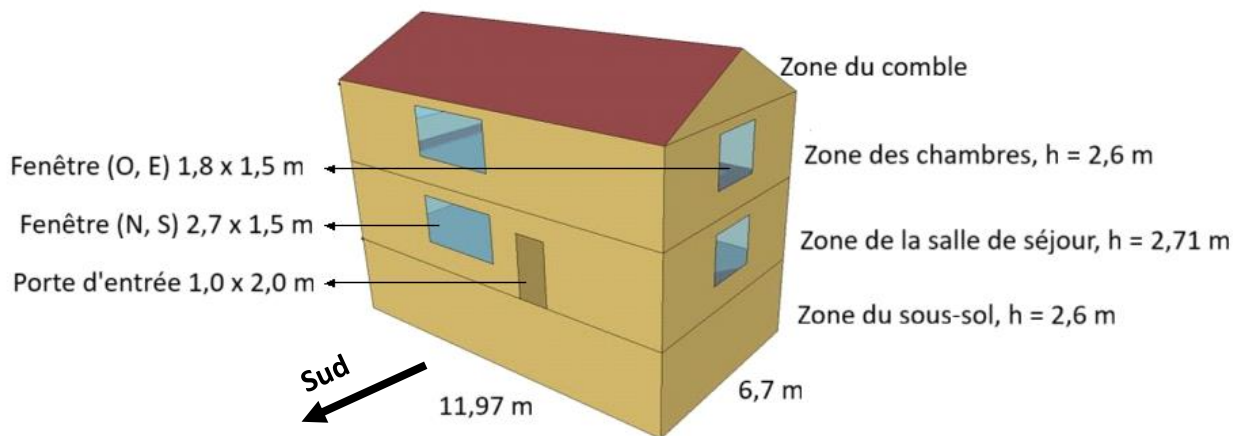


Figure 76. Modèle de maison individuelle type

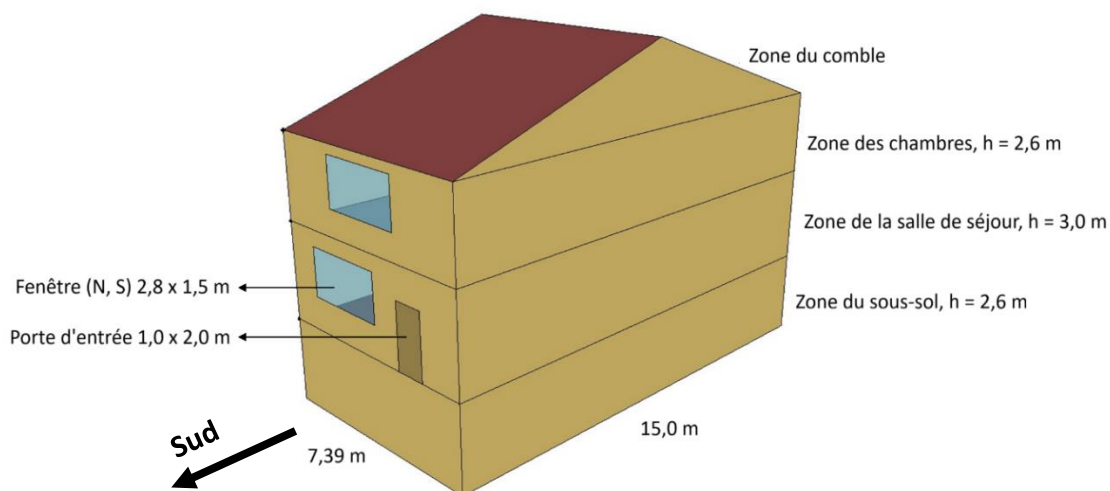


Figure 77. Modèle de maison en rangée type

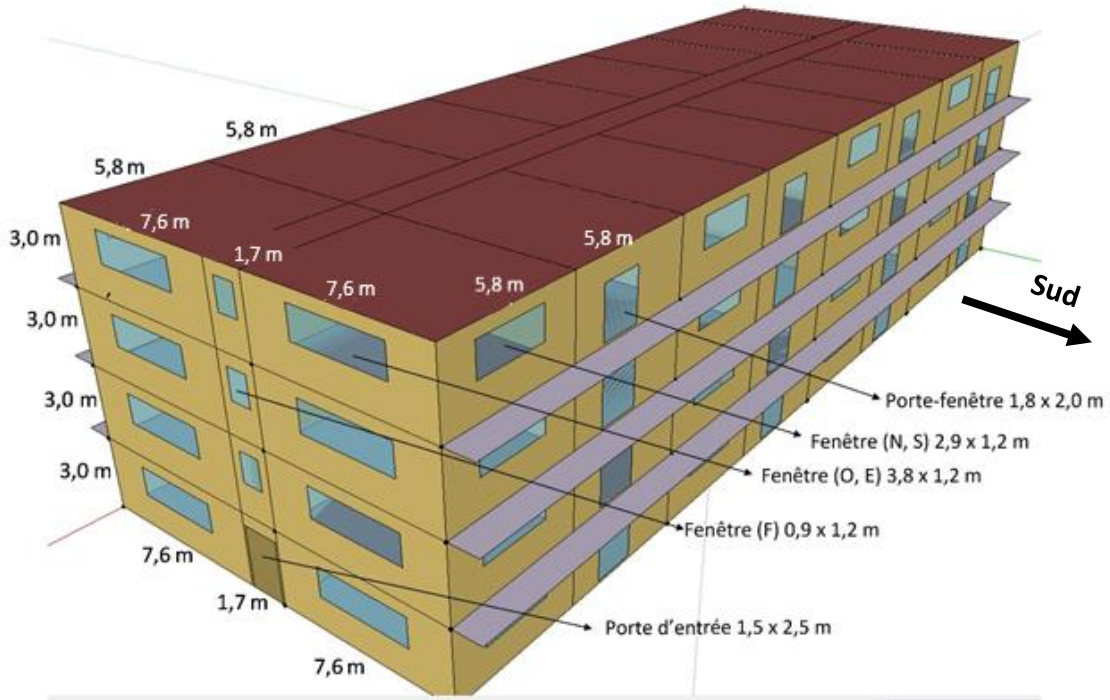


Figure 78. Modèle d'IRLM de moyenne hauteur type

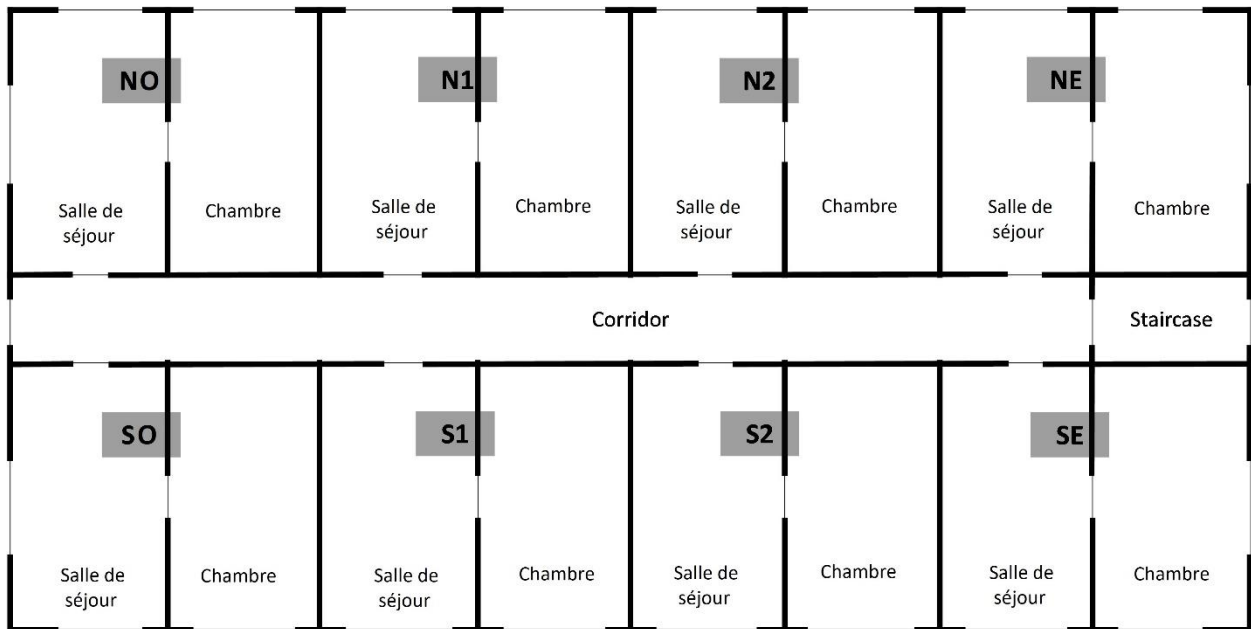


Figure 79 : Vue en plan du modèle d'IRLM de moyenne hauteur avec zones thermiques et noms des suites. Remarque : la suite SE au premier étage est convertie en deux bureaux

A.2.2 Caractéristiques du modèle de bâtiment

Tableau 13. Caractéristiques du modèle de bâtiment

Bâtiment →	Maison individuelle	Maison en rangée	IRLM de moyenne hauteur
Dimensions (m) : L x l x H	11,97 x 6,7 x 7,91	7,39 x 15,0 x 8,2	46,4 x 16,9 x 12,0
Fenêtres : rideau de verre	0,16	0,22	0,2
Nombre d'occupants	3	3	3
Gain de chaleur, équipements, W/m ² (CNRC, 2015)	5	5	10
Gain de chaleur, éclairage, W/m ² (CNRC, 2015)	5	5	5,5
Gain de chaleur, équipements de production d'eau chaude, W/personne (CNRC, 2015)	500	500	500

Tableau 13. Taux de fuite d'air dans les bâtiments

Construction →	Ancienne (1980) *	Modernisée **	Actuelle (2015)*	Nette zéro***
Maison individuelle	6,86 ACH	5,34 ACH	2,32 ACH	1,63 ACH
Maison en rangée	7,43 ACH	5,7 ACH	2,8 ACH	1,96 ACH
IRLM de moyenne hauteur****	4,32 ACH	3,0 ACH	2,4 ACH	1,68 ACH

* Données provenant des bases de données des taux de fuite d'air mesurés par RNCAN dans des bâtiments résidentiels

** Au moyen de la formule indiquée dans : Parekh, A, Roux, L, and Gallant, P. Thermal and air leakage characteristics of Canadian housing. Proc. Of the 11. Canadian conference on building science and technology. Banff, AB (Canada), 21 - 23 mars 2007

*** En tenant compte d'une réduction de 30 % des taux actuels (2015)

**** Données provenant du rapport RDH. 2013. Air leakage control in MURBs. Development of testing and measurement strategies to quantify air leakage in MURBs.

A.2.3 Systèmes CVCA de bâtiment

Tableau 14. Systèmes CVCA de différents modèles de maison

Construction →	Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (2015)	Nette zéro
Type de système CVCA	Chaudière au gaz Climatisation centrale	Chaudière au gaz, VRC, Climatisation centrale	Chaudière au gaz, VRC, Climatisation centrale	Chaudière au gaz, VRC, Climatisation centrale
Rendement du brûleur à gaz	0,8	0,95	0,95	0,95
Rendement du serpentin refroidisseur	COP 2,7	COP 3,28	COP 3,28	COP 3,28
Rendement de l'extracteur	0,6	0,7	0,7	0,7
Rendement du VRC	s.o.	0,6	0,6	0,6

Tableau 15. Systèmes CVCA de différents modèles d'IRLM

Construction →	Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (2015)	Nette zéro
Type de système CVCA	Chaudière centrale au gaz pour les suites; MAU à air extérieur à 100 % avec serpentin de chauffage au gaz pour les couloirs; climatiseur de fenêtre dans les suites	Chaudière centrale au gaz pour les suites; MAU à air extérieur à 100 % avec serpentin de chauffage au gaz pour les couloirs; climatiseur de fenêtre dans les suites	Chaudière centrale au gaz pour les suites; VRC dans les suites; climatiseur de fenêtre dans les suites MAU centrale pour les couloirs, avec serpentin de chauffage au gaz et serpentin de refroidissement électrique et VRC	Chaudière centrale au gaz pour les suites; VRC dans les suites; climatiseur de fenêtre dans les suites MAU centrale pour les couloirs, avec serpentin de chauffage au gaz et serpentin de refroidissement électrique et VRC
Rendement du brûleur à gaz	0,8	0,95	0,95	0,95

Rendement du serpentin de refroidissement de la MAU ou du climatiseur de fenêtre	COP 2,7	COP 3,28	COP 3,28	COP 3,28
Rendement des extracteurs dans les suites	0,6	0,7	0,7	0,7
Rendement du VRC	s.o.	s.o.	0,6	0,6

A.2.4 Réseau de flux d'air dans les bâtiments

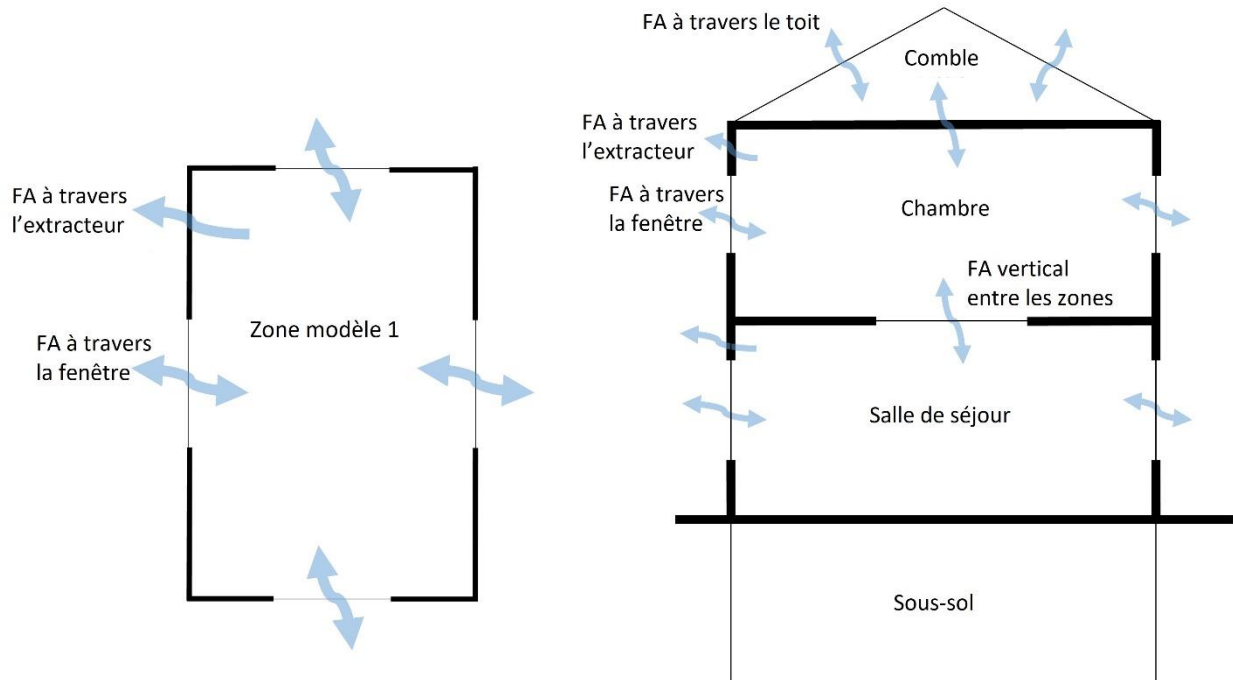


Figure 80. Échanges horizontaux et verticaux du réseau de flux d'air pour un modèle de maison individuelle

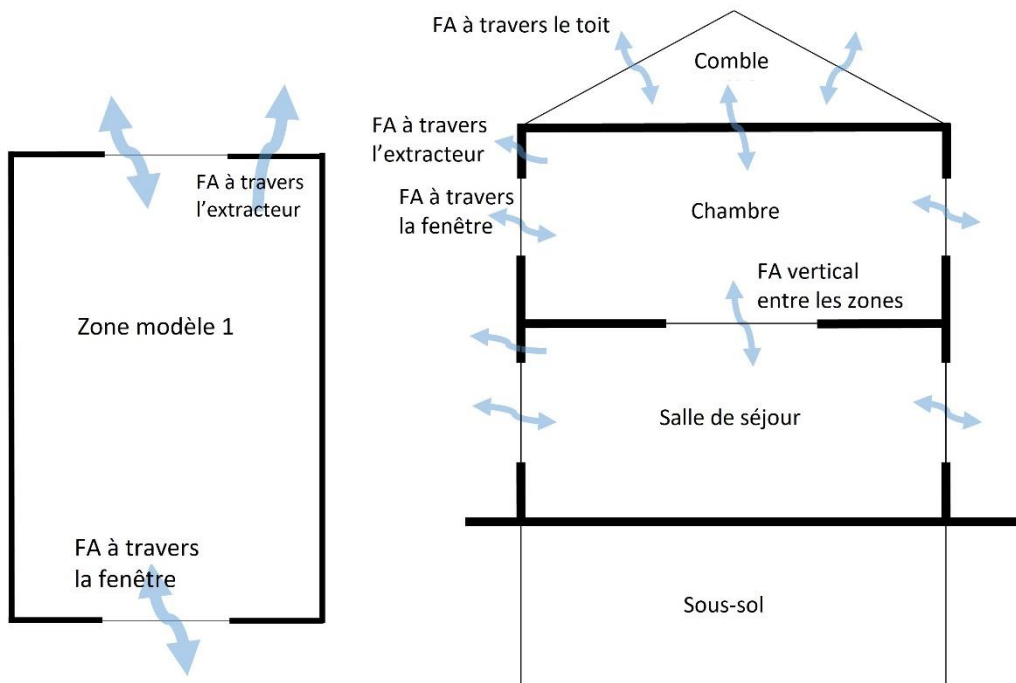


Figure 81. Échanges horizontaux et verticaux du réseau de flux d'air pour un modèle de maison en rangée

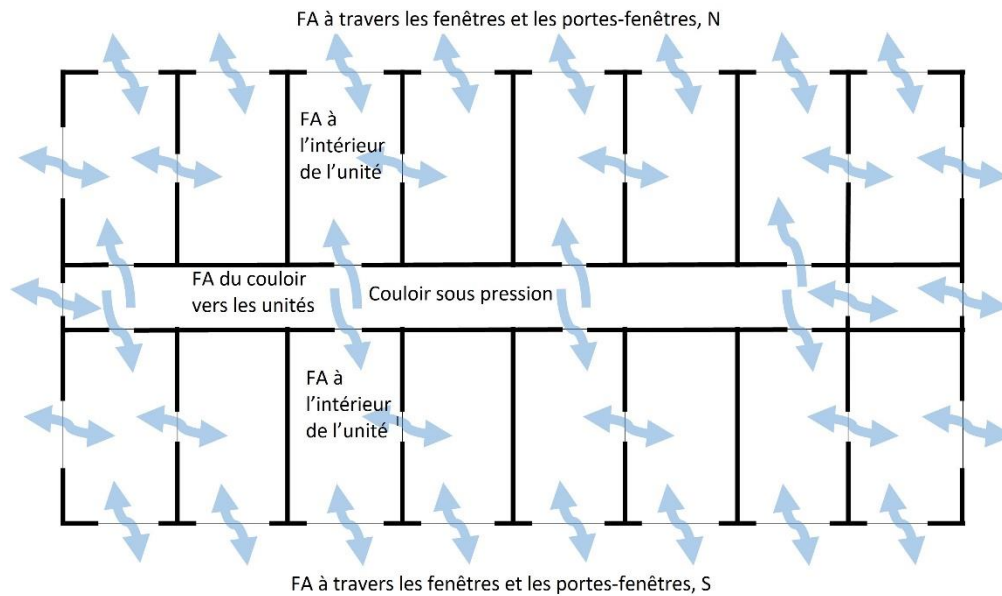




Figure 82. Échanges horizontaux et verticaux du réseau de flux d'air pour un modèle d'IRLM

A.3 Étalonnage des modèles de simulation de bâtiment

L'approche d'étalonnage compare l'intensité énergétique annuelle des bâtiments tels que simulés, et comme publiée pour des bâtiments similaires ou provenant des bases de données énergétiques gouvernementales d'un grand nombre de bâtiments similaires dans le lieu faisant l'objet de l'étude.

Tableau 16. Étalonnage d'un modèle de maison individuelle

Intensité énergétique kWh/m ²	Modèle Construction année 1980	Modèle Construction année 2015	Maison CCTR - Construction ancienne*	Maison CCTR - Construction R2000*	RNCan Ontario**	RNCan Ontario***
Refroidissement (électricité)	8,74	9,05	6,8	4,57	5,0	s.o.
Chauffage (gaz)	175,28	50,76	142,7	73,38	228,4	108 - 125 ^x
Total	214,22	96,83	s.o.	s.o.	282	147 - 175 ^x
<p>* Laouadi : Guideline for effective residential solar shading devices, 2010 Remarque : le modèle comprend le chauffage au gaz, le refroidissement électrique, les éclairages (sans eau chaude ni appareils ménagers) Construction ancienne (1980) : Taux de fuite d'air CCTR 4,7 ACH à 50 Pa; Modèle (ancien) 6,86 ACH à 50 Pa Valeur R mur CCTR R16; Modèle (ancien) R11 Valeur R toit CCTR R29; Modèle (ancien) R20 Construction R2000 : Taux de fuite d'air CCTR 1,24 ACH à 50 Pa; Modèle (2015) 1,24 ACH à 50 Pa Valeur R mur CCTR R25; Modèle (actuel) R18 Valeur R toit CCTR R52; Modèle (actuel) R47</p>						
<p>** RNCan 1990, Office de l'efficacité énergétique > Statistiques de la consommation d'énergie > Base de données nationale sur la consommation d'énergie > Base de données complète sur la consommation d'énergie > Secteur résidentiel; Tableau 35 L'ÉNERGIE TOTALE COMPREND LE CHAUFFAGE, LE REFROIDISSEMENT ET LES ÉCLAIRAGES https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/guide/tableaux.cfm https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP&sector=res&juris=on&rn=35&page=3</p>						
<p>*** RNCan 2011, Enquête 2011 sur l'utilisation de l'énergie par les ménages ^x Conversion de GJ/m² à kWh/m². 1 GJ/m² = 277,778 kWh/m²; ^{xx} Valeur inférieure supposée du fait qu'un certain pourcentage de maisons sont chauffées à l'électricité ou par des combustibles solides (bois, charbon); les maisons sont partiellement chauffées au gaz.</p>						

Tableau 17. Étalonage d'un modèle d'IRLM de moyenne hauteur

Intensité énergétique (kWh/m ²)	Modèle Construction année 1980	Construction modèle 2015	RNCan, 2011 ¹ (2003)	RNCan Ontario ² 1990 (2016)	TAF, UT ³ , 2012	SCHL ⁴ , 2005	OHC, Ontario ⁵ , 2000	CNRC, Ontario ⁶ , 1982	HiSTAR ⁷ , 2007
Refroidissement	11,0	10,5	s.o.	1,5 (3,8)	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
Chauffage (gaz)	297,7	167,7	127,8 (s.o.)	137,5 (81)	195,6 (67 %)	196 (49 %)	s.o.	s.o.	s.o.
Électricité	46,6	45,4	55,56 (s.o.)	s.o.	96,4 (33 %)	108 (27 %)	s.o.	s.o.	s.o.
Énergie totale	341,5	210,8	267,08 (305)	190,2 (116,7)	292 (90 - 510)	400 (281 - 581)	232	287 (134 - 672)	275 (136 - 495)
¹ RNCan 2011, Enquête sur l'utilisation de l'énergie par les ménages / Données moyennées recueillies auprès des ménages <ul style="list-style-type: none"> • Intensité énergétique 0,46 GJ/m² (127,8 kWh/m²) • Intensité électrique 0,2 GJ/m² (55,56 kWh/m²) • Intensité de gaz 0,63 GJ/m² x nombre total de maisons, divisé par le nombre de maisons qui utilisent le gaz pour le chauffage (0,63 x 5063479/3317817 x 277,78 = 267,08 kWh/m²) 									
² RNCan, Office de l'efficacité énergétique > Statistiques de la consommation d'énergie > Base de données nationale sur la consommation d'énergie > Base de données complète sur la consommation d'énergie > Secteur résidentiel; Tableau 39 / L'ÉNERGIE TOTALE COMPREND LE CHAUFFAGE, LE REFROIDISSEMENT ET LES ÉCLAIRAGES https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/guide/tableaux.cfm https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP&sector=res&juris=on&rn=39&page=3									
Base de données RNCan sur la consommation d'énergie pour l'Ontario, 1990 <ul style="list-style-type: none"> • Chauffage des locaux 45,7 PJ 137,5 kWh/m² / Refroidissement des locaux 0,5 PJ 1,5 kWh/m² Surface de plancher 92,3x10⁶ m². • Total (chauffage, refroidissement, éclairage, appareils ménagers). 0,94 GJ/m² 260,2 kWh/m² 					Base de données RNCan sur la consommation d'énergie pour l'Ontario, 2016 <ul style="list-style-type: none"> - Chauffage des locaux 44,3 PJ 116,45 kWh/m² / Refroidissement des locaux 2,1 PJ 10,0 kWh/m² Surface de plancher 151,9x10⁶ m². - Total (chauffage, refroidissement, éclairage, appareils ménagers). 0,56 GJ/m² 155,3 kWh/m² 				
³ University of Toronto, Retrofit Opportunities in MURBs in the City of Toronto, 2012 <ul style="list-style-type: none"> • Database of existing buildings. Chapter 3.2 Refined data set energy intensity, page 8. (Normalized to CWEC). • Références résumées par : C. Binkley, Energy Consumption trends of Multi-Unit Residential Buildings in the City of Toronto, U. of Toronto, 2012 									
⁴ SCHL, Douglas Hart, Energy and Water Consumption Load Profiles in Multi-Unit Residential Buildings, 2005 ⁵ SCHL Enermodal Engineering Limited, Review of OHC Building Energy and Water Audits, 2000 ⁶ CNRC, A Hakim Elmahdy, Building Research Note: Annual Consumption Data on Apartment Buildings, 1982 ⁷ Canadian Bldg. Energy End-Use Data & Analysis Centre, R. Liu, Energy Consumption & Energy Intensity in Multi-Unit Residential Buildings in Canada, 2007									

A.4 Stratégies de ventilation

Tableau 18. Stratégies de ventilation de modèles de maisons individuelles et en rangée

Mesure	Bâtiment ancien	Bâtiment modernisé	Bâtiment actuel	Nette zéro
Ventilation par défaut	Extracteur de cuisine fonctionnant en continu au premier étage (12 litres/s) et ventilateur de salle de bains au deuxième étage (10 litres/s)	VRC (débit nominal 35 litres/s) + extracteurs	VRC + extracteurs	VRC + extracteurs
Ventilation naturelle : fenêtres ouvertes si $T_{in} > 26^{\circ}\text{C}$ et T_{ext}	Ouverture à 25 %	Ouverture à 25 %	Ouverture à 25 %	Ouverture à 25 %
Ventilation de nuit	Extracteurs + débit d'air de ventilateur x10 entre 22 h 00 et 9 h 00	VRC + extracteurs + débit d'air de ventilateur x10 entre 22 h 00 et 9 h 00	VRC + extracteurs + débit d'air de ventilateur x10 entre 22 h 00 et 9 h 00	VRC + extracteurs + débit d'air de ventilateur x10 entre 22 h 00 et 9 h 00
Ventilation en mode mixte	Extracteur + ventilation naturelle + ventilation de nuit	VRC + extracteurs + ventilation naturelle + ventilation de nuit	VRC + extracteurs + ventilation naturelle + ventilation de nuit	VRC + extracteurs + ventilation naturelle + ventilation de nuit

Tableau 19. Stratégies de ventilation pour des modèles d'IRLM

Mesure	Bâtiment ancien	Bâtiment modernisé	Bâtiment actuel	Nette zéro
Ventilation par défaut	Extracteurs fonctionnant en continu dans les suites (22 litres/s); MAU à air extérieur à 100 % avec système de couloir pressurisé	Extracteurs fonctionnant en continu dans les suites (22 litres/s); MAU à air extérieur à 100 % avec système de couloir pressurisé	Extracteurs fonctionnant en continu (22 litres/s) et VRC (24 litres/s) dans les suites; MAU pour les couloirs	Extracteurs fonctionnant en continu (22 litres/s) et VRC (24 litres/s) dans les suites; MAU pour les couloirs
Ventilation naturelle : fenêtres ouvertes si $T_{in} > 26^{\circ}\text{C}$ et T_{ext}	Fenêtres des chambres à 10 %; porte-fenêtre à 50 %	Fenêtres des chambres à 10 %; porte-fenêtre à 50 %	Fenêtres des chambres à 10 %; porte-fenêtre à 50 %	Fenêtres des chambres à 10 %; porte-fenêtre à 50 %
Ventilation de nuit	Extracteurs + débit d'air de VRC x10 (24 litres/s) entre 22 h 00 et 9 h 00	Extracteurs + débit d'air de VRC x10 entre 22 h 00 et 9 h 00	VRC + extracteurs + débit d'air de VRC x10 entre 22 h 00 et 9 h 00	VRC + extracteurs + débit d'air de VRC x10 entre 22 h 00 et 9 h 00
Ventilation en mode mixte	Extracteurs + ventilation naturelle + ventilation de nuit	Extracteurs + ventilation naturelle + ventilation de nuit	VRC + extracteurs + ventilation naturelle + ventilation de nuit	VRC + extracteurs + ventilation naturelle + ventilation de nuit

A.5 Dispositifs d'ombrage

Tableau 20. Types de dispositifs d'ombrage des modèles de bâtiments

Type de dispositif d'ombrage et description	Commandes
Stores vénitiens horizontaux internes, référence	Ouverture avec angle des lames horizontales de 90° en hiver Fermeture avec angle des lames de 175° en été (de mai à septembre)
Écran gris extérieur avec coefficient d'ouverture de 5 %	Rétracté en hiver et entièrement ouvert en été
Stores vénitiens intérieurs réfléchissants avec réflectivité solaire de 70 %	Ouverture avec angle des lames horizontales de 90° en hiver Fermeture avec angle des lames de 175° en été (de mai à septembre)
Fenêtres avec double vitrage thermochrome	Commandé automatiquement entre la température du vitrage de 25°C (clair) et 65°C (entièrement teintée)
Fenêtres avec double vitrage électrochrome	Entièrement teintées si le rayonnement solaire incident sur la fenêtre est supérieur à 150 W/m ² et que T _{ext} > 20°C

A.6 Types de fenêtres

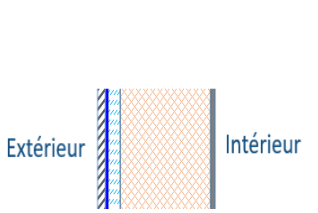
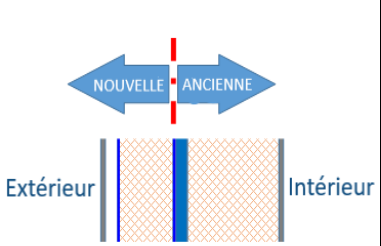
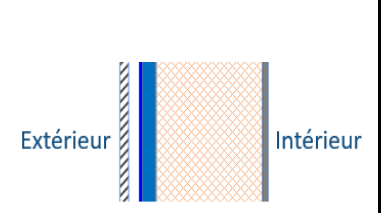
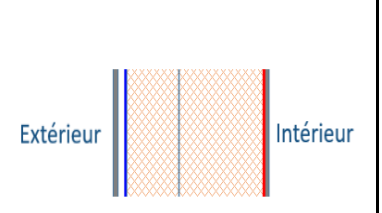
Tableau 21. Types de fenêtres (ϵ désigne l'émissivité)

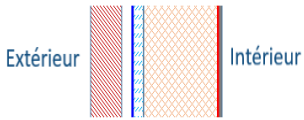
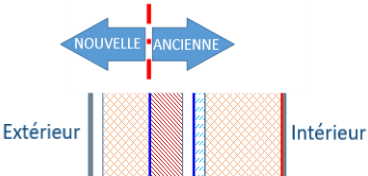
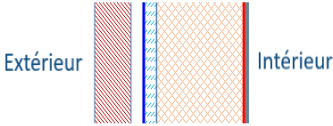
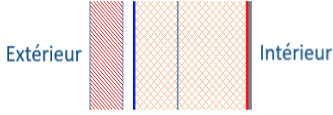
Nom	Vitrage	Description	Indices de rendement (centre de la section du verre)		
			VT	CARS	Coefficient U (W/m ² K)
Dclear	Double, clair	Pilkington Optifloat Clair, 6 mm espace d'air, 13 mm Pilkington Optifloat Clair, 6 mm	0,78	0,702	2,58
Dclear + EL	Double, clair, à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité ($\epsilon = 0,042$)	Cardinal 272, 6 mm, à revêtement à faible émissivité (2 couches) 13 mm, 10 % air et 90 % argon Pilkington Optifloat Clair, 6 mm	0,69	0,42	1,33
Dclear + EH	Double, clair, à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité ($\epsilon = 0,157$)	Pilkington Optifloat Clair, 6 mm 13 mm, 10 % air et 90 % argon Pilkington Energy Advantage, 6 mm, à revêtement à faible émissivité (3 couches)	0,73	0,67	1,58
Dgreen + eL	Double, teinté en vert, à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité ($\epsilon = 0,044$)	Guardian, 6 mm, teinté en vert, à revêtement faible émissivité (2 couches) 13 mm, 5 % air et 95 % argon Pilkington Optifloat Clair, 6 mm	0,56	0,30	1,34
Thermochrome	Thermochrome avec revêtement à faible émissivité (clair à 25°C et foncé à 65°C)	Verre clair, 6 mm Couche Suntuitive 1,24 mm Verre clair, 5 mm 13 mm, 10 % air et 90 % argon	0,56	0,414	1,37
		Cardinal 272, 6 mm, à revêtement à faible émissivité (2 couches)	0,08	0,184	1,37
Électrochrome	Électrochrome avec revêtement à faible émissivité (Teinte 1, claire et Teinte 4, foncé)	Verre clair, 6 mm / revêtement électrochrome / 2 couches 13 mm, 10 % air et 90 % argon	0,50	0,345	1,38
		Cardinal 272, 6 mm, à revêtement à faible émissivité (2 couches)	0,026	0,074	1,38
Tclear + eL	Triple, clair, à gain solaire faible et à revêtement à faible émissivité ($\epsilon_2 = 0,042$, $\epsilon_5 = 0,042$)	Cardinal 272, 6 mm, à revêtement à faible émissivité 13 mm, 5 % air et 95 % argon Pilkington Optifloat Clair, 6 mm 13 mm, 5 % air et 95 % argon	0,54	0,35	0,57

		Cardinal 272, 6 mm, à revêtement à faible émissivité			
Tclear + EH	Triple, clair, à gain solaire élevé et à revêtement à faible émissivité ($\epsilon_3 = 0,157$, $\epsilon_5 = 0,157$)	Pilkington Optifloat Clair, 6 mm 13 mm, 5 % air et 95 % argon Pilkington Energy Advantage, 6 mm, à revêtement à faible émissivité 13 mm, 5 % air et 95 % argon Pilkington Energy Advantage, 6 mm, à revêtement à faible émissivité	0,60	0,57	0,78

A.7 Constructions murales des modèles de maisons

Tableau 22. Types de constructions murales des modèles de maisons individuelles et en rangée


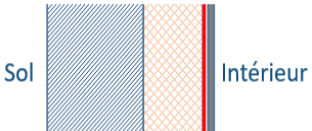
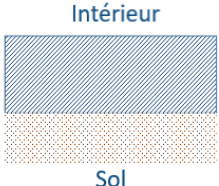
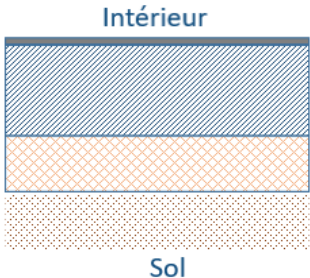
Type de construction		Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	ENZr future
Légère	Géométrie				

Type de construction		Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	ENZr future
	Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Parement en bois, 19 mm • Barrière résistante aux intempéries • Revêtement en panneaux de fibres de bois, 19 mm • Montant en bois (2 x 4 po), 100 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardage en vinyle/Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Isolation en laine minérale, 100 mm • Structure existante (colonne de gauche) avec bardage extérieur et tasseaux retirés 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardage en vinyle profilé, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • PSE (isolation continue), 25mm • Montant en bois (2 x 6 po), 150 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardage en vinyle, 15 mm • Barrière résistante aux intempéries • Isolation en laine minérale, 100 mm • Revêtement en panneaux OSB, 12 mm • Montant en bois (2 x 6 po), 150 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm
	R effectif : m ² K/W (pi ² ·°F·h/BT)	R1.8 (R10)	R4.2 (R24)	R3.2 (R18)	R4.6 (R26)
Moyenne	Géométrie				

Type de construction		Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	ENZr future
	Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Parement de brique en argile, 100 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Revêtement en gypse, 12 mm • Montant en bois, 150 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Isolation en laine minérale, 100 mm • Revêtement perméable à la vapeur • Structure existante (colonne de gauche) 	<ul style="list-style-type: none"> • Parement de brique en argile, 100 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • PSE (isolation continue), 25mm • Montant en bois, 150 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Parement de brique en argile, 100 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Isolation en laine minérale, 100 mm • Revêtement en panneaux OSB, 12 mm • Montant en bois, 150 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm
	R effectif : m ² K/W (pi ² .°F.h/BT)	R2.6 (R15)	R5.0 (R28)	R3.2 (R18)	R4.8 (R27)

A.8 Murs de soubassement et hourdis des modèles de maisons

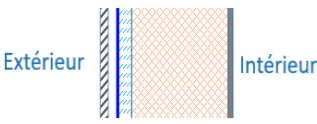
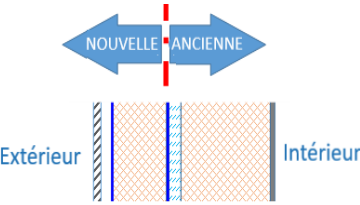
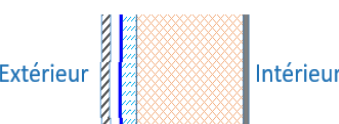
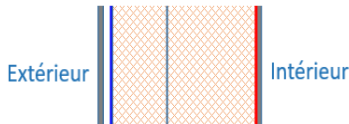
Tableau 23. Constructions des murs de soubassement et des hourdis des modèles de maisons

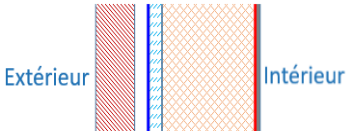
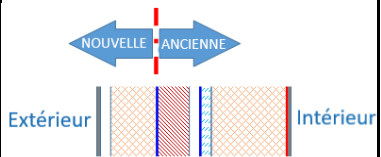
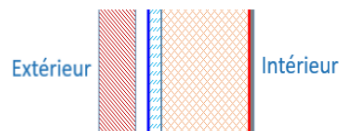
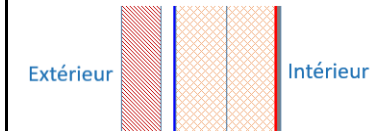
Construction du soubassement	Mur		Hourdis	
	Non isolé	Isolé	Non isolé	Isolé
Géométrie				
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Béton, 150 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Béton, 150 mm • Isolant en natte, 50 mm • Pare-vapeur, feuille polyester 	<ul style="list-style-type: none"> • Béton, 150 mm • Matériaux granulaires grossier, 100 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Revêtement de sol, 20 mm • Béton, 150 mm • PSX, 50 mm • Matériaux granulaires d'assise, 100 mm
R : m ² K/W (pi ² .° F.h/BTU)	R0.5 (R3)	R1.7 (R9)	R0.6 (R3)	R1.6 (R9)

Référence : CCCBPI : Code national du bâtiment – Canada, 2015

A.9 Constructions murales des modèles d'IRLM

Tableau 24. Types d'ensembles muraux des modèles d'IRLM

Type de construction		Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	ENZr future
Légère	Géométrie				
	Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Bardage en bois, 20 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Revêtement en gypse, 12 mm • Montant en acier, 150 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Isolation en laine minérale, 100 mm • Structure existante (colonne de gauche) avec bardage extérieur et tasseaux retirés 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • PSE (isolation continue), 25mm • Montant en acier, 150 mm avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Isolation en laine minérale, 100 mm • Revêtement en panneaux OSB, 12 mm • Montant en acier, 150 m avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm

Type de construction		Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	ENZr future
	R effectif : $\frac{m^2KW}{(pt^2 \cdot F \cdot h/BT)}$ U)	R1.7 (R10)	R3.8 (R22)	R2.2 (R12)	R3.8 (R22)
Moyenne	Géométrie				
	Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Parement de brique en argile, 100 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Revêtement en gypse, 12 mm • Montant en acier, 150 mm - avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Isolation en laine minérale, 100 mm • Revêtement perméable à la vapeur • Structure existante (colonne de gauche) 	<ul style="list-style-type: none"> • Parement de brique en argile, 100 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • PSE (isolation continue), 50mm • Montant en acier, 150 mm - avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Parement de brique en argile, 100 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Isolation en laine minérale, 100 mm Montant en acier, 150 mm - avec isolant en natte • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm
	R effectif : $\frac{m^2KW}{(pt^2 \cdot F \cdot h/BT)}$	R1.7 (R9)	R4.1 (R23)	R3.1 (R18)	R3.9 (R22)

Type de construction		Ancienne (1980)	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	ENZr future
Lourde	Géométrie				
	Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Parement de brique en argile, 100 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Panneau isolant, 25 mm • CMU, 150 mm • Isolation intérieure, 25 mm • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Isolation en laine minérale, 100 mm • Revêtement perméable à la vapeur • Structure existante (colonne de gauche) 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière étanche à l'eau • Isolation en laine minérale, 120 mm • Mur en béton, 150 mm • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Panneaux en béton renforcé de fibres, 15 mm • Cavité d'air, 25 mm • Barrière résistante aux intempéries • Isolation en laine minérale, 150 mm • Mur en béton, 150 mm • Cloison sèche, 12 mm
	R effectif : $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ($pi^2 \cdot F \cdot h / BT$)	R1.6 (R9)	R4.0 (R23)	R3.0 (R17)	R3.7 (R21)

Références :

1) Couches d'ensembles muraux :

Bâtiments des années 1980 : SCHL : Construction de maison à ossature de bois - Canada, 1988

Bâtiments actuels : SCHL : Construction de maison à ossature de bois - Canada, 2013

CCCBPI* : Code national du bâtiment – Canada, 2015

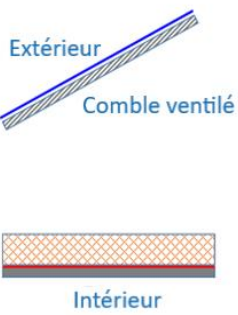

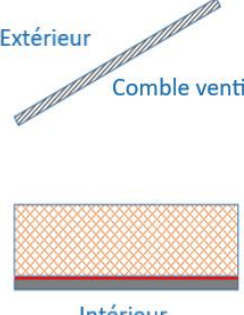
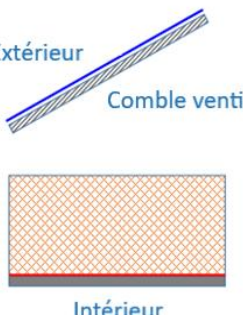
Bâtiments modernisés : RDH : Deep Building Enclosure Energy Retrofit Study, 2017

* Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies

2) R effectif : ASHRAE, Handbook of Fundamentals, 2017, (with incorporated effect of wood studs thermal bridging). Appendix B1

A.10 Constructions des toitures des modèles de maisons

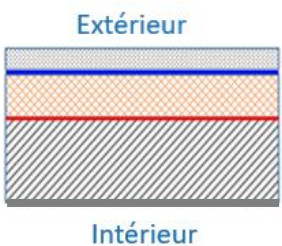
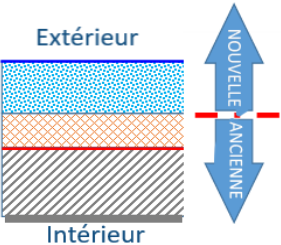
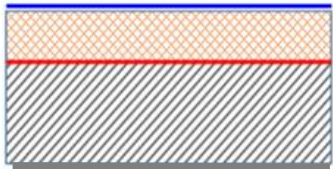
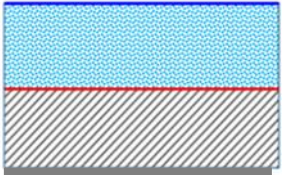
Tableau 25. Constructions des toitures des modèles de maisons

Const.	1980	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	ENZr future
Géométrie				
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Bardeaux bitumés, 5 mm • Membrane de sous-toiture • Revêtement en panneaux OSB, 12 mm • Cavité d'air du grenier • Isolant soufflé, 150 mm • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardeaux bitumés, 5 mm • Membrane de sous-toiture • Revêtement en panneaux OSB, 12 mm • Cavité d'air du grenier • Isolant soufflé supplémentaire, 200 mm • Isolant soufflé d'origine, 150 mm • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardeaux bitumés, 5 mm • Membrane de sous-toiture • Revêtement en panneaux OSB, 12 mm • Cavité d'air du grenier • Isolant soufflé, 350 mm • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardeaux bitumés, 5 mm • Membrane de sous-toiture • Revêtement en panneaux OSB, 12 mm • Cavité d'air du grenier • Isolant soufflé, 500 mm • Pare-vapeur, feuille polyester • Cloison sèche, 12 mm
R : m ² K/W (pi ² .°F.h /BTU)	R3.6 (R20)	R8.2 (R47)	R8.2 (R47)	R11.7 R66

Références : SCHL : Construction de maison à ossature de bois - Canada, 1988
 SCHL : Construction de maison à ossature de bois - Canada, 2013
 CCCBPI : Code national du bâtiment – Canada, 2015

A.11 Constructions des toitures des modèles d'IRLM

Tableau 26. Constructions des toitures des modèles d'IRLM

Const.	1980	Modernisée	Actuelle (CNB 2015)	HP future
Géométrie				
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Gravier, 50 mm • Membrane d'asphalte, 10 mm • Panneau isolant ISO, 50 mm • Pare-vapeur, feuille polyester • Support en béton, 150 mm • Enduit, 10 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane réfléchissante/non réfléchissante, 1,5 mm • Panneau isolant XPS, 100 mm • Structure existante (colonne de gauche) avec gravier et asphalte retirés 	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane réfléchissante/non réfléchissante, 1,5 mm • Panneau isolant ISO, 125 mm • Pare-vapeur, feuille polyester • Support en béton, 150 mm • Enduit, 10 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Membrane, 1,5 mm • Panneau isolant XPS, 250 mm • Pare-vapeur, feuille polyester • Support en béton, 50 mm • Enduit, 10 mm
R : m ² K/W (pi ² ·°F·h/BTU)	R2.6 (R15)	R5.4 (R30)	R6.1 (R34)	R7.3 (R41)