POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Développement d'un outil de calcul (CEEB) pour l'étude préliminaire de la charge thermique selon la configuration architecturale des bâtiments incluant les ponts thermiques

VÉRONIQUE GISONDI

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie civil

Août 2020

© Véronique Gisondi, 2020.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Développement d'un outil de calcul (CEEB) pour l'étude préliminaire de la charge thermique selon la configuration architecturale des bâtiments incluant les ponts thermiques

Présenté par **Véronique GISONDI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Philippe PASQUIER, président

Najib BOUAANANI, membre et directeur de recherche

Dominique DEROME, membre externe

DÉDICACE

Nul désir ne nous est donné sans que nous ayons le pouvoir de le réaliser.

- Louise Hay

Dans chaque enfant il y a un artiste.

Le problème est de savoir comment rester un artiste en grandissant.

- Pablo Picasso

Nul besoin de tout savoir sur l'océan pour y nager.

- Dan Milman

La vie réside dans le maintien, la jonglerie du déséquilibre.

Lorsque l'état d'équilibre est atteint, la vie est éteinte.

- Hubert Reeves

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenu à travers ce projet de recherche et qui m'ont aidé à le rendre possible. Mes premiers remerciements vont à mon directeur de recherche, Najib Bouaanani, pour la confiance qu'il m'a accordée dès le départ et pour son ouverture d'esprit afin d'aller au-delà de certaines balises de sujet de recherche. Grâce à notre curiosité partagée et à notre sensibilité face à notre environnement, nous avons su collaborer et outrepasser tous types d'obstacles en faisant preuve de résilience. Merci pour votre soutien inébranlable et de m'avoir guidé de votre expertise, tout en m'accordant la liberté nécessaire pour que je puisse m'épanouir et me dépasser. De plus, merci à Sylvain Renaud, pour ses conseils, sa disponibilité, bref son support pertinent en fin de projet, pour la touche finale. Merci également au personnel et aux étudiants aux cycles supérieurs du Groupe de Recherche en Structure (GRS) pour votre accueil chaleureux et votre bienveillance.

Ensuite, je tiens à remercier Louise Millette pour son soutien moral. Seulement quelques mots échangés avec elle suffisent pour nous rappeler nos instincts, notre valeur profonde et refaire le plein de confiance, de détermination et de motivation. Merci d'être un exemple féminin d'ingénierie, de force et de valeurs que je partage.

J'aimerais remercier les Fonds de Recherche du Québec - Nature et Technologies (FRQNT) pour le financement de mon travail de recherche.

Sur un plan plus personnel, mon quotidien n'aurait pu être le même, aussi équilibré, joyeux et vivant sans l'amour de ma famille et amis. Mes précieuses relations d'amitié de longue date ont su m'aider à garder le cap, à me donner l'énergie requise, mais également à relativiser, merci mes amies! Merci à ma famille pour leur support, leur compréhension et leurs encouragements. Un merci particulier et profond à ma mère, sans qui, rien n'aurait été possible et qui me donne l'envie d'avancer toujours plus loin dans la vie grâce à ce qu'elle est et aux ressources auxquelles elle me donne accès. Merci infiniment pour ton soutien inconditionnel, ton écoute, tes conseils et finalement, le plus important, d'être là pour moi et de croire en moi.

RÉSUMÉ

Le contexte des changements climatiques engendre une adaptation du cadre bâti de notre société. Afin de limiter les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle, le Canada, mais également le Québec, et surtout Montréal, sont des zones critiques à plusieurs niveaux. Au Canada, comme au Québec, le secteur des bâtiments est le troisième plus grand responsable des émissions totales de GES fédérales et provinciales. Le chauffage des locaux est, de loin, la part la plus importante de consommation énergétique des bâtiments commerciaux et institutionnels. Ces bâtiments sont encore majoritairement chauffés par les combustibles fossiles. Leur demande en chauffage est critique lors de la période hivernale. Le secteur des bâtiments publics et institutionnels présente des retards sérieux en termes de modernisation énergétique, mais ces défis dévoilent de nombreuses opportunités. En effet, la gestion de l'énergie du secteur commercial et institutionnel a le potentiel d'afficher le plus fort taux de progression. Ainsi, la réhabilitation thermique dans les bâtiments, notamment institutionnels, en climat froid tel qu'au Québec, est un enjeu de grande importance pour lutter contre les changements climatiques.

Ce projet de maîtrise vise à développer et à mettre en application un outil de calcul énergétique, nommé CEEB (Calculs pour l'Efficacité Énergétique des Bâtiments), pour évaluer de manière simple, pratique, modulable et vérifiable la charge thermique d'un bâtiment au stade préliminaire de sa conception. Cet outil permet aux praticiens du génie civil de proposer des stratégies durables et viables pour améliorer le rendement énergétique des bâtiments nouveaux ou existants, en particulier ceux du parc institutionnel. L'outil créé se veut une aide à la conception en phase préliminaire selon les différentes expertises impliquées : architecturale, structurale, mécanique et électrique. Il permet de faciliter les décisions qui auront un impact important sur la consommation énergétique du bâtiment. La maîtrise du programme permet aux utilisateurs d'une part, de mieux anticiper les performances énergétiques du bâtiment et d'autre part, de modéliser des stratégies structurales ou architecturales créatives sur mesure, allant au-delà des conceptions traditionnelles. Cet outil s'intéresse aux phénomènes physiques passifs d'échanges thermiques (enveloppe, fenestration, pont thermique, stratégies, etc.), et non au dimensionnement des systèmes mécaniques actifs de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA).

Par la suite, une comparaison est effectuée entre les prédictions de la méthode des éléments finis et celles de l'outil de calcul énergétique développé et d'un autre logiciel communément utilisé dans ce domaine, i.e. SIMEB (Simulation Énergétique des Bâtiments). Pour ce faire, des modèles d'éléments finis thermiques sont construits, soit une section détaillée d'un mur de briques et un bâtiment scolaire considéré dans son ensemble. L'outil de calcul développé est alors aussi appliqué à ces cas d'études. Une comparaison des résultats et une vérification des analyses sont menées. Ce travail illustre les avantages respectifs de l'outil de calcul développé CEEB, de la méthode des éléments finis et du logiciel SIMEB. Ainsi, CEEB permet d'appréhender plus facilement le comportement thermique global de différents bâtiments et de les comparer. La méthode des éléments finis permet, elle, une analyse détaillée des phénomènes thermiques survenant au sein de la structure ou d'un de ses éléments.

La dernière partie du mémoire présente un exemple d'application de l'outil de calcul énergétique développé. Différentes solutions de réhabilitation sont analysées afin d'améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment éducatif grâce à une conception durable et viable. L'étude se concentre notamment sur la toiture qui constitue un élément clé avec un fort potentiel pour l'intégration et la proposition de stratégies énergétiques, tel l'ajout d'une serre.

ABSTRACT

The context of climate change leads to an adaptation of the buildings of our society. In order to limit the consequences of a global warming of 1.5 ° C compared to the pre-industrial era, Canada, but also Quebec, and especially Montreal, are critical areas. In Canada, as in Quebec, the buildings sector is the third largest responsible for total federal and provincial GHG emissions. Space heating is by far the largest cause of energy consumption in commercial and institutional buildings. These buildings are still mostly heated by fossil fuels. Their heating demand is critical during the winter period. The public and institutional buildings sector presents serious shortcomings in terms of energy modernization, but these challenges reveal many opportunities. In fact, energy management in the commercial and institutional sector has the potential to show the highest rate of progress. Thus, thermal rehabilitation in buildings, especially institutional buildings, in cold climates such as Quebec, is a major issue in the fight against climate change.

This project aims to develop and apply a numerical tool, called CEEB (Calculations for the Energy Efficiency of Buildings), to evaluate in a simple, practical, modular and verifiable way the thermal behaviour of a building at the early stages of the design process. This tool enables civil engineering practitioners to propose sustainable and viable strategies to improve the energy efficiency of new or existing structures, particularly institutional buildings. The developed tool CEEB is aimed to be used in the preliminary design phases involving various types of expertise, i.e. architectural, structural, mechanical and electrical. CEEB can be used to facilitate decisions that may have a significant impact on the building's energy consumption and efficiency. Understanding the accessible program underlying CEEB allows users to better anticipate the energy performance of the building and to simulate customised and creative structural or architectural strategies, going beyond traditional designs. This tool focuses on passive physical phenomena of heat exchange (envelope, fenestration, thermal bridge, strategies, etc.), as opposed to designing active mechanical Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems.

A comparison is made between the predictions of the finite element method and the developed energy calculation tool, then with those of a commonly used software in this field, i.e. SIMEB (French abbreviation Simulation Énergétique des Bâtiments). For this purpose, thermal finite element models of a detailed section of a brick wall and a whole school building are constructed. The developed calculation tool is then applied to these case studies. The approaches and obtained

results are compared to illustrate the respective advantages of the developed calculation tool CEEB, the finite element method and the SIMEB software. CEEB is shown to facilitate the understanding of the overall thermal behaviour of different buildings by comparing them. The finite element method allows a detailed analysis of thermal phenomena occurring within the structure or one of its components.

The last part of the thesis presents an example of the application of the developed energy calculation tool. Different rehabilitation solutions are analyzed to improve the energy efficiency of an educational building through a sustainable and viable design. The study focuses on the roof, which constitutes a key element with great potential for the implementation and the proposal of energy efficiency strategies, such as the addition of a greenhouse.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XIII

LISTE DES FIGURES XVI

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XXI

LISTE DES ANNEXES XXIII

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Contexte 1

1.2 Problématique 3

1.3 Objectifs 5

1.4 Méthodologie et organisation du mémoire 6

1.5 Impact et importance socio-économique du projet 8

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 10

2.1 Lutte aux changements climatiques 10

2.1.1 Contexte mondial 10

2.1.2 Contexte canadien 12

2.1.3 Contexte québécois 15

2.1.4 Consommation énergétique des bâtiments au Québec 17

2.1.5 Bâtiments en milieu urbain 21

2.1.6 Agriculture urbaine 23

2.1.7 Synthèse de la lutte aux changements climatiques et actions visées par cette recherche 24

2.2 Stratégies gouvernementales pour les bâtiments d'éducation au Québec 25

2.3 Évaluation de l'efficacité énergétique de bâtiments 27

2.3.1 Méthodes d'analyse des programmes de simulation énergétique existants 27

2.3.2 Travaux et outils existants d'aide à la conception du bâtiment.....29

2.3.3 Outils existants de vérification de la consommation énergétique du bâtiment 30

2.3.4 Développement de l'outil de calcul énergétique 35

2.3.5 Principes de base pour les travaux écoénergétiques.....36

2.3.6 Ajout d'une serre sur toit : une piste prometteuse d'optimisation de la consommation d'énergie.....40

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL DE CALCUL ÉNERGÉTIQUE CEEB .. 43

3.1 Introduction et structure générale de l'outil de calcul énergétique 43

3.2 Obtention des données météorologiques du site du bâtiment 51

3.3 Rayonnement solaire impactant l'enveloppe du bâtiment 53

3.3.1 Angle du zénith et de l'azimut solaires 53

3.3.2 Rayonnement solaire réfléchi par le sol de l'environnement du bâtiment.....55

3.3.3 Rayonnements solaires direct, diffus et réfléchi impactant une paroi de l'enveloppe du bâtiment.....56

3.4 Flux thermique au travers des parois opaques 56

3.4.1 Bilan thermique à l'extérieur de la paroi : température sol-air 56

3.4.2 Conduction au sein d'une paroi opaque comportant des ponts thermiques 58

3.4.3 Effet de l'inertie thermique sur le flux total transmis par les parois opaques 61

3.5 Flux thermique au travers des parois transparentes 61

3.5.1 Distinction des différents flux thermiques 61

3.5.2 Rayonnement direct 62

3.5.3 Rayonnement diffus et réfléchi 63

3.5.4 Convection et conduction 63

3.6 Infiltrations d'air 63

3.7 Gains internes thermiques 67

3.7.1 Chaleurs sensible et latente des occupants 67

3.7.2 Équipements 68

3.8 Bilan thermique à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment 68

CHAPITRE 4 COMPARAISON ENTRE L'OUTIL, LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ET LE LOGICIEL SIMEB 73

4.1 Modélisation des transferts locaux au sein d'un mur de briques d'argile 73

4.1.1 Présentation du problème 73

4.1.2 Modèles préliminaires 75

4.1.3 Étude du problème complet et vérification des différentes méthodes 79

4.2 Modélisation des transferts globaux au travers de l'enveloppe d'un bâtiment 85

4.2.1 Bâtiment modélisé 85

4.2.2 Application de l'outil de calcul énergétique 87

4.2.3 Application de la MEF 90

4.2.4 Comparaison entre la MEF et l'outil de calcul énergétique 92

4.2.5 Comparaison du bâtiment avec le logiciel SIMEB 94

CHAPITRE 5 EXEMPLE D'APPLICATION DE L'OUTIL : CAS D'UN BÂTIMENT SCOLAIRE À RÉHABILITER 99

5.1 Présentation du cas d'étude 99

5.2 Géométrie du bâtiment et de la serre sur toit 100

5.3 Propriétés du bâtiment et de la serre 101

5.3.1 Parois opaques 101

5.3.2 Parois transparentes ou translucides 103

5.3.3 Gains internes thermiques : occupants et éclairage 106

5.3.4 Infiltrations d'air 108

5.4 Ventilation et température de consigne 109

5.5 Résultats 112

CHAPITRE 6 CONCLUSION, CONTRIBUTIONS ET TRAVAUX FUTURS 118

6.1 Synthèse du travail effectué 118

6.2 Contributions au domaine scientifique 119

6.3 Principales conclusions 120

6.4 Limitations actuelles et travaux futurs 121

RÉFÉRENCES 124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Consommation d'énergie du secteur commercial et institutionnel au Québec (Whitmore et Pineau, 2016) et au Canada (Ressources naturelles Canada, 2016b) en 2013. 19

Tableau 2.2. Intensité énergétique du secteur commercial et institutionnel au Québec et au Canada en 2005 (Ressources naturelles Canada, 2007). 20

Tableau 2.3. Revue de quelques outils et logiciels de calcul d'efficacité énergétique existants. .. 31

Tableau 3.1. Coefficients de fraction radiative et convective des flux thermiques, adapté de (ASHRAE, 2017). 70

Tableau 4.1. Comparaison des coefficients de transfert global Utotal obtenus par les équations mathématiques et par la méthode des éléments finis (MEF) pour les différents modèles préliminaires. 78

Tableau 4.2. Comparaison des coefficients de transfert global Utotal obtenus par Mijuca et al., par les deux types de modèles d'élément finis analysés avec ADINA (2020) et par les quatre configurations issues d'une combinaison des méthodes des surfaces isothermes ou non. 82

Tableau 4.3. Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment scolaire étudié. 87

Tableau 4.4. Propriété de la convection de l'air intérieur et extérieur. 87

Tableau 4.5. Températures externes de convection pour chaque paroi du bâtiment, selon que le rayonnement solaire est considéré ou non, pour une journée typique du mois de janvier. 88

Tableau 4.6. Températures externes de convection pour chaque paroi du bâtiment, selon que le rayonnement solaire est considéré ou non, pour une journée typique du mois de mai. 89

Tableau 4.7. Températures externes de convection pour chaque paroi du bâtiment, selon que le rayonnement solaire est considéré ou non, pour une journée typique du mois de septembre. 89

Tableau 4.8. Rayonnement (ou gain) solaire, lorsque celui-ci est considéré, perçu par les fenêtres du bâtiment, pour une journée typique du mois de janvier. 89

Tableau 4.9. Rayonnement (ou gain) solaire, lorsque celui-ci est considéré, perçu par les fenêtres du bâtiment, pour une journée typique du mois de mai. 90

Tableau 4.10. Rayonnement (ou gain) solaire, lorsque celui-ci est considéré, perçu par les fenêtres du bâtiment, pour une journée typique du mois de septembre. 90

Tableau 4.11. Comparaison du flux total maximal transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment au mois de mai et septembre déterminé au moyen de l'outil CEEB, de la MEF et de SIMEB. 97

Tableau 5.1. Dimensions du bâtiment éducationnel et de la serre sur toit types analysés. 101

Tableau 5.2. Propriétés des parois opaques du bâtiment et de la serre. 102

Tableau 5.3. Propriétés utilisées par l'outil concernant les parois transparentes ou translucides du bâtiment et de la serre. 104

Tableau 5.4. Gains internes thermiques liés aux occupants et à l'éclairage du bâtiment éducationnel pouvant inclure une serre sur le toit avec l'horaire correspondant. 107

Tableau 5.5. Paramètres utilisés pour calculer le débit d'infiltration Vinf au travers de l'enveloppe du bâtiment ou de la serre analysés dans cette étude. 109

Tableau 5.6. Température de consigne [°C] du bâtiment. 110

Tableau 5.7. Température de consigne [°C] de la serre. 111

Tableau 5.8. Charges de climatisation (i.e. flux de chaleur entrant) et charges de chauffages (i.e. flux de chaleur sortant) maximales obtenus pour chaque cas de bâtiment. 113

Tableau 5.9. Charges de climatisation (i.e. flux de chaleur entrant) et charges de chauffages (i.e. flux de chaleur sortant) maximales obtenus pour chaque cas de serre. 114

Tableau A.6.1. Caractéristiques des matériaux de surface de couverture de toiture les plus communes. 138

Tableau C.6.2. Normes et exigences de certification pour le taux de NLR_{75} des bâtiments commerciaux et institutionnels au Canada et aux États-Unis. 155

Tableau C.6.3. Résumé des données de NLR_{75} de bâtiments commerciaux et institutionnels au Canada et aux États-Unis provenant de différentes études. 156

Tableau C.6.4. Résumé des données de NLR_{75} de bâtiments d'éducation au Canada et aux États-Unis provenant de différentes études. 158

Tableau C.6.5. Exemples de solutions de réhabilitation pour limiter les fuites d'air d'un bâtiment. 165

Tableau C.6.6. Taux d'infiltration estimés pour les serres selon le type et l'année de construction adapté de (American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003). 168

Tableau C.6.7. Résumé des données de NLR_{75} des serres provenant de différentes études. 169

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Scénarios de limitation du réchauffement planétaire à 1,5°C (adapté du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019) : (a) variation de la température mondiale observée et réponses modélisées; (b) trajectoires à suivre des émissions mondiales nettes de CO_2; (c) émissions nettes cumulées de CO_2 correspondantes; et (d) trajectoires du forçage radiatif autre que celui dû au CO_2. 11

Figure 2.2. Évolution des émissions canadiennes de GES et des différents engagements gouvernementaux depuis les trois dernières décennies ainsi que ceux à venir (Bureau du vérificateur général du Canada, 2017). 13

Figure 2.3. Émissions de gaz à effet de serre au Canada : (a) par secteur économique; et (b) pour l'électricité adapté de (Environnement et Changement climatique Canada, 2019b). 14

Figure 2.4. Émissions de gaz à effet de serre par province et territoire au Canada en 1990, 2005 et 2017 (Environnement et Changement climatique Canada, 2019b).....15

Figure 2.5. Évolution de la consommation d'énergie dans le secteur commercial et institutionnel selon la source d'énergie et la surface de plancher au Canada entre 1990 et 2013 (Ressources naturelles Canada, 2016b). 18

Figure 2.6. Évolution des émissions globales de GES au Québec par secteurs entre 1990 et 2016 et l'engagement gouvernemental de réduction provinciale projetées pour 2030 adapté de (Pineau et al., 2019).....21

Figure 2.7. Projections climatiques de Montréal selon sept indicateurs pour un scénario futur à carbone élevé (Atlas climatique du Canada, 2019).....23

Figure 3.1. Échanges thermiques pris en compte par l'outil de calcul pour réaliser le bilan énergétique d'un bâtiment. 45

Figure 3.2. Grandes étapes organisationnelles de l'outil de calcul énergétique développé. 45

Figure 3.3. Organigramme illustrant les données d'entrées, leur rôle et leur intervention dans les analyses énergétiques réalisée par l'outil CEEB. 47

Figure 3.4. Organigramme de la méthode de calcul de l'outil énergétique basé sur la méthode du bilan d'énergie inspiré de (ASHRAE, 2017). 49

Figure 3.5. Rayonnement impactant une surface quelconque (Systèmes Electro-Energétiques, 2011).....52

Figure 3.6. Paramètres définissant la position du soleil par rapport à une surface inclinée (Kummert, communication personnelle, 2017). 55

Figure 3.7. Modes de transfert de chaleur à la surface extérieure d'une paroi (Kummert, communication personnelle, 2017). 58

Figure 3.8. Section de mur pouvant être adoptée au Québec : (a) avec simple ossature et ponts thermiques; et (b) avec double ossature sans pont thermique.....59

Figure 3.9. Résistance thermique de la section de mur de la Figure 3.8 : (a) méthode isotherme; et (b) méthode non-isotherme 60

Figure 3.10. Type d'infiltrations d'air dans un bâtiment en climat froid adapté de (RDH Building Engineering Ltd., 2013). 64

Figure 3.11. Profils de vitesse du vent exponentiels pour la station météorologique et pour le bâtiment (Kummert, communication personnelle, 2019).....65

Figure 4.1. Mur de brique étudié par (Mijuca et al., 2003) : (a) mur non homogène constitué de blocs d'agrégats légers en argile expansée rempli de polystyrène et portion analysée (hachures); et (b) détail d'un bloc d'argile.....74

Figure 4.2. Portion de mur de brique non homogène étudiée et composition des matériaux. 75

Figure 4.3. Géométrie et composition des quatre modèles préliminaires analysés avec ADINA (2020) : (a) configuration P1; (b) configuration P2; (c) configuration P3; et (d) configuration P4.....76

Figure 4.4. Schéma de la portion de mur analysée : (a) selon le plan (x,y); et (b) selon le plan (x,z). 80

Figure 4.5. Configurations analytiques issues de différentes combinaisons possibles des méthodes isotherme et non isotherme pour étudier la portion de mur hétérogène : (a) configuration C1; (b) configuration C2; (c) configuration C3; et (d) configuration C4. 81

Figure 4.6. Flux thermique selon l'axe y au sein de la portion de mur de brique non homogène obtenu avec le modèle à 36894 éléments (ADINA 2020) : (a) sans laine minérale; et (b) avec laine minérale. 84

Figure 4.7. Bâtiment scolaire étudié : (a) morphologie générale et composition des matériaux; et (b) géométrie détaillée utilisée au sein des modèles. 86

Figure 4.8. Principes généraux suivis pour modéliser les transferts thermiques de conduction, de convection et de radiation solaire à travers l'enveloppe du bâtiment. 91

Figure 4.9. Comparaison du flux total transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen de la MEF et de l'outil de calcul énergétique, sans rayonnement solaire. 92

Figure 4.10. Comparaison du flux total transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen de la MEF et de l'outil de calcul énergétique, avec rayonnement solaire. 94

Figure 4.11. Comparaison du flux total transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment au mois de janvier déterminé au moyen de l'outil CEEB, de la MEF et de SIMEB.....96

Figure 5.1 Géométrie du bâtiment éducationnel et de la serre sur toit types analysés.....100

Figure 5.2. Géométrie des fenêtres types et cadrage correspondants documentées par (ASHRAE, 2017).....104

Figure 5.3. Tissus de rideaux thermiques : (a) Classification; et (b) Propriétés du tissu (ASHRAE, 2017).....106

Figure 5.4. Charges de climatisation (en positif) ou de chauffage (en négatif) calculés par l'outil CEEB pour chaque heure d'une journée typique de chaque mois de l'année pour le Cas B1. 115

Figure 5.5. Flux thermiques par heure calculés par l'outil CEEB pour le Cas B1 pour une journée typique du mois de janvier. 115

Figure 5.6. Flux thermiques par heure calculés par l'outil CEEB pour le Cas B1 pour une journée typique du mois d'août.....116

Figure 5.7. Évolution du flux de chaleur total échangé au travers de l'enveloppe du bâtiment pour chaque heure d'une journée typique de chaque mois de l'année pour le Cas B1. 117

Figure A.6.1 Profil thermique caractéristique d'un îlot de chaleur urbain (Anquez & Herlem, 2011). 134

Figure B.6.2 Serre d'Ahuntsic. (Fermes Lufa, 2020).....139

Figure B.6.3 Serre de Laval. (Fermes Lufa, 2020). 140

Figure B.6.4 Serre d'Anjou. (Fermes Lufa, 2020). 140

Figure B.6.5 La première serre commerciale sur toit au monde : serre sur bâtiment industriel du quartier d'Ahuntsic-Cartierville. 142

Figure B.6.6 Système de culture hydroponique verticale dans la zone chaude pour les légumes fruits : (a) Vue 1; (b) Vue 2; (c) Vue 3.....144

Figure B.6.7 Système de culture hydroponique horizontal dans la zone froide pour les légumes feuilles. 145

Figure B.6.8 Système de refroidissement par évaporation appelé *cooling pad.* 146

Figure B.6.9 The Concordia Greenhouse. (Greenhouse, 2019). 147

Figure B.6.10 Manhattan school for children greenhouse. (Freisinger, 2015). 149

Figure B.6.11 The Greenhouse Project. (Architects, 2010) : (a) Plan en élévation; (b) Salle de classe. 149

Figure C.6.12. Taux de fuite d'air globaux des écoles, adapté de (Architects, 2010; Shaw & Jones, 1979) : (a) sans et (b) avec un système de traitement de l'air en fonctionnement.....164

Figure D.6.13 Type de construction selon la masse thermique dans la paroi et selon la présence d'ameublement, tiré de (ASHRAE, 2017). 172

Figure D.6.14 Conditions de design pour Montréal, station météorologique de McTavish, tiré de (ASHRAE, 2017). 173

Figure D.6.15 Légende pour les conditions de design, tiré de (ASHRAE, 2017). 174

Figure E.6.16 Catégorie de terrain pour la conversion de la vitesse du vent aux conditions locales du calcul de l'infiltration (ASHRAE, 2017). 175

Figure E.6.17 Caractérisation des coefficients C_s et C_w du calcul de l'infiltration (ASHRAE, 2017). 176

Figure E.6.18 Détermination du paramètre $ELA4$ par simulation d'essai d'infiltrométrie au moyen du logiciel (Residential Energy Dynamics, 2016) pour : (a) et (b) les cas de bâtiment B1 et B2; et (c) et (d) les cas de serre S1 et S2. 177

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BLAST : *Building Load Analysis and System Thermodynamics*

CEEB : Calculs pour l'Efficacité Énergétique des Bâtiments (*Calculations for the Energy Efficiency of Buildings)*

C_s : Coefficient d'effet de cheminée

C_w : Coefficient d'effet du vent

CCNUCC : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

CNBC : Code National du Bâtiment du Canada

CNCBA : Code National de Construction des Bâtiments Agricoles

COP 21 : 21e Conférence des Parties

COP 22 : 22e Conférence des Parties

CO_2 : Dioxyde de carbone

CSE : Conseil Supérieur de l'Éducation

CTS : *Conduction Time Series Factors*

CVAC : Chauffage, Ventilation et Climatisation

CWEC : *Canadian Weather for Energy Calculation*

CWEEDS : *Canadian Weather for Energy Engineering Data Sets*

DOE-2 : *Department Of Energy*

EER : taux de rendement énergétique (*Energy Efficiency Ratio*)

ELA_4 : Air d'infiltration effective à 4 Pa (*Effective Leakage Area)*

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

HBM : Méthode du bilan d'énergie (*Heat Balance Method*)

IAC : *Indoor Attenuation Coefficient*

IET : Institut de l'Énergie Trottier

LPD : *Lighting Power Density*

MEF : Méthode des Éléments Finis

Mt éq. CO_2 : mégatonnes équivalent de dioxyde de carbone

NLR_{50} : Taux de fuite normalisé à une pression différentielle de 50 Pa par mètre carré (*Normalized Leakage Rate at a pressure differential of 50 Pa*)

NLR_{75} : Taux de fuite normalisé à une pression différentielle de 75 Pa (*Normalized Leakage Rate at a pressure differential of 75 Pa*)

OCDE : Organisation pour la Coopération et le Développement Économique

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'environnement

RTF : *Radiant Time Factor*

RTSM : Méthode des séries temporelles radiantes (*Radiant Time Series Method*)

SHGC : *Solar Heat Gain Coefficient*

STIM : Sciences, de la Technologie, de l'Ingénierie et des Mathématiques

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Revue de littérature complémentaire sur les îlots de chaleur en milieu urbain 134

Annexe B Revue de littérature complémentaire sur les précédents exemplaires de serres sur toit 139

Annexe C Revue de littérature complémentaire sur la modélisation thermique de phénomènes spécifiques 151

Annexe D Tableaux ASHRAE utilisés pour l'outil de calcul développé 172

Annexe E Paramètres liés à l'infiltration pour l'outil de calcul développé 175

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La crise énergétique et le réchauffement ensuivi au cours du XXe siècle ont engendré une prise de conscience face à la finitude des ressources planétaires. Le changement climatique actuel est considéré comme l'un des plus grands défis face à la communauté mondiale. Il est sans équivoque et est causé par les activités humaines. Les prédictions du climat démontrent que les gaz à effet de serre (GES) passés, présents et futurs influencent le climat pendant des décennies (Armstrong, 2018). Afin de stabiliser le climat, il est nécessaire que les émissions anthropiques de GES s'abaissent à un niveau net zéro. Ceci doit s'effectuer en changeant les façons de faire et modes de pensée qui en ont été la cause, en repensant la relation entre la nature et l'humain, dont l'empreinte sur la Terre passe principalement par la construction et l'extraction de ressources pour la production de matériaux ou d'énergie. L'atteinte de la carboneutralité mondiale d'ici 2050 est donc notre engagement mondial dont la mise en œuvre est nécessaire dès aujourd'hui (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019).

À ce stade, le climat passé ne peut être supposé représentatif des conditions futures dans lesquelles les constructions existantes et nouvelles devront évoluer. Les praticiens du bâtiment ont donc une responsabilité à jouer afin de lutter contre les changements climatiques. Ils doivent aussi s'adapter aux risques liés aux événements extrêmes résultant des changements climatiques lors de la conception et la réhabilitation de bâtiments. Cependant, cette démarche requiert une base d'information pertinente ainsi que des outils pour faciliter sa mise en œuvre (Lacasse, 2019).

Les changements climatiques se traduisent par des répercussions diverses et complexes. Par exemple, le réchauffement planétaire n'est pas uniforme. Les augmentations observées et projetées de la température moyenne au Canada sont environ le double des moyennes mondiales correspondantes tandis que l'Arctique se réchauffe encore plus rapidement, et ce, peu importe le scénario d'émissions envisagé. Les températures moyennes annuelles et saisonnières au Canada ont augmenté, les phases de réchauffement les plus importantes se produisant en hiver. Entre 1948 et 2016, l'augmentation de la température moyenne annuelle est estimée être de 1,7°C pour le Canada dans son ensemble et de 2,3°C pour le Nord du Canada (Environnement et changement climatique Canada, 2019d).

La construction basée sur le développement durable implique des solutions et des pratiques complexes, différentes selon l'emplacement terrestre. Au Canada, les bâtiments ne sont pas adaptés à cette nouvelle réalité, d'autant plus que de nombreuses villes présentent des constructions vieillissantes. Les bâtiments durables, bien qu'en demande grandissante, représentent encore une faible part du parc immobilier du pays. Des efforts supplémentaires doivent être déployés en phase préliminaire de conception afin de mieux cibler et intégrer les diverses stratégies passives et actives. Les paramètres à considérer interagissant entre eux sont abondants : les conditions climatiques du lieu telles que la température, l'humidité, le rayonnement solaire, le vent; l'orientation et la disposition du bâtiment; la forme du bâtiment; les matériaux, leur masse et leur propriétés isolantes; les dimensions, l'emplacement et l'ombrage des fenêtres; les propriétés thermiques du vitrage; ainsi que les méthodes de CVAC (chauffage, ventilation climatisation) passives et actives (Gusta, Strausa, & Gross, 2017).

Explorer continuellement les moyens d'assurer le développement durable des bâtiments est fondamental. Allier conception des structures canadiennes et développement durable devient désormais une nécessité avec l'influence croissante des changements climatiques. Plusieurs organismes, dont la Fondation canadienne David Suzuki ou l'Institut montréalaise de l'Énergie Trottier (IET), se sont penché sur une des contributions importantes à l'émission des GES, soit l'énergie dans les bâtiments. « Au Canada, plus de 50% de l'électricité est consacrée aux bâtiments et la majeure partie de cette énergie est dévolue au chauffage et à la climatisation » (Institut de l'Énergie Trottier, 2015). « Le chauffage, la climatisation, et la production de vapeur et d'eau chaude représentent 34% des émissions de GES globales au Québec » (Fondation David Suzuki, 2013). Il est alors primordial de considérer l'impact du cycle de vie des constructions, d'optimiser l'efficacité énergétique et de prioriser les sources d'énergie renouvelables dans le secteur résidentiel, commercial ou institutionnel afin d'infléchir les émissions de GES.

Sous base d'observations et de constats de l'industrie, cette démarche essentielle peut être facilitée en disposant d'outils à la fois rigoureux, fiables, efficaces et précis, mais surtout simples d'utilisation en phase embryonnaire de projet. De tels outils permettent alors de cibler et d'optimiser les interventions prioritaires à mettre en place au sein des bâtiments existants ou en cours de conception (Zhao & Magoulès, 2012).

1.2 Problématique

Un des plus grands défis à relever face aux changements climatiques est l'adaptation de nos modes de vie et de nos constructions actuelles vers une transition durable. La consommation d'énergie des bâtiments et des habitations représente 35 % des émissions de gaz à effet de serre de la Ville de Montréal (Defeijt, 2008). Cette consommation se traduit principalement par les systèmes de chauffage à l'intérieur des bâtiments et des habitations, mais elle est aussi, dans une moindre part, causée par l'utilisation des appareils électroménagers, bureautiques, les lampes ainsi que les systèmes de climatisation (Giguère, 2009).

Une étude publiée par Ouranos s'intéressant aux impacts des changements climatiques sur la demande en énergie (Lafrance & al., 2016) ressort des constats généraux pertinents. Le réchauffement des températures aurait principalement deux effets directs et opposés sur la demande d'énergie : (i) des besoins de chauffage moindres en hiver; et (ii) des besoins de climatisation accrus en été. La demande de chauffage pour l'électricité diminuerait par rapport à la demande scénarisée sans changements climatiques. Cette diminution ne serait que partiellement compensée par l'augmentation de l'électricité par la climatisation. En ce qui concerne la demande pour les combustibles, les changements climatiques viendraient accentuer les baisses prévues pour ces formes d'énergies. Le chauffage par combustibles continuera d'être substitué par le chauffage électrique. En raison de ces effets combinés, il y aura une augmentation de la demande d'électricité, mais qui sera, d'ici 2030, deux fois moins prononcée que la diminution de la demande des combustibles. Cet impact plus marqué sur les combustibles est positif puisque les GES seront réduits à ce niveau. Toutefois, l'ensemble des partenaires du milieu du bâtiment sera appelé à contribuer au moyen de divers axes présentés à la suite afin de minimiser le coût supplémentaire que les changements climatiques imposeront à la société québécoise, notamment par la climatisation (Lafrance & al., 2016).

Les méthodes actuelles d'évaluation énergétique des bâtiments reposent sur des logiciels adaptés et disponibles dans différents contextes et régions du monde, par exemple ceux présentés à la section 2.3.3 (Hydro-Québec, 2018; National Renewable Energy Laboratory, 2020; Ressources naturelles Canada, 2017; Tuominen & al., 2014; U.S. Department of Energy's (DOE), Building Technologies Office (BTO), & National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019). Toutefois, les normes et méthodes de calculs utilisés par ces logiciels ne sont pas nécessairement accessibles

à l'utilisateur. En effet, la modélisation énergétique des bâtiments, dans un contexte urbain, est basée sur des archétypes prédéfinis dépendants de l'âge du bâtiment, des propriétés géométriques, du type de système de chauffage et du climat. De plus, dans l'industrie, les solutions novatrices et sur mesure sont de plus en plus nécessaires pour s'adapter aux problématiques variées des changements climatiques selon chaque contexte géographique ou même social. L'utilisation des méthodes et outil de calcul actuels, plutôt conventionnels ou plus conservateurs ne permettent donc pas aux ingénieurs praticiens de prendre en compte, de quantifier et de vérifier les réels gains des nouvelles stratégies. Ainsi, dans le cas d'évaluations pratiques de l'efficacité énergétique de bâtiments, il est souvent difficile pour les utilisateurs ingénieurs praticiens en génie civil :

- de vérifier les calculs des transferts thermiques (Cerezo, Sokol, Reinhart, & Al-mumin, 2015);
- de définir aisément les éléments de la structure, l'enveloppe et l'épaisseur des divers constituants (Papadopoulos, Bonczak, & Kontokosta, 2017);
- de modéliser des techniques de réhabilitation thermiques sur mesure et innovantes allant au-delà des méthodes de conception traditionnelles (Filogamo, Peri, Rizzo, & Giaccone, 2014).

Par ailleurs, la méthode des éléments finis, dont l'algorithmie est maintenant bien connue, peut aussi être employée afin de modéliser des processus de transfert thermique. Cette méthode a ainsi déjà prouvé son efficacité pour réaliser des conceptions thermiques optimales et peu coûteuses (Hellen, 2002). Cependant l'emploi de cette méthode peut s'avérer complexe pour les ingénieurs praticiens. Elle peut toutefois être utilisée pour développer et vérifier de nouveaux outils pratiques pour l'analyse de l'efficacité énergétique des constructions par le biais de modélisations thermiques d'assemblages.

De plus, il est légitime de s'interroger sur le choix des interventions pouvant améliorer le plus efficacement la consommation d'énergie des bâtiments canadiens. Dans ce contexte, la toiture est un élément clé avec un fort potentiel, car elle est associée à plusieurs problématiques à la fois. Il s'agit d'un point chaud en termes de déperditions thermiques et donc d'opportunité de travaux écoénergétiques. Le toit joue un rôle important en milieu urbain. D'abord, le toit, constitué dans la majorité des cas par une large surface non réfléchissante de couleur foncée, absorbe et stocke l'énergie solaire. Ainsi, il participe grandement aux îlots de chaleur, ces zones métropolitaines dont

la température est significativement plus élevée que celle des zones rurales environnantes. Ensuite, il permet de maximiser l'espace urbain restreint en offrant un milieu de vie supplémentaire ainsi qu'une production agricole locale. En effet, les toits peuvent être transformés de manière synergique en y construisant des serres. Cette technique permet alors de récupérer les déperditions thermiques, d'obtenir une isolation supplémentaire pour le bâtiment d'accueil, et de réduire les îlots de chaleur, le tout en fournissant un environnement additionnel, productif, éducatif, favorable sur le plan de l'apport de lumière naturelle, de la qualité de l'air intérieur et de l'utilisation de systèmes minimisant l'émission de GES (Gouvernement du Québec, 2018b). Cette solution, très ambitieuse écologiquement et pédagogiquement, comporte toutefois son lot de défis allant des contraintes économiques à celles structurales, en passant par la gestion des systèmes de déshumidification et par la bonne gestion de l'intensité solaire.

Ainsi, ce mémoire cherche à répondre aux problématiques suivantes :

- Comment les ingénieurs praticiens du génie civil peuvent-ils évaluer, de manière simple, modulable et vérifiable, la charge thermique d'un bâtiment au Québec?
- Quelles stratégies durables et viables peut-on proposer pour améliorer le rendement énergétique d'un bâtiment institutionnel existant?

1.3 Objectifs

Ce projet de recherche a trois objectifs principaux :

(i) développer un outil de calcul énergétique adapté au génie civil, pratique d'utilisation, et permettant d'évaluer efficacement la performance énergétique d'un bâtiment au Québec;

(ii) comparer les prédictions de l'outil de calcul énergétique avec celles obtenues de simulations de modèles d'éléments finis et grâce à un logiciel de calcul énergétique communément utilisé dans ce domaine;

(iii) illustrer le potentiel de l'outil de calcul énergétique, entre autres, par l'étude de cas de serres sur toit.

Bien que le calcul énergétique des bâtiments soit généralement du domaine du génie mécanique, l'objectif de ce mémoire est de l'adapter pour qu'il puisse être appliqué par des praticiens du génie civil. L'objectif de l'outil de calcul développé dans le cadre de ce mémoire, désigné dans ce qui

suit par CEEB (Calculs pour l'Efficacité Énergétique des Bâtiments), n'est pas de remplacer les outils de calculs énergétiques existants, qui sont déjà bien établis en terme de mécanique du bâtiment et optimisés depuis plusieurs dernières décennies. Un des critères ici est que l'outil développé soit facile à utiliser, transparent, i.e. le contraire d'une 'boîte noire' en donnant accès à l'utilisateur aux formulations programmées, ergonomique et modulable en termes de composantes et de phénomènes physiques thermiques passifs simulés (enveloppe, fenestration, pont thermique, stratégies, etc.). Les systèmes thermiques actifs (mécaniques) ne sont pas pris en compte par l'outil développé. Ainsi, CEEB est utile au tout début de la conception thermique préliminaire d'un bâtiment. Il permet d'analyser les phénomènes thermiques pouvant se produire dans un bâtiment, puis d'étudier des stratégies structurales ou architecturales créatives permettant de diminuer les charges de climatisation ou de chauffage. Bien qu'incomplète, cette première étape de l'analyse énergétique des charges et du choix des interventions devient un travail nécessaire pour la réalisation d'un outil performant. Une étape future serait alors de dimensionner et de conceptualiser les systèmes mécaniques CVCA (climatisation, ventilation, chauffage) requis à l'aide des programmes existants.

À l'issue de ce mémoire, des recommandations sont fournies quant à l'applicabilité de l'outil énergétique à des constructions existantes ou en cours de conception. De plus, des observations sont réalisées pendant les explorations à partir de cet outil sur les aspects suivants :

- les paramètres dont la considération est essentielle dans un processus d'évaluation de l'efficacité énergétique;
- les limites des modèles d'éléments finis et de l'outil de calcul énergétique;
- l'ajout de serres sur les toits comme solution pour améliorer l'efficacité énergétique de bâtiments institutionnels.

1.4 Méthodologie et organisation du mémoire

Afin de répondre aux problématiques et aux objectifs explicités précédemment, la méthodologie de ce mémoire se découpe en quatre segments correspondant chacun à un chapitre.

Dans un premier temps, au Chapitre 2, une revue de littérature est menée concernant le contexte des changements climatiques et la nécessité d'actions, en se focalisant sur le contexte énergétique québécois, et les stratégies gouvernementales correspondantes concernant la modernisation et la

construction des infrastructures publiques, notamment les bâtiments d'éducation. La revue de littérature permet, ensuite, d'identifier les limites des outils d'analyse d'efficacité énergétique existants. Ce travail permet de poser les critères de développement de l'outil présenté ci-après. En outre, il permet d'illustrer des pistes de solution de réhabilitation énergétique, notamment l'ajout d'une serre sur le toit d'un bâtiment existant.

Dans un deuxième temps, au Chapitre 3, un outil de calcul énergétique, CEEB, est développé pour les bâtiments existants ou nouveaux. Cet outil peut être utilisé au Québec comme ailleurs. Cet outil et sa formulation mathématique se veulent accessibles, facilement modifiables et adaptables à des stratégies et des contextes thermiques divers. Cet outil permet d'intégrer facilement, pour un bâtiment donné : ses caractéristiques géométriques (orientation, dimensions); ses données météorologiques traités (température, vent, rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi); ses caractéristiques thermiques liées à l'enveloppe (constituants, épaisseurs) et à l'occupation (température de consigne, horaire, gains internes). De plus, il permet la considération et le contrôle de paramètres ayant un impact important sur l'efficacité énergétique, soit les ponts thermiques, les écrans thermiques sur les surfaces vitrées et le phénomène d'infiltration. CEEB calcule la charge thermique de différents scénarios afin d'analyser leur efficacité et la décortique selon chaque type de flux thermique. Son intérêt ne concerne pas la conception de systèmes mécaniques actifs CVCA.

Dans un troisième temps, au Chapitre 4, une comparaison est effectuée entre l'outil de calcul énergétique développé, la méthode des éléments finis et le logiciel SIMEB. Pour ce faire, des modèles d'éléments finis thermiques sont construits : une section de mur de briques détaillée et un bâtiment scolaire considéré dans son ensemble. L'outil de calcul développé est alors aussi appliqué à ces cas d'études, permettant ainsi une comparaison des résultats et une vérification des analyses menées. Celles-ci permettent alors d'analyser en détail le phénomène de transfert thermique au travers de ponts thermiques ou, à plus grande échelle, de différentes zones thermiques constituant l'enveloppe du bâtiment. À titre de comparaison supplémentaire, le logiciel SIMEB est aussi utilisé pour modéliser le bâtiment scolaire considéré dans son ensemble.

Enfin, au Chapitre 5, un exemple d'application de l'outil de calcul énergétique développé est présenté. Différentes solutions de réhabilitation sont analysées afin d'améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment éducatif grâce à une conception durable et viable. L'étude se concentre

notamment sur la toiture qui constitue un fort potentiel pour l'intégration et la proposition de stratégies énergétiques, tel l'ajout d'une serre.

Finalement, le Chapitre 6 fait la synthèse du travail effectué, permet d'exposer les contributions au domaine scientifique, fait l'état des différentes conclusions de ce travail de recherche et définit ses principales limitations qui peuvent baser d'éventuels travaux futurs.

L'organisation des chapitres de ce mémoire est donc la suivante :

- Chapitre 1 - Introduction.
- Chapitre 2 - Revue de littérature.
- Chapitre 3 - Développement de l'outil de calcul CEEB.
- Chapitre 4 - Comparaison entre l'outil, la méthode des éléments finis et le logiciel SIMEB.
- Chapitre 5 - Exemple d'application de l'outil : cas d'un bâtiment scolaire à réhabiliter.
- Chapitre 6 - Conclusion, contributions et travaux futurs.

1.5 Impact et importance socio-économique du projet

La recherche en structures durables requiert encore de nombreux développements. Pourtant, la construction et l'exploitation de bâtiments sont encore responsables d'une empreinte écologique considérable. Dans le contexte des changements climatiques, l'outil de calcul énergétique CEEB proposé par ce projet vise à avoir un impact positif sur l'enjeu des bâtiments durables. Ainsi, cet outil pourrait permettre aux ingénieurs praticiens en génie civil de mieux cibler, en début de conception, les travaux de réhabilitation requis en accélérant l'évaluation de l'efficacité énergétique des bâtiments. Il permet d'étudier l'impact de stratégies de nature structurales ou architecturales sur mesure, pouvant être créatives, sur la charge thermique du bâtiment. Les programmes existants de génie mécanique pourraient être utilisés en vue de dimensionner les systèmes CVCA correspondants durant des phases plus avancées de conception. La comparaison de l'outil développé avec des modèles d'éléments finis, ainsi qu'avec un logiciel existant, permet alors d'identifier les limitations et de mieux comprendre les phénomènes physiques impliqués dans différents systèmes de construction à petite échelle (ponts thermiques) comme à grande échelle (bâtiment scolaire simple). Enfin, l'outil développé pourrait permettre aux ingénieurs de proposer et de promouvoir des solutions d'amélioration éco-durables de milieux de vie. Ainsi, la pertinence

du concept d'ajout de serre sur toit passive ou active est analysée, au sein de ce mémoire, au regard des résultats obtenus grâce à l'outil. Bien que cette solution requière des considérations structurales, économiques et réglementaires spécifiques, elle peut s'avérer fort intéressante, notamment en étant combinée à l'utilisation de matériaux recyclés ou naturels et aux principes du « low-tech ». En outre, l'outil développé utilisé en phase embryonnaire de projet peut entrainer, indirectement, une baisse des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie des bâtiments institutionnels.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Lutte aux changements climatiques

2.1.1 Contexte mondial

Un accord historique a uni plus de 195 pays rejetant 97% des émissions mondiales de GES afin d'accélérer et d'intensifier les actions et les investissements dans la lutte contre les changements climatiques pour un avenir durable : l'Accord de Paris. Celui-ci a eu lieu lors de la 21e Conférence des Parties (COP 21) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), à Paris, en 2015. L'objectif central est de limiter la hausse de la température mondiale par rapport aux niveaux pré-industriels à un niveau bien inférieur à 2°C et à plafonner l'augmentation à 1,5°C. Ainsi, le Canada s'est engagé à réduire de 30% d'ici 2030 ses émissions de GES par rapport aux niveaux de 2005 (Environnement et changement climatique Canada, 2016).

Suite à la COP 21, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été commandé d'estimer les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C ou de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle. Créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement, le GIEC est l'organe des Nations Unies chargé d'évaluer les travaux scientifiques consacrés aux changements climatiques afin d'offrir aux décideurs politiques des évaluations régulières du fondement scientifique de l'évolution du climat, des incidences et des risques associés et des possibilités d'adaptation et d'atténuation (GIEC, 2017). Le groupe soutient que les conséquences d'un réchauffement de 1,5°C seront dramatiques et que celles d'un réchauffement de 2°C pourraient être bien pires (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019).

La Figure 2.1 démontre que les émissions cumulées de CO_2 (dioxyde de carbone) et l'évolution future du forçage radiatif autre que celui dû au CO_2 (dû au méthane, au protoxyde d'azote, aux aérosols et aux autres facteurs de forçage anthropiques) sont les facteurs déterminant la probabilité de limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019). La Figure 2.1 permet aussi de constater qu'une réduction immédiate plus rapide des émissions de CO_2 limitera les émissions nettes cumulées de CO_2, puis que ces dernières, associées au forçage radiatif net autre que celui dû au CO_2, ont le pouvoir de modifier la température mondiale. La projection du réchauffement anthropique indique, qu'au rythme actuel,

le réchauffement atteindra 1,5°C entre 2030 et 2050 et se poursuivra dans la seconde moitié du siècle. Trois scénarios de projection sont analysés à la Figure 2.1 au moyen d'un modèle climatique simple (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019).

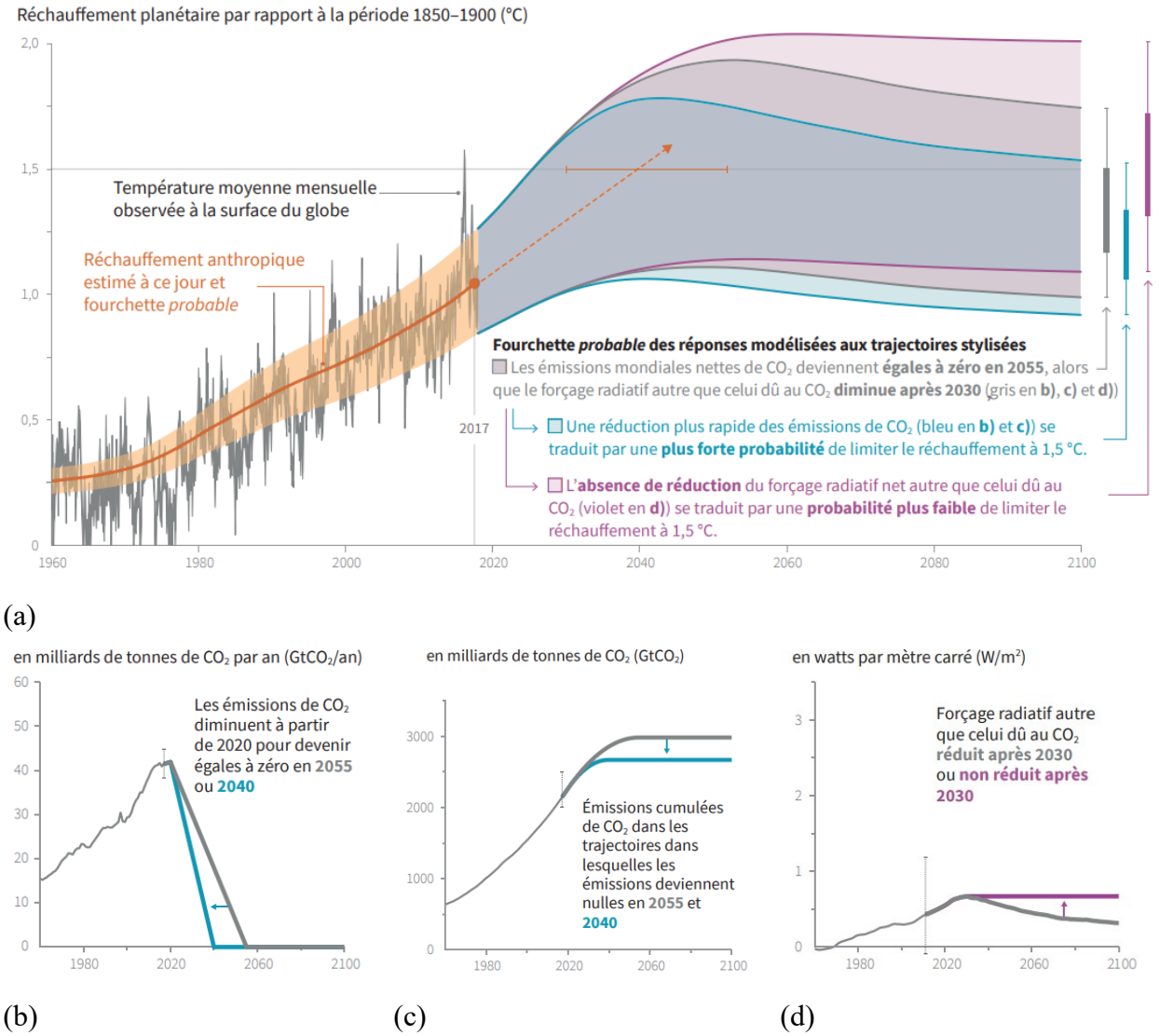


Figure 2.1. Scénarios de limitation du réchauffement planétaire à 1,5°C (adapté du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2019) : (a) variation de la température mondiale observée et réponses modélisées; (b) trajectoires à suivre des émissions mondiales nettes de CO_2; (c) émissions nettes cumulées de CO_2 correspondantes; et (d) trajectoires du forçage radiatif autre que celui dû au CO_2.

À partir des analyses issues du rapport du GIEC, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) avance que des réductions d'émissions de GES de l'ordre de 70 à 95%

sous les niveaux de 2010 devraient être réalisées d'ici 2050 afin de rester sur une voie permettant de maintenir à plus de 50 % les chances de limiter l'augmentation moyenne de la température planétaire à 1,5°C (Environnement et changement climatique Canada, 2016). Pour faire suite à ce constat, lors de la 22e Conférence des Parties (COP 22) de la CCNUCC, à Marrakech, en 2016, et dans le cadre de sa Stratégie pour le milieu du siècle, le Canada s'est donné l'ambition de réduire ses émissions nettes de GES de 80% d'ici 2050 également par rapport aux niveaux de 2005 (Gouvernement du Canada, 2016b).

2.1.2 Contexte canadien

D'après le récent rapport de la commissaire à l'environnement et au développement durable, malgré les conséquences tangibles des changements climatiques au Canada avec, entre autres, des phénomènes météorologiques extrêmes ayant de fortes probabilités de se reproduire, et des engagements de réduction des GES, les efforts du gouvernement n'ont pas porté fruit (Bureau du vérificateur général du Canada, 2017). La Figure 2.2 illustre que les émissions globales de GES du Canada entre 1990 et 2015 n'ont pas atteint les cibles de réduction fédérales et les émissions projetées et estimées du Canada ne sont pas en voie d'atteindre les cibles fixées pour 2020 et 2030 (Bureau du vérificateur général du Canada, 2017).

En effet, le Canada devra atteindre des émissions de l'ordre de 523 mégatonnes équivalent de dioxyde de carbone (Mt éq. CO_2) en 2030 en vertu de son engagement de réduction des GES de 30 % par rapport à leur niveau de 2005 aux termes de l'Accord de Paris tel qu'établi par les premiers ministres du Canada dans la Déclaration de Vancouver sur la croissance propre et les changements climatiques.

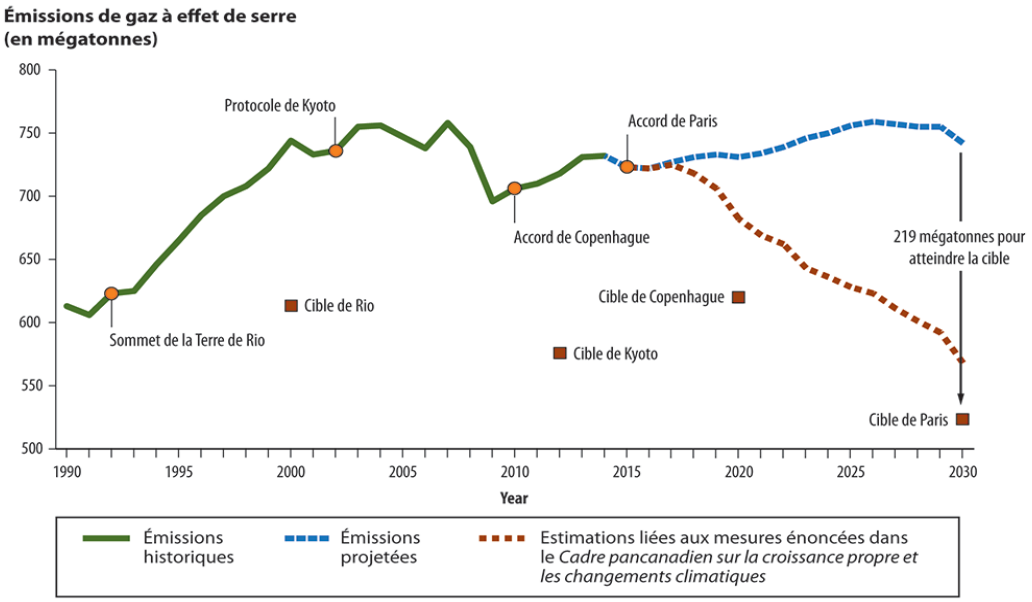


Figure 2.2. Évolution des émissions canadiennes de GES et des différents engagements gouvernementaux depuis les trois dernières décennies ainsi que ceux à venir (Bureau du vérificateur général du Canada, 2017).

La Figure 2.3 illustre le portrait de la situation actuelle selon les secteurs économiques. Au Canada, le secteur des bâtiments est le troisième plus grand responsable des émissions de GES, en 2017, avec 85 Mt éq. CO_2 et 12 % des émissions, soit après les secteurs du pétrole et gaz, puis du transport. Ensuite, le secteur de l'électricité est en quatrième place avec 74 Mt éq. CO_2 et 10 % des émissions (Environnement et changement climatique Canada, 2019c). Toujours dans le secteur de l'électricité, entre 1990 et 2017, on observe une baisse des émissions de GES provenant de la production d'électricité de 21 % malgré une intensification de la demande 34% (Environnement et changement climatique Canada, 2019a). Bien qu'il ne représente que 9 % de la production totale d'électricité, le charbon est responsable de 77 % des émissions de GES liées à l'électricité en 2017 (Environnement et changement climatique Canada, 2019c).

Dans le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques, des mesures touchant entre autres l'électricité, les bâtiments et les infrastructures vertes sont énoncées nécessaires. Dans le secteur des bâtiments, selon les projections, les émissions de GES (provenant de la combustion des carburants fossiles et des fuites des systèmes de climatisation) augmenteront légèrement d'ici 2030, sauf si des changements sont mis en place. Dans cette optique de changements nécessaires, le cadre vise une économie à faibles émissions de carbone et axée sur la

croissance propre. La clé pour y parvenir relève de bâtiments intelligents et de communautés intégrées et impliquées de façon durables. Ces environnements bâtis devront être très efficaces sur le plan énergétique, s'appuyant sur la production d'électricité propre et d'énergie renouvelable. De surcroît, l'efficacité énergétique permet de réduire les émissions de GES, et contribue à rendre les habitations et les bâtiments plus confortables et plus abordables en réduisant les factures d'énergie, tout en favorisant l'innovation et la création d'emplois propres. Le Conseil du bâtiment durable du Canada en concertation avec la plupart des architectes et des propriétaires de bâtiments durables, soutiennent, avec données à l'appui, que la réhabilitation thermique des bâtiments commerciaux et institutionnels est profitable en moins de dix ans (Gouvernement du Canada, 2016a).

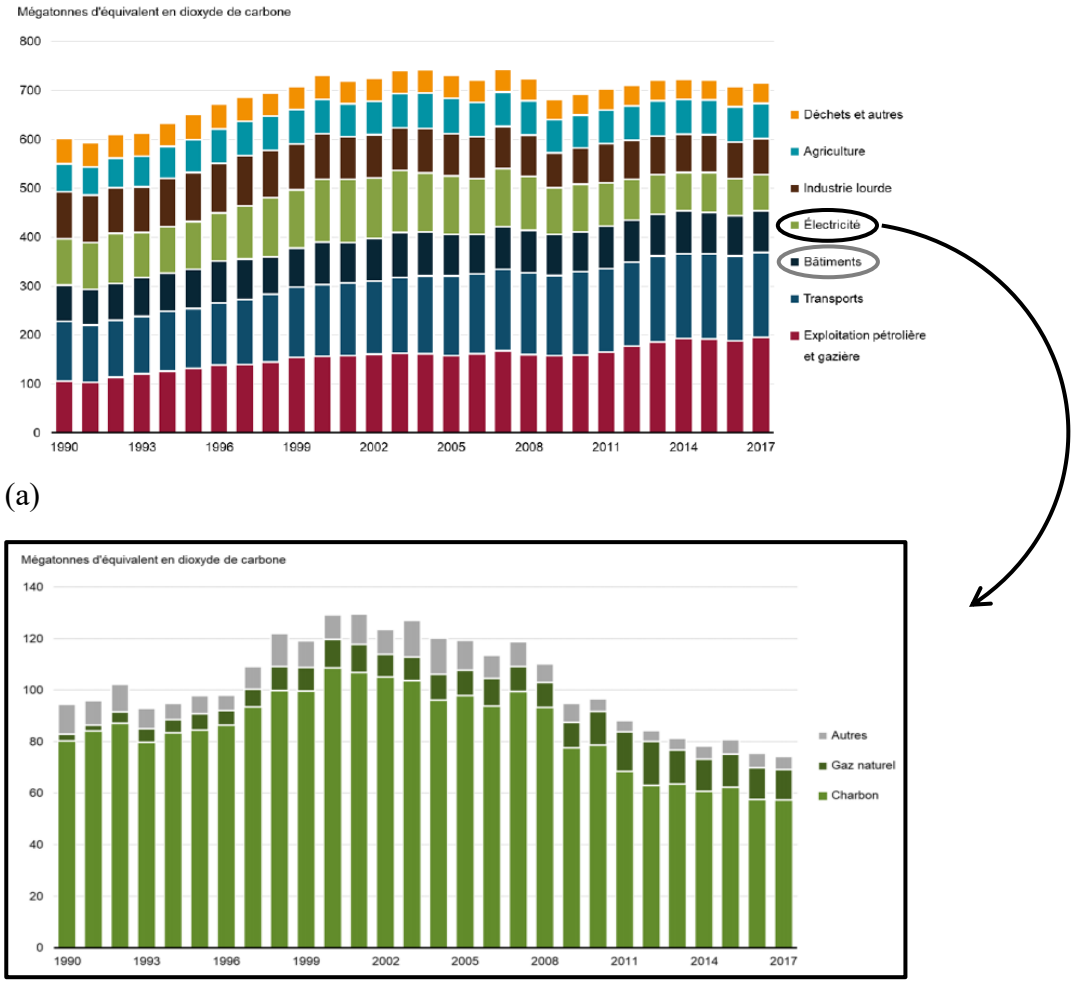


Figure 2.3. Émissions de gaz à effet de serre au Canada : (a) par secteur économique; et (b) pour l'électricité adapté de (Environnement et Changement climatique Canada, 2019b).

À la lumière de ces constats, on peut conclure que les efforts de réduction de GES devront être orientés à la source vers une diminution de la demande d'électricité en modifiant les modes de consommation d'énergie et en optimisant l'efficacité énergétique. Ces mesures sont non seulement nécessaires lors de la conception de nouveaux bâtiments, mais elles sont d'autant plus primordiales d'être mise en place dans les bâtiments existants par des rénovations adéquates minimisant l'impact de leur consommation d'énergie fossiles et donc de leurs émissions de GES.

La Figure 2.4 présente le niveau d'émissions de GES en fonction des provinces et territoires canadiens. En 2017, les cinq principaux émetteurs, l'Alberta, l'Ontario, le Québec, la Saskatchewan et la Colombie-Britannique, ont rejeté 91 % des émissions nationales totales du Canada. Les provinces du Québec et de la Colombie-Britannique, qui dépendent d'abondantes ressources hydroélectriques pour la production d'électricité, ont montré des régimes d'émissions plus stables au cours du temps avec un déclin depuis 2005 (Environnement et Changement climatique Canada, 2019b).

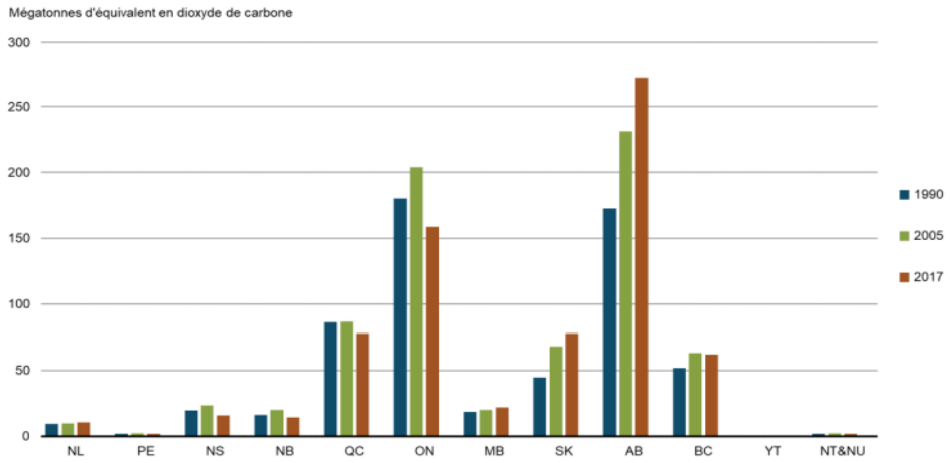


Figure 2.4. Émissions de gaz à effet de serre par province et territoire au Canada en 1990, 2005 et 2017 (Environnement et Changement climatique Canada, 2019b).

2.1.3 Contexte québécois

Les impacts des changements climatiques se démontrent par une probabilité d'occurrence accrue d'événements météorologiques extrêmes ou historiques. Au Québec, des épisodes récents tels que le déluge du Saguenay en 1996, la crise du verglas en 1998, la récurrence des canicules, les inondations printanières provoquées par la modification des périodes de récurrence des pluies, des hivers moins rigoureux et des intenses variations de température peuvent en être le témoignage.

En 2016, les émissions totales de GES au Québec se chiffrent à 78,6 Mt éq. CO_2, représentant 11,1 % des émissions canadiennes, lesquelles atteignent 704,2 Mt éq. CO_2. Le secteur résidentiel, commercial et institutionnel, représentant le chauffage des bâtiments, se classe au troisième rang des émissions totales de GES au Québec en 2016 avec 8,5 Mt éq. CO_2 et 10,8 % des émissions, soit après les secteurs des transports et de l'industrie. Les GES produits proviennent principalement des combustibles fossiles utilisés pour chauffer les bâtiments. Les bâtiments commerciaux et institutionnels sont encore majoritairement chauffés par les combustibles fossiles, contrairement aux bâtiments résidentiels qui sont chauffés surtout par l'électricité. Les facteurs tels que l'amélioration de l'efficacité énergétique, les mesures de conservation de l'énergie, les moyens de production et de stockage d'énergie propres agissent de façon importante sur la réduction des GES du secteur résidentiel, commercial et institutionnel (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018).

Selon la Stratégie canadienne de développement à faible émission de gaz à effet de serre à long terme pour le milieu du siècle, la décarbonisation présente des occasions d'améliorer le bien-être social et la productivité économique. La production efficace de biens et services, tout en réduisant constamment les émissions de GES, est prônée. L'ingéniosité humaine est donc nécessaire pour y parvenir, pour innover et pour développer des communautés saines, dynamiques et vertes (Environnement et changement climatique Canada, 2016). Le développement durable est une condition inhérente aux finitudes visées et se définit comme suit : « Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement 1987).

Dans cette optique fondamentale de développement durable, l'éducation joue un rôle primordial dans la transition vers un mode de vie adapté aux réalités des changements climatiques. De plus, l'avenir des générations futures est une préoccupation grandissante. Les bâtiments d'éducation sont donc un lieu effervescent de conscientisation et d'apprentissages des limites aux besoins et à la croissance, de la valorisation de la nature et des écosystèmes ainsi que du mieux vivre ensemble. D'un point de vue logistique et technique, les efforts doivent être intensifiés dans le secteur public. En effet, des bâtiments éducationnels mieux adaptés permettront à la fois de répondre aux besoins de la communauté scolaire d'aujourd'hui qui y passe davantage d'heures, de rattraper les cibles

visées en termes de réduction de GES et d'améliorer la qualité de vie du berceau de la société de demain. Le secteur des bâtiments commerciaux et institutionnels est donc étudié plus en détail.

2.1.4 Consommation énergétique des bâtiments au Québec

Tel que vu précédemment, l'énergie est un domaine vaste et responsable d'une grande part d'émissions des GES. À l'échelle mondiale, la production et la consommation d'énergie représentent 78 % des GES anthropiques. Au Canada, cette portion grimpe à plus de 81 % en raison des températures extrêmes, des vastes étendues et des populations dispersées qui font augmenter la consommation d'énergie (Ressources naturelles Canada, 2019a). Le secteur commercial et institutionnel représente une partie importante du total des GES, soit 11% au Québec et 10% pour l'ensemble du Canada. Cependant, leur contribution dans la transition énergétique est beaucoup plus importante que ces pourcentages ne le laissent présager. Effectivement, la gestion de l'énergie du secteur commercial et institutionnel a le potentiel d'afficher le plus fort taux de progression. En effet, d'une part, une portion importante (environ la moitié) du portrait énergétique du secteur commercial et institutionnel provient des énergies fossiles, principalement du gaz naturel et du mazout, voire une portion encore plus grande pour la consommation de chauffage. Les énergies renouvelables doivent être en forte progression dans ce secteur. D'autre part, la désuète réglementation sur l'efficacité énergétique des bâtiments commerciaux et institutionnels datant de 35 ans met un frein aux économies d'énergie du Québec en plus de ne pas favoriser le développement de marchés pour de nouveaux matériaux et des techniques de construction novatrices (Gouvernement du Québec, 2018a).

Selon le Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques du Québec 2018-2023 (Gouvernement du Québec, 2018a) qui s'inscrit dans le cadre de la Politique énergétique 2030 (Gouvernement du Québec, 2016), l'objectif numéro un en matière de bâtiments commerciaux et institutionnels est d'améliorer les pratiques en matière de gestion de l'énergie. Les bâtiments existants de grande taille nécessitent d'être soumis à une gestion rigoureuse de l'énergie et les nouveaux bâtiments requièrent d'en consommer très peu. Le secteur des bâtiments commerciaux et institutionnels sera la source d'une expertise nécessaire en transition énergétique et agira à titre d'exemple pour les autres secteurs. Les objectifs majeurs sont les suivants :

- La part d'énergie renouvelable, incluant l'hydroélectricité, dans la consommation totale d'énergie au Québec se situe actuellement à 58% et doit encore être augmentée.

- L'adoption d'une nouvelle réglementation pour les bâtiments commerciaux et institutionnels permettra d'augmenter le potentiel d'efficacité énergétique de plus de 25%.
- L'intégration du bâtiment durable qui se traduit par l'innovation technologique, mais également sociale. Ainsi, la compréhension, le respect et la valorisation du contexte social en plus de l'environnement biologique et physique dans lequel l'environnement bâti s'implante sont à l'avant plan. (Gouvernement du Québec, 2018a).

Selon la Figure 2.5, la consommation d'énergie totale du secteur commercial et institutionnel, a augmenté de 23 % pendant la période 1990 à 2013, les émissions de GES associés ont augmenté de 4 % tandis que la surface de plancher a augmenté de 46 %. Le gaz naturel et l'électricité demeurent les principales sources d'énergie avec 54 % et 39 % respectivement de la consommation totale. L'électricité est la principale source d'énergie pour l'éclairage, la climatisation et les équipements, alors que le gaz naturel et les autres combustibles servent principalement au chauffage des locaux et de l'eau (Ressources naturelles Canada, 2016b). Il est à noter qu'en 2017, 67 % de l'électricité produite au Canada provient de sources renouvelables : 60 % d'hydroélectricité et 7 % d'énergies renouvelables non hydraulique (Ressources naturelles Canada, 2019b).

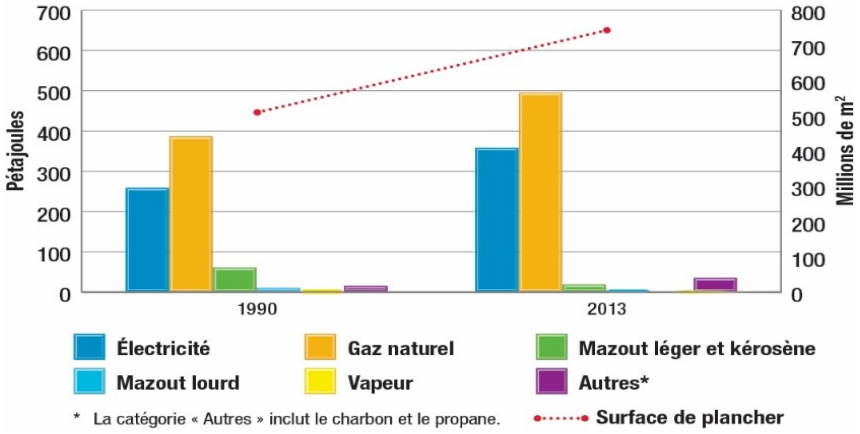


Figure 2.5. Évolution de la consommation d'énergie dans le secteur commercial et institutionnel selon la source d'énergie et la surface de plancher au Canada entre 1990 et 2013 (Ressources naturelles Canada, 2016b).

Quant au Québec, pour la période 1990 à 2013, la consommation énergétique du secteur commercial et institutionnel a été en croissance de 30 %. Les deux principales sources d'énergie de ce secteur sont l'électricité et le gaz naturel avec respectivement 51 % et 41 % de la

consommation d'énergie totale en 2013 (Whitmore & Pineau, 2016). Il est à noter qu'en 2011, 97 % de l'électricité produite au Québec provient de sources renouvelables : 96 % d'hydroélectricité et 1 % d'énergies renouvelables non hydraulique (Énergie et ressources naturelles Québec, 2016).

Le Tableau 2.1 détaille et compare la consommation d'énergie québécoise et canadienne du secteur commercial et institutionnel. Le Québec et le Canada présentent des statistiques semblables, toutefois certaines différences sont à relever. En 2013, le secteur commercial et institutionnel engendre l'émission de 5 % des GES au Québec et de 9 % des GES au Canada. Il est à souligner que le sous-secteur des services d'enseignement représente respectivement 14 % et 13 % de la superficie de plancher de tous les bâtiments commerciaux et institutionnels québécois et canadiens. Le chauffage des locaux est, de loin, la part la plus importante de consommation énergétique des bâtiments commerciaux et institutionnels (Ressources naturelles Canada, 2016b; Whitmore & Pineau, 2016).

Tableau 2.1. Consommation d'énergie du secteur commercial et institutionnel au Québec (Whitmore & Pineau, 2016) et au Canada (Ressources naturelles Canada, 2016b) en 2013.

Consommation d'énergie secondaire par secteur	**Québec**	**Canada**
Secteur commercial et institutionnel	11 %	10 %
Sous-secteur des services d'enseignement	14 %	13 %
Selon l'utilisation finale :		
Chauffage des locaux	50 %	55 %
Climatisation des locaux	5 %	4 %

Le Tableau 2.2 détaille et compare l'intensité énergétique québécoise et canadienne du sous-secteur des services d'enseignement. Dans la période 1990 à 2013, le secteur commercial et institutionnel québécois et canadien ont connu respectivement une baisse de 9% et 15 % de l'intensité énergétique liée à la consommation d'énergie par unité de surface de plancher. Plus particulièrement, le sous-secteur des services de l'enseignement est passé, pour la même période, au Québec, de 1,22 GJ/m² à 1,15 GJ/m², soit une baisse de 6 % alors qu'au Canada, il est passé de 1,40 GJ/m² à 1,20 GJ/m², soit une baisse de 14 % (Whitmore & Pineau, 2016), (Ressources naturelles Canada, 2016b). À titre comparatif, la Maison du Développement Durable, inauguré à

Montréal en 2011 et premier bâtiment à avoir obtenu la certification LEED Platine Nouvelle construction au Québec a une intensité énergétique de 0,802 GJ/m^2 (Équiterre, 2018). Le secteur d'activité serait un facteur plus déterminant que l'année de construction du niveau d'intensité des bâtiments dans l'ensemble du Canada (Ressources naturelles Canada, 2007).

Tableau 2.2. Intensité énergétique du secteur commercial et institutionnel au Québec et au Canada en 2005 (Ressources naturelles Canada, 2007).

Intensité énergétique des bâtiments (GJ/m^2)	**Québec**	**Canada**
Secteur commercial et institutionnel	1,26	1,54
Sous-secteur des services d'enseignement	1,05	1,35
Écoles primaires ou secondaires	0,98	1,01
Collèges communautaires et cégeps	0,92	1,42
Universités	2,13	2,59

La cible québécoise de réduction des émissions de GES est de 37,5 % d'ici l'année 2030 par rapport aux émissions de 1990. De plus, le Québec a adhéré à la coalition d'États fédérés et de régions signataires du Protocole sur le leadership climatique mondial, se donnant ainsi la même ambition que la Canada, soit une réduction des émissions de GES de 80 à 95 % d'ici 2050 (Environnement et lutte contre les changements climatiques Québec, 2020). La Figure 2.6 détaille les émissions globales de GES du Canada entre 1990 et 2015 liées aux secteurs de l'énergie ainsi qu'aux secteurs non-énergétiques. Pendant la période 1990-2016, les émissions de GES au Québec du secteur résidentiel, commercial et institutionnel ont diminué de 24,4%. Toutefois, cette baisse est uniquement la cause du sous-secteur résidentiel puisque les émissions de ce dernier ont diminué de 45,4% alors que celles du sous-secteur commercial et institutionnel ont augmenté de 10,1%. De plus, entre 2012 et 2016, les augmentations des GES sont 9,1 % dans le secteur du chauffage résidentiel, commercial et institutionnel, soit plus spécifiquement une hausse de 3,2% pour le sous-secteur résidentiel et une de 14,4% pour le sous-secteur commercial et institutionnel. Les émissions liées au chauffage des bâtiments résidentiels, mais surtout des bâtiments commerciaux et institutionnels sont corrélées à la fluctuation de la demande en énergie pendant la période hivernale. Bien que la demande en chauffage soit étroitement liée aux températures, d'autres facteurs influent tels que l'amélioration de l'efficacité énergétique et les mesures de conservation de l'énergie. Ces

facteurs ont été encouragés plus particulièrement dans le domaine résidentiel par des nouvelles méthodes de construction, des programmes incitant à la rénovation résidentielle et l'arrivée sur le marché de systèmes de chauffage à haut rendement énergétique. Ainsi, ceci est une autre illustration du fort potentiel de progression du secteur commercial et institutionnel (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018).

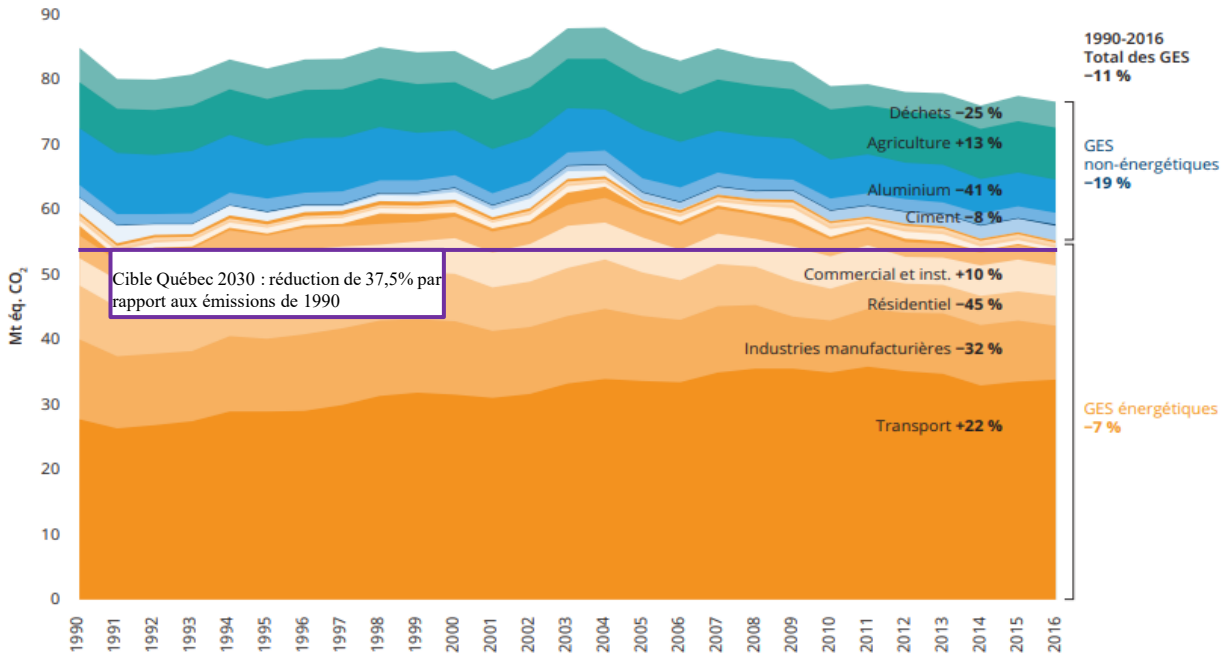


Figure 2.6. Évolution des émissions globales de GES au Québec par secteurs entre 1990 et 2016 et l'engagement gouvernemental de réduction provinciale projetées pour 2030 adapté de (Pineau et al., 2019)

2.1.5 Bâtiments en milieu urbain

Les villes sont responsables de pressions importantes sur l'environnement. Elles sont à la fois des milieux de vie que des lieux de production de biens matériels, de distribution de services et de consommation. Puis, elles représentent plus de 70 % des émissions de CO_2 mondial issu des combustibles fossiles (Seto & al., 2014). À l'heure actuelle, la population urbaine mondiale a dépassé la population mondiale rurale (Chaire d'études sur les écosytèmes urbains UQAM, 2014). Ce point tournant entraîne des changements de modes de vies, de démographie et d'organisation sociale. Les milieux urbanisés ont un défi double de réduction des émissions de GES et d'adaptation aux conséquences croissantes des changements climatiques. Ces écosystèmes

complexes font face à d'importants enjeux relatifs à la santé, l'économie, la sécurité publique et la dégradation de l'environnement. En conséquence, la sécurité et la prospérité des villes sont en danger (Ouranos, 2019).

Au Québec, les régions urbaines accueillent plus du trois quarts de la population du Québec (Institut de la statistique du Québec, 2020). Afin d'inspirer les actions locales, régionales et nationales qui feront passer du risque à la résilience, Atlas climatique Canada permet de rendre plus accessible les problèmes liés aux changements climatiques pour les Canadiens. Les prédictions climatiques de Montréal sont disponibles à la Figure 2.7. La figure permet la comparaison des valeurs d'indicateurs de température d'un passé récent (1976-2005) avec celles d'un futur projeté pour 2051-2080 pour un scénario futur à carbone élevé, c'est-à-dire sans limitation du réchauffement planétaire à 1,5°C, tel qu'indiqué à la Figure 2.1 (Atlas climatique du Canada, 2019). Les températures élevées dans les centres urbains peuvent être dangereuses, surtout pour les personnes âgées, les malades chroniques et les personnes sans climatisation. Une chaleur forte et prolongée peut aussi avoir un impact sur la qualité de l'air, faciliter la propagation de maladies dangereuses, empêcher les activités de plein air et être une source de stress et d'anxiété. Des solutions possibles passent principalement par la lutte aux îlots de chaleur telle que l'implantation de zones ombragées, de toits organiques et le soutien des personnes vulnérables lors des vagues de chaleur (Atlas climatique du Canada, 2019).

Changement	1976-2005 Moyenne	2051-2080 Faible	2051-2080 Moyenne	2051-2080 Haute
Jour d'été le plus chaud typique	33.1 °C	35.0 °C	37.9 °C	41.5 °C
Jour d'hiver le plus froid typique	-27.4 °C	-24.0 °C	-18.9 °C	-13.5 °C
Nombre de jours +30 ° C par an	11	30	54	78
Nombre de nuits de +20 ° C par an	8	27	45	66
Précipitation d'hiver	229 mm	195 mm	275 mm	368 mm
Précipitation de printemps	230 mm	187 mm	271 mm	357 mm
Saison sans gel (journées)	175	188	217	245

Figure 2.7. Projections climatiques de Montréal selon sept indicateurs pour un scénario futur à carbone élevé (Atlas climatique du Canada, 2019).

L'étalement urbain apporte également son lot de problématiques et de stress sur le milieu biologique, ainsi il est plus durable d'optimiser le territoire et les ressources en ville. Cependant, ceci doit se faire de façon réfléchie selon des pratiques d'aménagement urbain adaptées. Le maintien et la bonification des bilans sociaux et environnementaux des milieux urbains nécessitent la mise en œuvre d'actions concertées en matière de développement durable.

2.1.6 Agriculture urbaine

L'agriculture, avec ses méthodes utilisées et son lieu de production, joue un rôle important dans la lutte aux changements climatiques. Le secteur de l'agriculture se classe au quatrième rang des émissions totales de GES au Québec en 2016, soit avec 7,6 Mt éq. CO_2 et 9,6 % des émissions (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2018). En partant du constat que les citadins sont désormais la majorité de la population mondiale, il est inévitable que de nouvelles stratégies devront être mises en place afin de les nourrir de façon durable. L'agriculture urbaine a le potentiel de produire des aliments près d'où vivent les gens. Son accroissement engendre des bénéfices en lien avec l'adaptation aux changements climatiques à plusieurs niveaux : sans équivoque il y a le transport, mais aussi les méthodes de cultures plus durables, la diminution des pertes, la démocratisation de l'agriculture, etc. L'agriculture urbaine,

de par son espace réduit, favorise l'utilisation de méthodes de cultures au rendement efficace par la combinaison de cultures telle la permaculture. À l'inverse, la mono-culture, utilisée à grande échelle en milieu rural, appauvrie les terres, augmente ainsi leur fragilité aux maladies et aux insectes, de ce fait, encourage l'épandage de pesticides dont les effets sur la biodiversité débutent à être documenter et ceux sur la santé humaine sont peu ou pas découverts. Le principe de précaution doit être appliqué. La loi sur le développement durable du Québec le définit ainsi : « lorsqu'il y a un risque de dommage grave ou irréversible, l'absence de certitude scientifique complète ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir une dégradation de l'environnement étant entre autres inscrits ». Contrairement à la mono-culture, la permaculture repose sur les principes de diversité, d'interrelation et d'autorégulation des cultures. Toute plante produit, mais le but de chacune n'est pas uniquement de produire, elle a un rôle pour les autres également, pour l'écosystème (Dion & Laurent, 2015). Il faut retenir que l'implantation de l'agriculture urbaine est une nécessité vitale pour nourrir l'humanité demain.

2.1.7 Synthèse de la lutte aux changements climatiques et actions visées par cette recherche

En résumé, le contexte des changements climatiques engendre une adaptation du cadre bâti de notre société. Effectivement, afin de limiter les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle, le Canada, mais également le Québec et Montréal sont des joueurs importants à chaque niveau. Au Canada comme au Québec, le secteur des bâtiments est le troisième plus grand responsable des émissions totales de GES fédérales et provinciales. Le chauffage des locaux est, de loin, la part la plus importante de consommation énergétique des bâtiments commerciaux et institutionnels. Ces bâtiments sont encore majoritairement chauffés par les combustibles fossiles. Leur demande en chauffage est critique lors de la période hivernale. Le secteur des bâtiments publics et institutionnels présente des retards sérieux en termes de modernisation énergétique, mais ces défis dévoilent de nombreuses opportunités. En effet, la gestion de l'énergie du secteur commercial et institutionnel a le potentiel d'afficher le plus fort taux de progression. Ainsi, la réhabilitation thermiquement dans les bâtiments, notamment institutionnels, en climat froid tel qu'au Québec, est un enjeu de grande importance pour lutter contre les changements climatiques.

2.2 Stratégies gouvernementales pour les bâtiments d'éducation au Québec

Dans son Plan québécois des infrastructures 2019-2029, la priorité des nouveaux investissements du gouvernement concerne l'éducation afin d'intervenir contre l'accroissement des écoles en mauvais état qui est actuellement au taux de 54 %. Le renversement de cette tendance favorisera la réussite scolaire et l'innovation. En effet, il prévoit 35 % de son budget dans ce secteur, soit près de 6,6 milliards de dollars afin de rattraper le retard accumulé (Gouvernement du Québec, 2019a).

Le programme, incluant les établissements d'enseignement supérieur, mais particulièrement les établissements d'enseignement primaire et secondaire, vise plusieurs objectifs dont :

- l'optimisation de l'utilisation des écoles existantes par différents travaux de réaménagement et de transformation;
- l'accélération de la mise en place de nouveaux locaux afin de répondre à de nombreux déficits d'espace partout au Québec, y compris l'implantation progressive des classes de maternelle 4 ans;
- la construction de nouvelles écoles.

Concrètement, il s'agit de 5 000 projets de rénovation et d'amélioration, l'ajout d'environ 1 000 classes supplémentaires ainsi que la construction de près de 35 nouveaux établissements d'enseignement (Gouvernement du Québec, 2019a, 2019b). Notamment, le gouvernement a mis en place le projet Lab-École afin de rassembler une équipe multidisciplinaire qui travaille à bâtir des écoles de niveau primaire mieux adaptées. Le modèle traditionnel des écoles actuelles est désuet puisqu'il date des années 1970 et ne répond plus aux besoins des enfants d'aujourd'hui qui y passent davantage d'heures. Le Lab-École couvre trois champs d'activités, soit (i) l'environnement physique, (ii) le mode de vie sain et actif et (iii) l'alimentation comme moteur de création de sept projets dans différentes régions du Québec : Maskinongé, Rimouski, Saguenay, Shefford, Québec, Montréal et Gatineau (Lab-École, 2019).

Outre les bénéfices économiques associés aux mesures d'efficacité énergétique, dans le cas des bâtiments scolaires, la promotion de l'éducation au développement durable et l'amélioration des conditions de confort constituent des gains supplémentaires importants. D'une part, le gouvernement québécois reconnaît que la réussite éducative constitue la pierre angulaire de la

richesse collective du Québec à long terme. Ainsi, le maintien d'infrastructures de qualité ainsi que l'embellissement et la construction de nouvelles écoles sont des moyens tangibles d'y parvenir (Gouvernement du Québec, 2019a). D'autre part, la réussite éducative des jeunes dépend de l'environnement dans lequel ils se trouvent. Cet environnement doit permettre les apprentissages expérientiels et donner les ressources aux enseignants de faire de la pédagogie par projet. Il est effectivement démontré par des études scientifiques que les jeunes apprennent, se réalisent et s'épanouissent davantage grâce à l'apprentissage actif.

D'après les études de Freeman et al. (2014), les approches pédagogiques où les étudiants sont actifs et qu'ils collaborent entre eux favorisent la rétention des connaissances. Des études quantitatives menées au premier cycle universitaire sur la façon dont les méthodes constructivistes (approche amenant les étudiants à construire leur propre compréhension, en opposition à l'approche traditionnelle théorique axée sur l'enseignement « en racontant ») ont un impact sur la performance des étudiants dans les domaines des Sciences, de la Technologie, de l'Ingénierie et des Mathématiques (STIM). L'apprentissage actif mène à une augmentation des performances d'examen qui ferait augmenter la moyenne des notes tandis que le taux d'échec dans le cadre d'un apprentissage traditionnel augmente de 55% par rapport à celui par apprentissage actif. L'analyse soutient la théorie selon laquelle le nombre d'étudiants recevant des diplômes STIM pourraient être augmenté en abandonnant les cours traditionnels pour l'apprentissage actif. En effet, aux État-Unis, seulement 40% des étudiants qui entrent à l'université avec un intérêt pour les STIM et seulement 20% des étudiants issus des minorités visibles qui entrent aussi à l'université avec un intérêt pour les STIM finissent avec un diplôme dans ce domaine (Freeman et al., 2014).

Au Québec, il existe une iniquité en matière d'éducation qui peut être remédiée, en partie, par l'amélioration des établissements. Des constats préoccupants sont faits tant par l'Organisation pour la Coopération et le Développement Économique (OCDE) que par le Conseil Supérieur de l'Éducation (CSE). Dans son rapport Remettre le cap sur l'équité 2014-2016, la CSE soutient que « les enfants des milieux défavorisés et ceux qui éprouvent des difficultés d'apprentissage sont surreprésentés dans les classes ordinaires des écoles publiques, ce qui peut créer dans ces classes des contextes moins propices à l'apprentissage [et à l'enseignement]. » Au Canada, le Québec est la province présentant la plus importante variation de la performance associée à des différences de statut socioéconomique et le plus grand écart de performance des élèves défavorisés selon qu'ils fréquentent une école favorisée ou défavorisée (Guilbault, 2019).

En résumé, les politiques de rénovation et de construction en cours dans les écoles au Québec sont une excellente opportunité pour améliorer l'efficacité énergétique et l'ergonomie pour l'éducation. De plus, ce plan d'amélioration des établissements d'éducation québécois est une opportunité pour développer de nouvelles approches pédagogiques.

2.3 Évaluation de l'efficacité énergétique de bâtiments

2.3.1 Méthodes d'analyse des programmes de simulation énergétique existants

Selon Sowell et Hittle (1995), les outils de conception énergétique disponibles sont généralement développés selon deux méthodes pour calculer la charge thermique horaire dans les bâtiments : 1) la méthode des facteurs de pondération ou 2) la méthode du bilan d'énergie. La première méthode calcule les charges de climatisation ou de chauffage avec des facteurs de pondération pré-calculés ou personnalisés. Les facteurs de pondération sont utilisés pour convertir les gains de chaleur à travers les murs ou les toits en charges de chauffage ou de climatisation dans une zone. La deuxième méthode utilise un bilan thermique conducteur, convectif et radiatif pour toutes les surfaces de la pièce dans la zone thermique. Chaque méthode présente des avantages et des limites qui affectent la performance de ces outils. Par exemple, la méthode du facteur de pondération ne nécessite pas de calculs itératifs pour la simulation et les facteurs utilisés permettent d'estimer l'effet de la performance du système sur les charges de climatisation. Par ailleurs, la méthode du bilan thermique ne nécessite pas les hypothèses de conditions de convection constantes et la relation entre la capacité d'évacuation de la chaleur et la température ambiante doit être spécifiée lors du calcul de la charge (Sowell & Hittle, 1995).

Il existe de nombreux puissants programmes de simulation énergétiques des bâtiments disponibles (Al-Homoud, 2005). Le plus connus est le programme DOE-2 (*Department Of Energy*) produit par le Département de l'Énergie des États-Unis et utilisant la méthode des facteurs de pondération. Il permet d'analyser le comportement énergétique des bâtiments et leurs systèmes CVCA. Il utilise des données météorologiques horaires pour calculer heure par heure la performance et la réponse d'un bâtiment. Plusieurs microprogrammes développés par diverses organisations privées, tels que CAN-QUEST, HOT2XP et SIMEB, utilisent le moteur de calcul du programme DOE-2 avec une interface plus conviviale. Le programme d'analyse de la charge du bâtiment et des systèmes thermodynamiques BLAST (*Building Load Analysis and System Thermodynamics*) a été développé

selon la méthode du bilan thermique. Il permet de prédire la consommation d'énergie, la performance des systèmes et les coûts des bâtiments existants ou en cours de conception. Il produit des analyses énergétiques horaires de bâtiments de différents types et tailles pour la conception mécanique des équipements ainsi que les contrôles de conformité. BLAST et de DOE-2 ont été combinées par le Lawrence Berkeley National Laboratory dans un nouveau programme appelé EnergyPlus alliant ainsi les avantages des deux méthodes de calcul (U.S. Department of Energy's (DOE) et al., 2019).

D'autres exemples de programmes consistent en des simulateurs basés sur des composants mécaniques, dont TRNSYS est l'exemple le plus connu (Transient System Simulation Tool, 2019). Ce dernier est un programme de simulation de système transitoire des composants mécaniques et est conçu avec une structure modulaire qui permet l'ajout de nouveaux modèles mathématiques. Un tel programme de simulation s'avère des plus utiles pour les études détaillées de systèmes CVCA. Cependant, son emploi demeure hautement complexe pour des simulations de bâtiments multizones sur des périodes d'un an (Sowell & Hittle, 1995).

La plupart des outils d'ingénierie de conception énergétique développés et optimisés depuis près d'un demi-siècle s'avèrent adéquats pour évaluer la performance thermique des bâtiments avec des solutions prescrites (Zhao & Magoulès, 2012). Cependant, l'emploi, en pratique, de ces outils de simulation peut se heurter à certaines difficultés. D'une part, la réalisation d'une simulation précise au moyen de ceux-ci peut nécessiter de connaitre le détail des systèmes thermiques présents au sein du bâtiment. Or cette information n'est souvent pas disponible durant les phases préliminaires de conception, lesquelles sont pourtant cruciales dans l'orientation des décisions techniques (Al-Homoud, 2005). D'autre part, l'utilisation adéquate de ces outils requiert un haut niveau d'expertise pouvant ne pas être disponible pour les projets d'envergure modeste menés par des ingénieurs praticiens en génie civil. Les méthodes d'analyse énergétique actuelles des bâtiments haute performance sont basées sur des simulations horaires de systèmes complexes interdépendants comprenant la masse thermique, les systèmes CVCA et, parfois, des fonctionnalités particulières telles que des systèmes solaires actifs ou passifs, des systèmes photovoltaïques, ou l'éclairage naturel (Oh, 2013). Or, un écart peut être observé entre les performances simulées et réelles de certains bâtiments. D'après les études de Oh (2013), l'une des causes potentielles de cet écart vient du manque de maitrise des méthodes d'analyse sur lesquelles les logiciels sont basés par les utilisateurs. Ceux-ci peuvent alors avoir des attentes déraisonnables quant aux performances ou à

l'utilisation de ces logiciels. C'est pourquoi certains chercheurs ont proposé des outils alternatifs plus simples avec différents niveaux de sophistications (Zhao & Magoulès, 2012) détaillés ci-après. Ce sont aussi pour ces raisons que ce travail propose le développement d'un outil de calcul de charge thermique pratique, accessible dans sa formulation et modulable, notamment à destination des phases préliminaires de conception menée par des ingénieurs praticiens du génie civil.

2.3.2 Travaux et outils existants d'aide à la conception du bâtiment

Certains logiciels commerciaux peuvent également agir comme aide à la conception selon les différentes expertises impliquées : architecturale, structurale, mécanique et électrique. Ceux-ci permettent de faciliter les décisions qui auront un impact important sur la consommation énergétique du bâtiment. Le logiciel de conception de bâtiment Revit (Autodesk, 2020) permet de créer un modèle architectural en 3D d'un bâtiment pour ensuite produire divers documents nécessaires à sa construction. Il comprend un outil pour générer automatiquement un modèle énergétique à partir du modèle architectural produit, puis l'optimiser. Un autre exemple qui permet aux architectes et ingénieurs d'évaluer plus facilement les mesures d'efficacité énergétique des bâtiments tout au long du processus de conception est plate-forme logicielle OpenStudio créée par le laboratoire national des énergies renouvelables aux États-Unis. Cet outil utilise les moteurs de simulation EnergyPlus et Radiance du département américain de l'énergie pour l'analyse des performances énergétiques et de la lumière du jour dans tout le bâtiment. Il est disponible gratuitement et fonctionne par plugin Trimble SketchUp (OpenStudio, 2020). L'aspect négatif de ces outils puissants et complets est la difficulté pour les concepteurs les utilisant de comprendre les méthodes d'analyse sur lesquelles les programmes sont basés et donc un travail d'expert fastidieux peut être nécessaire.

Les conditions météorologiques sont des facteurs importants pour déterminer la consommation d'énergie. Celles-ci prennent de nombreuses formes, telles que la température, l'humidité, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et varient dans le temps. Il est possible de simplifier les conditions météorologiques pour prévoir la consommation mensuelle d'énergie du bâtiment. Ainsi, la charge annuelle de chauffage et de climatisation peut être prédite simplement en fonction de certaines variables météorologiques mensuelles. Dans le cas d'un bâtiment de faible masse thermique, il est plus avantageux d'utiliser cette méthode simplifiée que les outils de simulation complets tels que BLAST, DOE-2, EnergyPlus, etc. Outre les conditions météorologiques, les

caractéristiques du bâtiment sont un autre facteur important pour déterminer la performance énergétique. Il est ainsi envisageable de définir la consommation d'énergie totale du bâtiment comme la somme de plusieurs composants selon une méthode de modélisation spécifique : équipements, eau chaude et chauffage. Pour chaque composant, une méthode de modélisation spécifique peut être employée. Par exemple, pour modéliser des équipements électriques, la consommation moyenne d'utilisation est déterminée à partir de grandes quantités de données statistiques. Pour modéliser la demande de chauffage des locaux, un modèle physique simplifié a été appliqué. Puisque la valeur moyenne varie selon les saisons, cette méthode prédit la demande d'énergie pour une saison à la fois. Dans le projet de « Mise à jour de l'ASHRAE/ACCA Procédures et données de calcul des charges de chauffage et de climatisation résidentielles », la méthode du facteur de charge est proposée, soit une méthode simple facilement applicable. Les contributions de charge de diverses sources sont séparément évaluées puis additionnées (Zhao & Magoulès, 2012).

2.3.3 Outils existants de vérification de la consommation énergétique du bâtiment

Le calcul de la consommation énergétique de bâtiments est rendu possible grâce à plusieurs outils et logiciels de vérification. Ceux-ci sont conçus et adaptés pour des contextes géographiques et des besoins particuliers fonction d'objectifs soit réglementaires, soit clients. Le Tableau 2.3 dresse une liste de quelques outils. Cette revue permet de cibler les limites de ceux-ci et d'identifier les paramètres essentiels à considérer au sein d'une analyse énergétique. Il est à noter que les logiciels de dimensionnement et de présélection des systèmes mécaniques CVCA n'ont pas été considérés étant hors de la portée de ce mémoire.

Tableau 2.3. (Partie 1/4) Revue de quelques outils et logiciels de calcul d'efficacité énergétique existants.

Outil de calcul	Régions concernées	Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie	Limitations
CAN-QUEST, adapté de QUick Energy Simulation Tool (eQUEST) **(Ressources naturelles Canada, 2010)**	Canada, adapté des États-Unis	> Caractéristiques générales (lieu, position, enveloppe, éclairage extérieur, eau chaude sanitaire) > Systèmes CVCA > Zones (dimension, enveloppe murs ext, fenêtres, enveloppe toiture et sous-sol ou dalle, équipements, éclairage, CVCA, occupation, horaires) > Centrale thermique (boucle eau chaude, boucle eau glacée, boucle eau mitigée)	> Génère les rapports de conformité NECB 2011 > **Efficacité d'énergie, Chauffage, Climatisation, Éclairage intérieur et extérieur, Équipement, Rejets chaleur, Ventilateurs, Pompes, Réfrigération, Eau chaude sanitaire** selon les différentes catégories d'énergie (électricité, gaz naturel, mazout, propane) > Température > Selon les heures, jours ou mois	Logiciel de modélisation de la consommation énergétique des bâtiments de Ressources naturelles Canada (RNCan) fonctionnant avec le moteur DOE-2.2. Semblable à SIMEB. Explications détaillées pour chaque paramètre d'entrée. Liste pré-définie de mesures d'efficacité énergétique à appliquer. Donc, **limitations pour la modélisation de stratégies spécifiques, novatrices et sur mesure.**
Energy Efficiency Calculation Tool (EEC) **(Siemens, 2014)**	Pas de restrictions géographiques	> Types de bâtiments: bureaux, bâtiments scolaires, bâtiments résidentiels (pour la conception structurelle correspondante et les profils utilisateur / charges internes préconfigurés) > Types d'installations: chauffage, eau chaude, refroidissement, ventilation et climatisation > Zones thermiques	> Potentiel d'économies d'énergie > Coûts énergétiques > Émissions de CO_2 > Les résultats détaillés de la **consommation d'énergie** de la centrale CVCA et de certaines parties du bâtiment indiquent un potentiel d'économies d'énergie lucratif > Calcul du temps de retour sur investissement	**Outil inaccessible** Données météorologiques (emplacement et orientation)

Tableau 2.3. (Partie 2/4) Revue de quelques outils et logiciels de calcul d'efficacité énergétique existants.

Outil de calcul	Régions concernées	Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie	Limitations
REMA Model **(Tuominen & al., 2014)**	Finlande: Helsinki-Uusimaa Finlande méridionale Finlande occidentale Est - Nord de la Finlande	> Quatre types de bâtiments représentatifs et en utilisant leurs propriétés énergétiques pour calculer la consommation d'énergie : maisons individuelles, immeubles à appartements, bâtiments commerciaux et maisons de vacances > Bâtiments résidentiels et bâtiments non résidentiels > Les bâtiments construits avant 1959, pendant la période 1960-1979, pendant la période 1980-2009 et les périodes futures sont 2010-2019, 2020-2029 et 2030-2050 (peuvent être modifiés par l'utilisateur) > Nouvelles constructions et rénovations	> **Consommation annuelle d'énergie** en GWh (calculée comme une somme pour tous les bâtiments de ce type particulier et divisée en consommation de chaleur et de carburant d'une part et consommation d'électricité d'autre part) > Modèle simplifié du secteur de l'énergie permettant le calcul des émissions de CO_2	**Excel inaccessible** Pas de modélisation dynamique, uniquement un développement linéaire pour permettre la flexibilité (les effets de la modification d'un paramètre particulier sont calculés instantanément et les résultats sont affichés) Données météorologiques (emplacement et orientation)
Energy Plus **(U.S. Department of Energy's (DOE) et al., 2019)**	États-Unis	-	> Consommation d'énergie (pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation, l'éclairage et les charges et procédés) > Utilisation de l'eau	Logiciel très complet, mais également **nécessitant une expertise pour l'utiliser** et en comprendre le fonctionnement.

Tableau 2.3. (Partie 3/4) Revue de quelques outils et logiciels de calcul d'efficacité énergétique existants.

Outil de calcul	Régions concernées	Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie	Limitations
EE4 **(Ressources naturelles Canada, 2016a)**	Canada	> Stratégies de zonage (orientation, systèmes, zones de chauffage et de climatisation, etc.) en plus d'un diagramme indiquant le zonage du bâtiment > Caractéristiques de chaque espace défini au sein des zones et éléments principaux (murs, toits, portes, planchers en surplomb, fenêtres, éclairage, aires sous le niveau du sol) > Composition des éléments de l'enveloppe couche par couche > Espaces compris à l'intérieur de l'enveloppe chauffée (sous-sols, cages d'escalier, locaux techniques, les couloirs, plates-formes de chargement et aires de stockage) > Données du manufacturier de fenêtres concernant la valeur U et le coefficient d'ombrage > Horaires variables de l'occupation, de la charge liée à l'éclairage et à l'équipement, de la température, de la charge de chauffage de l'eau et des ventilateurs	> Consommation d'énergie, en plus de mettre en application les règles particulières à la validation de la conception de bâtiments neufs de Ressources naturelles Canada (RNCan) > **Permet de vérifier qu'une conception donnée représente une amélioration de la consommation énergétique d'au moins 25 % par rapport aux exigences de 1997**	Logiciel fonctionnant sur un système 32 bits (émulateur pour 64 bits) **Outil de vérification du rendement énergétique d'un bâtiment et non comme outil de conception** Calcul détaillé des charges internes, solaires, de transmission et de ventilation Modélisation d'une vaste gamme de systèmes et composants primaires et secondaires Tables ASHRAE Fundamentals Handbook pour caractéristiques thermiques des fenêtres non fournies

Tableau 2.3. (Partie 4/4) Revue de quelques outils et logiciels de calcul d'efficacité énergétique existants.

Outil de calcul	Régions concernées	Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie	Limitations
HOT2XP **(Ressources naturelles Canada, 2017)**	Canada	> Caractéristiques du bâtiment (lieu géographique, année, orientation, type maison, nombre d'étages, type fondation, type plafond, dimensions, isolation, fenêtres: vitrage et dimensions, portes) > Systèmes mécaniques et eau chaude (chauffage, ventilation, eau chaude, climatisation) > Infiltration air naturelle > Méthodes de construction (ex: planchers exposés ou en porte-à-faux, type de construction de plafond, etc.)	> **Consommation énergétique** des bâtiments résidentiels avec un minimum d'informations essentielles > Bilan énergétique mensuel de la maison étudiée afin de déterminer les besoins éventuels en énergie (pour le chauffage des locaux et de l'eau, le fonctionnement des appareils ménagers et l'éclairage). > Analyses mensuelles et horaires des distributions de températures pour certains éléments du bâtiment et les installations mécaniques	**Logiciel** produisant des fichiers de maisons assez détaillés qui ne peuvent être lus que par HOT2000 (qui est utilisé depuis plus de 10 ans pour la simulation de bâtiments et a fait l'objet d'une validation par rapport à DOE-2 et d'autres modèles de simulation horaire) **Difficile de connaître la distribution précise des pertes et gains. Limitations pour la modélisation de systèmes novateurs.**
SIMEB **(Hydro-Québec, 2018)**	Québec	> Caractéristiques générales (lieu, position, enveloppe, éclairage extérieur, eau chaude sanitaire) > Systèmes CVCA > Zones (dimension, enveloppe murs ext, fenêtres, enveloppe toiture et sous-sol ou dalle, équipements, éclairage, CVCA, occupation, horaires) > Centrale thermique (boucle eau chaude, boucle eau glacée, boucle eau mitigée)	> **Chauffage, Climatisation, Éclairage intérieur et extérieur, Équipement, Rejets chaleur, Ventilateurs, Pompes, Réfrigération, Eau chaude sanitaire** selon les différentes catégories d'**énergie** (électricité, gaz naturel, mazout, propane) > Température > Selon les heures, jours ou mois	**Logiciel complet** fonctionnant avec les moteurs DOE-2.2 ou Energy Plus selon le choix de l'utilisateur. Explications détaillées pour chaque paramètre d'entrée. Semblable à CAN-QUEST. **Difficile de connaître la distribution précise des pertes et gains. Limitations pour la modélisation de systèmes novateurs.**

Ce portrait des outils de calcul énergétique des bâtiments illustre certaines limites dans leur utilisation généralisée dans le contexte de recherche et de travaux écoénergétiques des bâtiments institutionnels. Les principales limites identifiées des programmes existants concernant la réalisation de simulations thermiques de bâtiments peuvent être résumées ainsi :

- Certains logiciels ne permettent pas de définir en détail certains paramètres d'entrée tels la structure, l'enveloppe et l'épaisseur des divers constituants, l'orientation géographique de ces constituants ou les horaires d'occupation et gains thermiques associés.
- Beaucoup d'outils de calcul présentent des archétypes prédéfinis dépendants de l'âge du bâtiment, des propriétés géométriques, du type de système de chauffage et du climat. Les archétypes, ces simplifications par « bâtiments types », rencontrent fort probablement les objectifs d'une précision raisonnable par rapport aux résultats de modèles détaillés avec paramètres calibrés (Cerezo et al., 2015; Filogamo et al., 2014; Papadopoulos et al., 2017). Toutefois, l'utilisation de tels archétypes n'est pas appropriée pour développer des techniques de réhabilitation thermiques sur mesure allant au-delà des méthodes de conception traditionnelles.
- Des paramètres tels que l'infiltration du bâtiment et l'ajout d'écrans thermiques sur les surfaces vitrées sont rarement modulables et détaillés en termes d'intrants et de formulations énergétiques. Ces paramètres sont complexes à modéliser. Une revue de littérature détaillée, disponible en Annexe C, a été réalisée afin de les intégrer dans l'outil de calcul développé au meilleur des connaissances et des données connues.
- Plusieurs logiciels utilisent des normes et des méthodes de calculs qui ne sont pas nécessairement accessibles à l'utilisateur. Ainsi, la modélisation des techniques de réhabilitation thermique créatives et sur mesure est plus difficilement intégrable. De plus, la vérification des calculs des transferts thermiques est alors souvent hors de portée, augmentant ainsi le risque d'erreurs.

2.3.4 Développement de l'outil de calcul énergétique

Les limitations des outils existants identifiées à la section précédente sont le point de départ du développement et des fonctionnalités retenues pour le développement d'un nouvel outil de calcul énergétique et d'optimisation de la conception thermique des bâtiments, CEEB. Cet outil cherche

à allier les deux avantages suivants : (i) donner la possibilité à l'utilisateur de définir en détail les valeurs d'entrée du modèle du bâtiment selon les informations disponibles au stade préliminaire de conception; et (ii) rendre accessible les formulations mathématiques sous-jacentes aux calculs thermiques afin de faciliter leur maîtrise par les concepteurs du génie civil et de leur permettre d'intégrer diverses stratégies créatives d'efficacité énergétique sur mesure.

L'outil proposé se veut une aide à la conception en phase préliminaire. Il est développé en intégrant les méthodes existantes de calcul de charge thermique horaire dans les bâtiments, soit la méthode des facteurs de pondération et la méthode du bilan d'énergie (voir section 2.3.1). En s'appuyant sur les travaux accomplis dans le domaine du développement d'outils d'aide à la conception simplifiés, CEEB prend en compte les conditions météorologiques sous diverses formes (température, humidité, rayonnement solaire, vitesse du vent, etc.). Il simule la charge thermique par un modèle physique simplifié évaluant les contributions des différentes composantes, d'abord séparément, puis additionnées. Les détails du développement de l'outil, de sa structure, de ses intrants et des résultats sont présentés au Chapitre 3. Le développement du programme sous forme d'un chiffrier Excel est adopté pour sa versatilité, son accessibilité et sa compatibilité avec plusieurs autres programmes. L'outil peut être ainsi utilisé, adapté, modifié ou mis à jour par la plupart des ingénieurs en génie civil. De plus, comme il ne nécessite pas l'achat de logiciel coûteux, il pourrait être utilisé pour rendre plus écologique la conception des nombreux projets de construction de bâtiment au budget plus modeste. Ainsi, CEEB est unique et original par sa constitution : pratique avec un chiffrier Excel, simplifiée avec ses méthodes de calcul validées, détaillée pour la définition des données météorologiques et des caractéristiques du bâtiment, adaptée au contexte québécois avec ses paramètres pertinents (ponts thermiques des parois opaques, infiltration d'air non contrôlée du bâtiment, écrans thermiques sur les parois transparentes) notamment pour proposer des solutions novatrices.

2.3.5 Principes de base pour les travaux écoénergétiques

Certaines études montrent que la conception durable des bâtiments réduit la demande d'énergie pour le chauffage et la climatisation (Pacheco & al., 2012). La prise en compte de ces mesures écoénergétiques en début de phase de conception du projet peut alors réduire le coût final du bâtiment. Une revue des différentes stratégies favorisant la conception écoénergétiques des

bâtiments a été réalisée par Pacheco et al. (2012). Les facteurs ayant la plus grande répercussion sur la demande finale en énergie sont l'orientation du bâtiment, la forme et l'indice de compacité.

L'indice de compacité est le rapport entre le volume et la surface d'enveloppe du bâtiment. Cet indice est lié à la capacité du bâtiment à stocker et éviter les pertes de chaleur. Ainsi, un bâtiment très compact, i.e. ayant un rapport volume/surface élevé, présente une surface exposée à d'éventuelles pertes ou gains de chaleur aussi petite que possible. Le facteur de forme est le rapport entre la longueur du bâtiment et la profondeur du bâtiment. Avec l'orientation, ce facteur définit le pourcentage de façades exposées à chaque point cardinal. En combinant l'optimisation de la forme et de l'orientation, il est possible d'obtenir des économies d'énergie jusqu'à 36% (Aksoy & Inalli, 2006). La position optimale pour un bâtiment rectangulaire est celle où le mur le plus long fait face au sud. Dans les climats très froids, il y a plus d'énergie thermique s'échappant à travers l'enveloppe du bâtiment que d'énergie gagnée en augmentant la surface recevant le rayonnement solaire. Par conséquent, l'augmentation du facteur de forme est proportionnelle à l'augmentation de la consommation énergétique pour le chauffage. Dans les climats chauds, cette relation de proportion n'est pas aussi évidente : des études plus poussées doivent être menées pour obtenir une compacité et un facteur de forme du bâtiment optimaux. L'orientation est le paramètre le plus important dans la conception solaire passive car le niveau de rayonnement solaire direct reçu sur la façade du bâtiment dépend de l'azimut. Selon Florides et al. (2002), la demande de chauffage est minimisée, pour un bâtiment carré, lorsque ses quatre façades correspondent aux quatre points cardinaux et, pour un bâtiment rectangulaire, lorsque la plus petite façade fait face à l'est (Florides & al., 2002). Cependant, Pacheco et al. (2012) ont, de leur côté déterminé que la plus grande économie d'énergie est obtenue lorsque les murs les plus longs d'un bâtiment rectangulaire sont tournés de 30% vers le sud (Pacheco & al., 2012). Ceci démontre le besoin d'analyses thermiques poussées pour optimalement orienter un bâtiment selon sa géométrie.

Certaines mesures de conception du bâtiment bénéfiques durant une saison ne le sont pas nécessairement à d'autres moments de l'année. Il faut développer des systèmes d'isolation thermique capables de changer leur configuration ou leurs performances suivant les variations du climat extérieur et des conditions. Par exemple, l'utilisation de dispositifs d'ombrage peut être bénéfique à certaines périodes de l'année même si elles sont contre-productives à d'autres moments (Tzempelikos & K., 2007). Les systèmes d'ombrage passifs, c'est-à-dire fixes, favorisent une réduction de la chaleur acquise par le bâtiment, signifiant une réduction de la charge de

climatisation. Néanmoins, ils présentent l'inconvénient de réduire la disponibilité de la lumière du jour. D'après l'étude de Tzempelikos et Athiénite (2007), les systèmes d'ombrage actifs, c'est-à-dire mobiles, ont ainsi réussi à augmenter la disponibilité annuelle de la lumière du jour de 20 %.

Un coefficient d'ombrage adapté permet d'économiser de l'énergie tout au long de l'année. L'ASHRAE 2017 inclut le coefficient d'ombrage parmi les facteurs à prendre en compte dans le calcul de la demande de chauffage et de refroidissement d'un bâtiment. Ce coefficient est défini comme le rapport du gain de chaleur solaire par un système de fenestration donné dans un ensemble spécifique de conditions. Un des problèmes de l'établissement d'un coefficient d'ombrage fixe est que l'angle d'incidence des rayons solaires n'est pas constant. Yang et al. (2006) ont revu diverses recherches pour développer une méthode ou un système fiable de calcul de ce coefficient d'ombrage. La procédure de calcul de l'ombrage optimal proposée transforme l'économie d'énergie de l'ombrage en été et la pénétration solaire en hiver dans les économies d'énergie des équipements (Yang & al., 2006). Il est à noter que les méthodes conventionnelles d'estimation du rayonnement solaire perdent leur efficacité à mesure que la zone urbaine augmente en densité. Davantage de recherches sont nécessaires pour déterminer le niveau d'ensoleillement ou de rayonnement diffus reçu dans ces zones (Pacheco & al., 2012).

Une étude a été menée à Edmonton, au Canada sur la conception d'un bâtiment favorisant le coût de cycle de vie le plus bas basé sur les technologies disponibles sur le marché (HesarakiI & al., 2018). L'étude de cas présentée permet de tirer les recommandations et conclusions suivantes : (i) inévitablement et de façon générale, plus la zone de fenêtre est petite, plus le coût de cycle de vie de l'enveloppe sera faible; (ii) la conservation de l'énergie passant principalement par l'isolation de l'enveloppe est préférable à l'adaptation des mesures d'énergie (HesarakiI & al., 2018).

Une autre étude a été réalisée à Salonta en Roumanie, où le climat est, comme à Montréal, continental humide sans saison sèche (Classification de Köppen-Geiger, 2018). L'analyse des déperditions thermiques par les ponts thermiques à travers différentes zones critiques s'est effectuée dans un bâtiment d'éducation de quatre étages avec une superficie totale de 4000 m^2 à l'architecture simple. Celle-ci conclut qu'une faible consommation énergétique est optimisée par : (i) la qualité thermique des fenêtres telles qu'un vitrage triple, un cadre en aluminium et une installation conçue pour assurer une étanchéité à l'air appropriée; (ii) l'épaisseur de l'enveloppe

permettant une isolation thermique plus grande; (iii) une construction favorisant l'étanchéité à l'air et (iv) la limitation des ponts thermiques (Boros & al., 2015).

Un autre projet de recherche portant sur l'optimisation de la consommation d'énergie dans les écoles en Jordanie a conclu que le meilleur scénario pour une demande énergétique minimale autant en chauffage qu'en climatisation ainsi qu'un environnement thermiquement confortable à l'intérieur consiste en : (i) un bâtiment orienté nord-sud plutôt qu'est-ouest; (ii) un ratio de la surface de fenêtres par la surface de murs extérieurs de 25% plutôt que de 50%; (iii) des fenêtres avec persiennes plutôt que non ombragées ou ombragées avec surplombs; (iv) un vitrage double à vitre claire plutôt que simple à basse émissivité et (v) avec une isolation augmentée (Al-Arja & Awadallah, 2016).

Les recherches du *Solar Buildings Research Network* (SBRN) dans les bâtiments résidentiels, institutionnels et commerciaux dont le *John Molson School of Business* (JMSB) de l'université Concordia démontre qu'une isolation élevée et qu'une étanchéité à l'air sont nécessaires, mais non suffisantes pour atteindre l'objectif énergétique net zéro en climat canadien. L'intégration de technologies passives et d'une enveloppe extérieure sont essentielles. Les nouvelles technologies de fenêtres, couplées à des écrans thermiques contrôlables permettent d'augmenter significativement les gains solaires et de limiter les déperditions thermiques des surfaces vitrées. Toutefois, favoriser la valeur d'isolation des fenêtres peut être contre-productif (Athienitis, Candanedo, & O'Neill, 2009). L'impact du vitrage sur les performances thermiques d'un bâtiment est complexe. D'autres études quantifient les aspects affectant le flux thermique des parois transparentes, notamment les conditions climatiques du lieu, telles que la température, l'humidité, l'ensoleillement et le vent, ainsi que l'orientation, la forme et la disposition du bâtiment, les matériaux de construction, en particulier leur masse et leurs propriétés d'isolation thermique, la taille et l'emplacement des fenêtres, puis l'ombrage et les propriétés thermiques des systèmes de vitrage (Gusta et al., 2017).

Bien que le vitrage représente une source de ponts thermiques non négligeable, l'enveloppe du bâtiment peut également agir comme paramètre plus ou moins important selon sa méthode de construction. Le mur double ossature permet d'éliminer les ponts thermiques et possède un rendement énergétique largement supérieur à celui du mur traditionnel. La cavité entre les rangées et entre les poteaux est remplie d'isolant. D'un point de vue thermique, cette construction est

avantageuse puisqu'elle est d'épaisseur variable tout en brisant les ponts thermiques. En revanche, les ponts thermiques d'un mur traditionnel peuvent être problématiques (Écohabitation, 2011).

Une étude réalisée au Manitoba sur la consommation d'électricité d'un échantillon des écoles canadiennes regroupée en trois catégories, soit les plus vieux bâtiments (1951), les bâtiments d'âge moyen (1968) et les nouveaux bâtiments (2009). L'analyse révèle une diminution de la consommation de gaz pour le chauffage dans les écoles plus récentes, mais une augmentation étonnamment significative de leur consommation d'électricité. La première conclusion est probablement le résultat du progrès de l'isolation thermique des bâtiments alors que la deuxième conclusion peut être la conséquence de l'utilisation de systèmes CVCA plus complexes. La consommation totale d'énergie s'est avérée être la plus élevée dans les écoles d'âge moyen et était également conforme aux résultats des études précédentes. En comparaison avec d'autres bâtiments scolaires au Canada, les écoles analysées au Manitoba ont utilisé moins d'énergie totale (250,5 kWh/m^2/an) que la moyenne canadienne (472 kWh/m^2/an) (Oufa, Issa, & Merkel, 2016).

2.3.6 Ajout d'une serre sur toit : une piste prometteuse d'optimisation de la consommation d'énergie

Une étude sur la modernisation de bâtiments d'éducation conclut que la meilleure combinaison de mesures pour optimiser l'efficacité énergétique est obtenue principalement grâce à une isolation du toit avec haute résistance thermique et un recouvrement de toiture avec matériaux réfléchissants (Baggio et al., 2017). Les bâtiments d'éducation québécois construits majoritairement il y a 30 à 50 ans sont moins bien isolés que les bâtiments modernes et vont avoir des pertes de chaleur plus importantes par le toit (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013). Il faut noter que les bâtiments de plus de 40 ans sont les plus énergivores au Québec puisque la loi sur l'économie de l'énergie dans le bâtiment a été adoptée en 1980. Cette loi permet de définir les paramètres de calculs pour le chauffage et la climatisation, les facteurs d'isolation de l'enveloppe du bâtiment et les performances minimales des systèmes mécaniques à respecter. La toiture est un point chaud en termes de déperditions thermiques et donc d'opportunité de travaux écoénergétiques. De plus, le toit joue un rôle important en milieu urbain. D'abord, le toit, constitué dans la majorité des cas par une large surface non réfléchissante de couleur foncée, absorbe et emmagasine l'énergie solaire. Ainsi, il participe grandement aux îlots de chaleur, ces zones métropolitaines dont la température est significativement plus élevée que celle des zones rurales environnantes. L'Annexe A détaille

l'enjeu des îlots de chaleur et propose des solutions alternatives aux toitures montréalaises conventionnelles.

L'ajout d'une serre sur le toit constitue une piste prometteuse pour optimiser énergétiquement un bâtiment existant. En effet, cette approche novatrice combine :

- la maximisation de l'espace urbain restreint;
- la récupération des déperditions thermiques du bâtiment d'accueil;
- l'obtention d'une isolation supplémentaire pour le bâtiment d'accueil;
- la réduction des îlots de chaleur en milieu urbain;
- la possibilité d'offrir un milieu de vie enrichissant, sain, productif, éducatif et favorisant de nouvelles approches pédagogiques.

Cette solution concorde avec le Plan québécois des infrastructures 2018-2028 en étant favorable sur le plan de l'apport de lumière naturelle, de la qualité de l'air intérieur et de l'utilisation de systèmes minimisant l'émission de GES (Gouvernement du Québec, 2018b). Il existe déjà plusieurs exemples de serres implantées sur un toit de bâtiment, détaillés en Annexe B, telles que :

- les serres des Fermes Lufa (2020) implantées dans les quartiers d'Ahuntsic et d'Anjou à Montréal, et à Laval (Carrot City Designing for Urban Agriculture, 2014);
- la serre de l'Université Concordia à Montréal (Greenhouse, 2019; Enviromontreal, 2011);
- la serre de la Manhattan School for Children PS 333 à New York (Architects, 2010; Freisinger, 2015; Green Home, NYC 2019).

Puisque les bâtiments construits il y a 30 à 50 ans sont moins bien isolés que les bâtiments modernes, la serre pourra récupérer une partie de l'énergie perdue par le bâtiment au travers du toit. Le bâtiment consommera moins d'énergie puisque le toit sera chaud en hiver et plus frais en été. En éliminant l'isolant du toit du bâtiment, l'échange d'énergie entre les deux structures sera favorisé. De jour, les gains solaires de la serre contribueront à chauffer le bâtiment tandis que, la nuit, les déperditions au toit du bâtiment contribueront à chauffer la serre. Bien que la capacité du système de chauffage du bâtiment ne soit pas suffisante pour garder la serre chaude en hiver québécois, la capacité serait potentiellement suffisante pour l'empêcher de geler. Ainsi, il est estimé

que les serres sur toits économisent environ 50 % d'énergie que les serres au sol et que les bâtiments d'accueil consomment environ 25 % moins d'énergie pour le chauffage (Noël, 2010).

La conception et la construction d'une serre sur un toit en milieu urbain font face à de nombreuses contraintes qui doivent être considérées afin de mener à terme ce type de projet. Parmi ces contraintes, la première est de nature structurale. La structure qui accueillera la serre doit avoir la capacité de recevoir cette charge supplémentaire. De plus, la construction d'une serre en milieu urbain doit respecter le Code National du Bâtiment du Canada (CNBC), qui est plus sévère que le Code National de Construction des Bâtiments Agricoles (CNCBA). Il est important aussi de souligner les enjeux et défis liés à la règlementation municipale, aux coûts, à la pollution lumineuse, à la gestion des déchets et des cultures (espaces restreints, matière organique qui doit être expédiée dans un lieu de traitement approprié), aux systèmes de refroidissement et de déshumidification, au dilemme énergie/ombre (écrans thermiques) et aux normes de sécurité du travail en hauteur, etc. (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013). Ces nombreuses incertitudes démontrent que davantage d'études doivent être menées pour investiguer la faisabilité de cette piste de solution potentiellement pertinente.

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL DE CALCUL ÉNERGÉTIQUE CEEB

3.1 Introduction et structure générale de l'outil de calcul énergétique

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour le développement de l'outil CEEB. Pour rappel, cet outil d'aide à la conception permet de calculer la charge thermique d'un bâtiment existant ou nouveau et d'évaluer différentes stratégies écoénergétiques structurales ou architecturales pour guider les décisions multidisciplinaires. Ceci est notamment important durant les phases préliminaires de conception, où différents corps de métier, non forcément spécialisés en génie thermique, sont impliqués. L'outil de calcul est basé sur les méthodes existantes de calcul de charge thermique horaire dans les bâtiments, soit la Méthode des séries temporelles radiantes RTSM (*Radiant Time Series Method*) et la Méthode du bilan d'énergie HBM (*Heat Balance Method*) détaillées dans les pages suivantes. L'un des objectifs de CEEB est de s'appuyer sur les normes reconnues de l'ASHRAE (2017) : ce travail de mémoire ne vise donc pas le développement de nouvelles équations de calcul thermique. En s'appuyant sur les travaux accomplis dans le domaine du développement d'outils d'aide à la conception simplifiés, l'outil CEEB permet de prendre en compte les conditions météorologiques et les caractéristiques géométriques du bâtiment en détail. La charge thermique est modélisée par un modèle physique simplifié évaluant séparément les contributions des différents composants, avant de les additionner. L'utilisation d'un chiffrier Excel est choisie pour sa versatilité, son accessibilité et sa compatibilité possible avec plusieurs autres programmes ainsi que sa facilité pour l'utilisateur concepteur de vérifier et, au besoin, de modifier le code et son interface. Certaines limitations identifiées aux outils existants de vérification de la consommation énergétique font, au contraire, partie des fonctionnalités retenues pour l'outil de calcul développé. CEEB n'intègre pas les systèmes mécaniques CVCA mais peut être utilisé pour calculer la charge thermique requise pour concevoir ces systèmes. Cet outil est notamment utilisable dans le contexte climatique particulier du Québec.

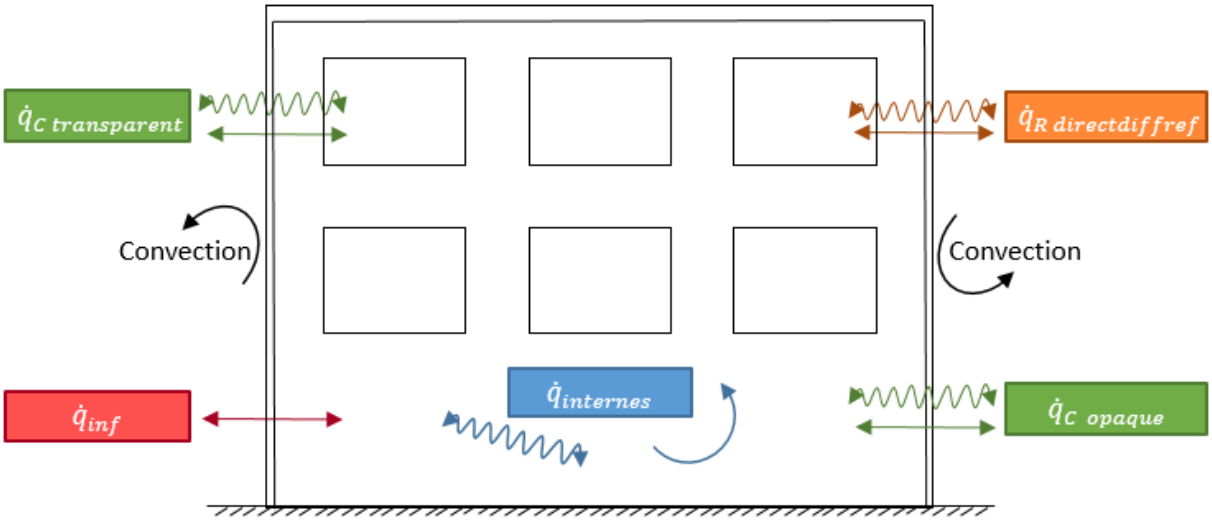
Ainsi, l'outil CEEB est unique et original en étant :

- Pratique et très facilement accessible techniquement ou financièrement du fait de l'emploi d'un chiffrier Excel. Celui-ci permet en outre : (i) l'appropriation et l'accessibilité des normes et méthodes de calcul aux utilisateurs concepteurs (et ainsi limiter le risque d'erreur

de modélisation); et (ii) la modification du code pour faciliter l'étude de techniques de réhabilitation thermiques sur mesure et créatives allant au-delà des méthodes de conception traditionnelles;

- Simplifié avec ses méthodes de calcul éprouvées par la littérature, soit par des études antérieures ou des normes telles l'ASHRAE (2017) et l'ISO (2007);
- Détaillé en laissant une grande liberté quant aux paramètres d'entrée (données météorologiques, dimensions, orientation, superficie des murs, planchers, toit et fenêtres, type et épaisseurs des divers constituants de l'enveloppe, avec ou sans ponts thermiques, avec ou sans écrans thermiques, etc.) contrairement à des archétypes prédéfinis;
- Adapté au contexte québécois grâce à sa prise en compte de paramètres de modélisation thermique plus avancés tels que les ponts thermiques des parois opaques, l'infiltration d'air non contrôlée du bâtiment, les écrans thermiques sur les parois transparentes.

La Figure 3.1 illustre certains des différents transferts thermiques pouvant être pris en compte par l'outil de calcul développé dans le cadre de ce mémoire afin de réaliser le bilan énergétique d'un bâtiment. Ces transferts peuvent s'effectuer par rayonnement, conduction ou convection. La Figure 3.2 illustre les grandes étapes du fonctionnement de l'outil de calcul énergétique créé.



Légende des échanges thermiques

$\dot{q}_{C\ transparent}$: Conduction des fenêtres incluant la convection extérieure

$\dot{q}_{C\ opaque}$: Conduction des parois opaques (murs et toit) incluant la convection extérieure

$\dot{q}_{R\ directdiffref}$: Rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi transmis par les fenêtres

$\dot{q}_{inf}$: Infiltration

$\dot{q}_{internes}$: Rayonnement de courtes λ de l'éclairage et de longues λ des occupants et des équipements

Légende des types de transferts

: Convection

: Radiation

: Conduction

Figure 3.1. Échanges thermiques pris en compte par l'outil de calcul pour réaliser le bilan énergétique d'un bâtiment.

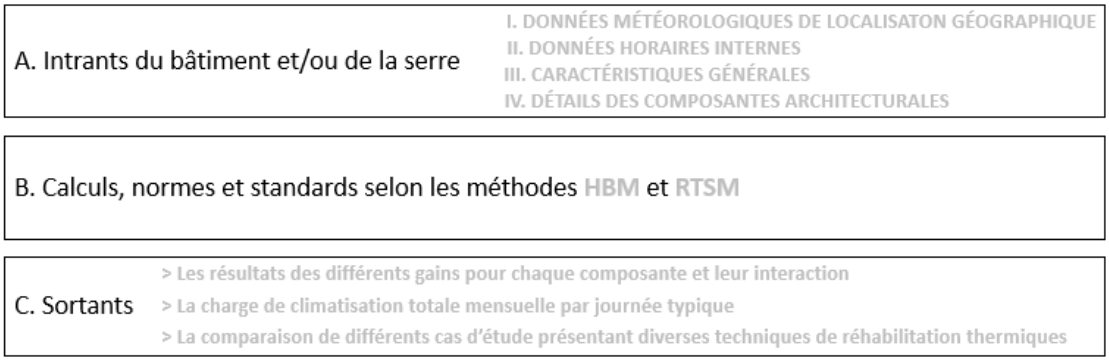


Figure 3.2. Grandes étapes organisationnelles de l'outil de calcul énergétique développé.

A. Intrants

Les données d'entrée nécessaires au fonctionnement de l'outil de calcul énergétique sont :

- la position géographique du site du bâtiment, sa longitude et sa latitude;
- les données météorologiques du site: la température sèche de l'air ambiant; la vitesse du vent; l'humidité relative; la pression atmosphérique totale; les rayonnements solaires direct et diffus;
- les dimensions du bâtiment, i.e. les inclinaisons et les superficies du toit, des dalles, des murs et des fenêtres;
- l'absorptance solaire des faces opaques de l'enveloppe du bâtiment;
- la conductivité thermique des différents matériaux composant chacune des faces de l'enveloppe du bâtiment ainsi que la présence de ponts thermiques;
- la présence d'écrans thermiques tels des rideaux au sein du bâtiment;
- les données horaires liées à l'utilisation du bâtiment: occupants; appareils; éclairage; et température intérieure de consigne.

La Figure 3.3 présente ces différentes données d'entrées, leur rôle et leur intervention dans les calculs énergétiques réalisés par l'outil développé. Celui-ci fonctionne sur un cycle journalier de 24 heures selon une journée typique pour chacun des 12 mois de l'année.

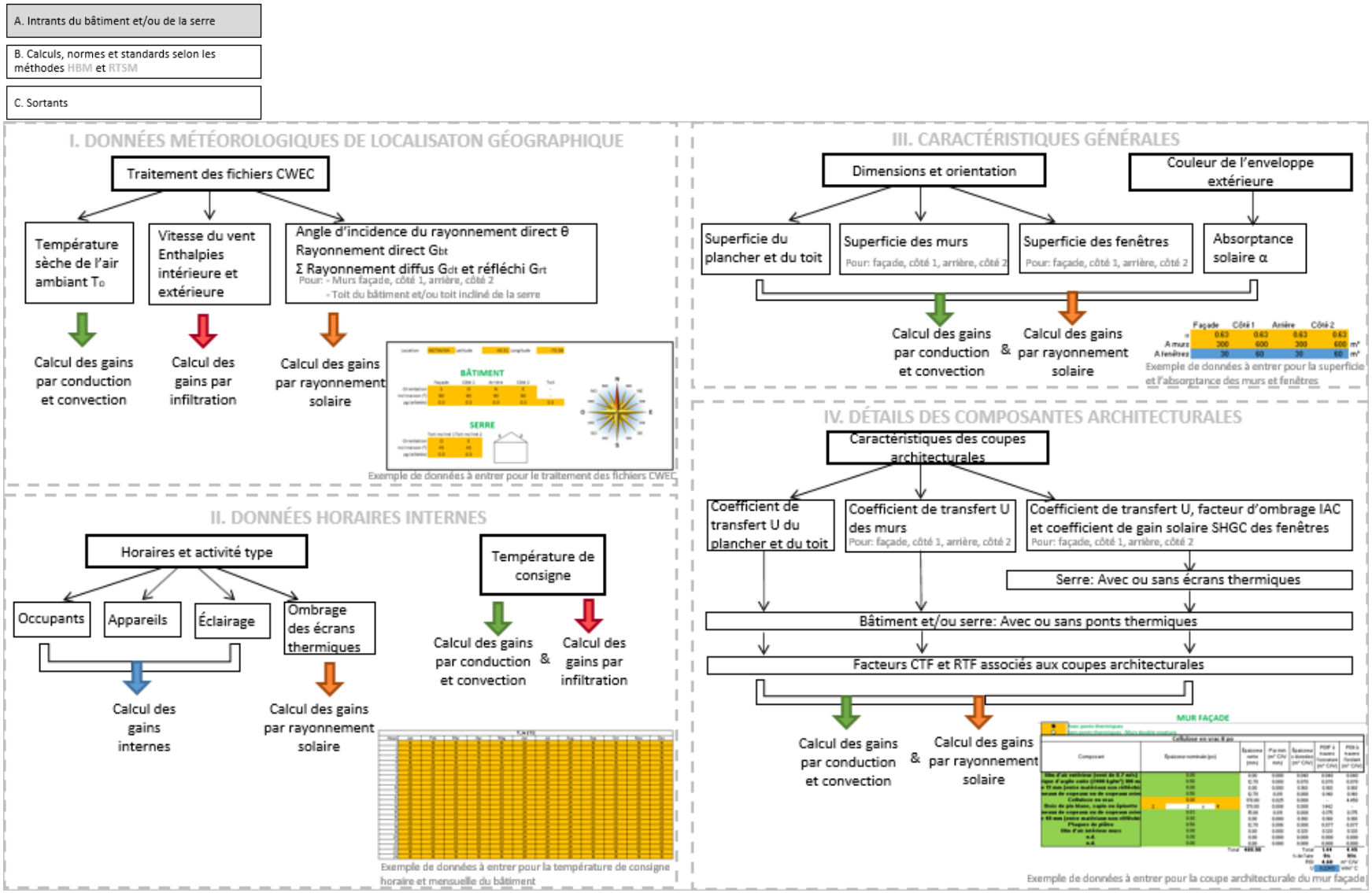
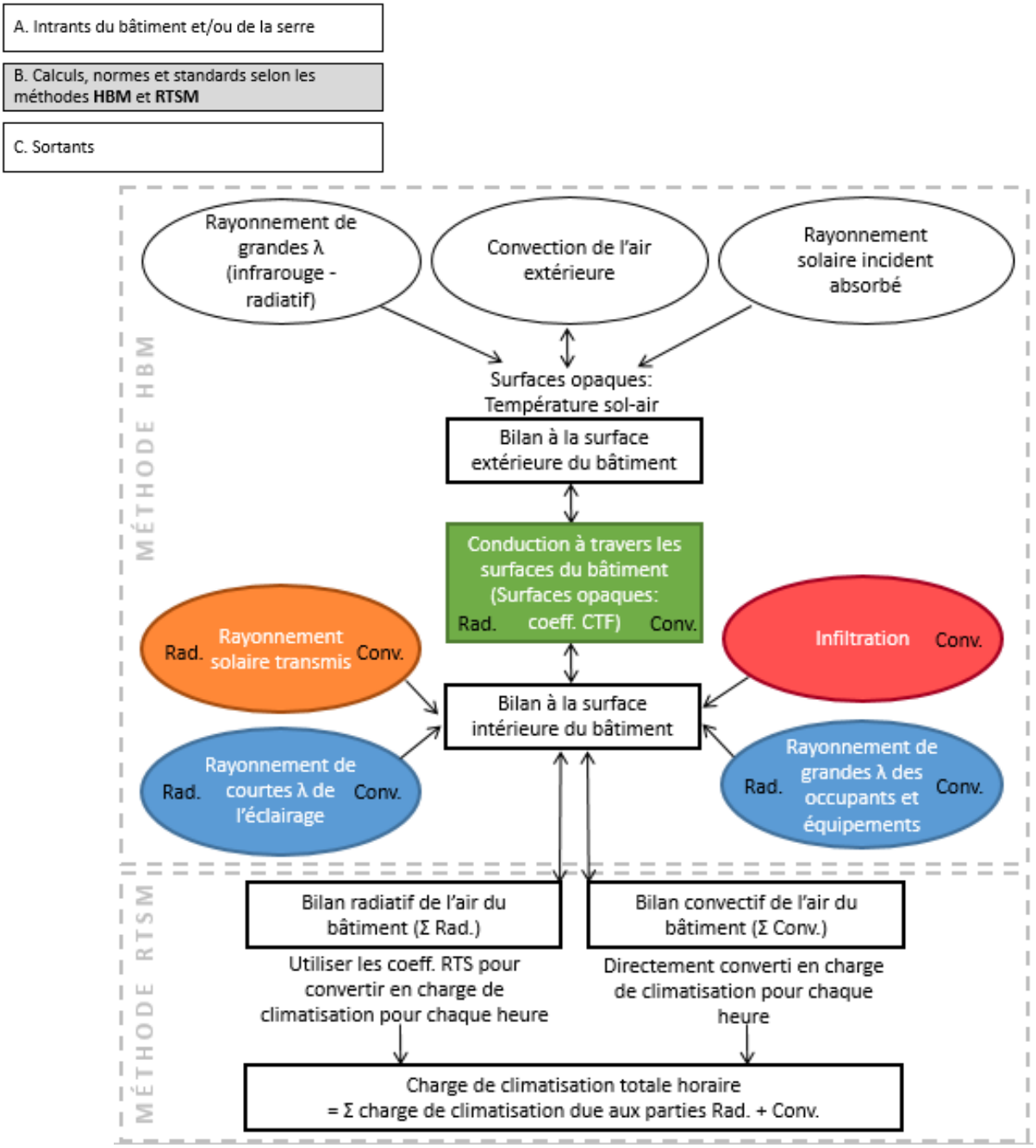


Figure 3.3. Organigramme illustrant les données d'entrées, leur rôle et leur intervention dans les analyses énergétiques réalisée par l'outil CEEB.

B. Calculs, normes et standards

La structure générale et les différentes méthodes de calcul employées par l'outil sont illustrées dans l'organigramme à la Figure 3.4. Ces méthodes sont issues d'une adaptation de l'ASHRAE (2017) et de Michaël Kummert (2017) du cours MEC8254 : Éléments de mécanique du bâtiment (Polytechnique Montréal), chapitre 4 *Transferts de chaleur et de masse à travers l'enveloppe du bâtiment* et chapitre 6 *Calcul de la charge de climatisation*. Les calculs de l'outil reposent sur le concept de zone thermique, i.e. le bâtiment est considéré comme ayant une température interne uniforme. Les échanges thermiques sont donc étudiés entre l'enveloppe du bâtiment et l'extérieur. Les matériaux sont supposés isotropes. Ces hypothèses fondamentales sont communes à la plupart des modèles thermiques de bâtiment (ASHRAE, 2017).



Légende : λ = longueurs d'onde.

Figure 3.4. Organigramme de la méthode de calcul de l'outil énergétique basé sur la méthode du bilan d'énergie inspiré de (ASHRAE, 2017).

L'outil de calcul prend en compte l'amortissement et le déphasage thermiques au sein des composantes du bâtiment en suivant le principe de la RTSM. La RSTM est dérivée de la HBM et permet de rigoureusement tenir compte de l'inertie thermique du bâtiment sans avoir recours à un système itératif complexe d'application (ASHRAE, 2017). La méthode HBM est, avec de petites variations, à la base de la grande majorité des logiciels d'analyse énergétique des bâtiments (ASHRAE, 2017). Les hypothèses suivantes, issues de la HBM et de la RSTM, sont utilisées dans l'outil :

- la température est uniforme aux surfaces des parois de l'enveloppe du bâtiment (HBM);
- le rayonnement est uniforme aux surfaces des parois de l'enveloppe du bâtiment (HBM);
- la conduction est unidimensionnelle (1D) à l'intérieur des parois de l'enveloppe du bâtiment (HBM);
- les calculs sont effectués sur une journée cyclique avec des conditions exactement identiques à la précédente (RTSM).

C. Sortants

L'outil de calcul énergétique proposé permet de déterminer le flux thermique $\dot{q}_{total,t}$ total échangé au travers de l'enveloppe du bâtiment pour une heure t parmi les 24 heures constituant une journée typique d'un mois de l'année. Si $\dot{q}_{total,t}$ est positif, alors le flux thermique va de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment et $\dot{q}_{total,t}$ correspond à la puissance requise pour climatiser le bâtiment à une température fixe T_{rc}. Inversement, si $\dot{q}_{total,t}$ est négatif, alors le flux thermique va de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment et $\dot{q}_{total,t}$ correspond à la puissance requise pour chauffer le bâtiment à une température fixe T_{rc}.

Les autres données de sortie intermédiaires obtenues grâce à l'outil de calcul énergétique pour un bâtiment sont, pour une heure t parmi les 24 heures constituant une journée typique d'un mois de l'année :

- le flux thermique $\dot{q}_{C\ opaque,t}$ transmis par conduction et convection à travers les parois opaques;
- le flux thermique $\dot{q}_{C\ transparent,t}$ transmis par conduction et convection à travers les parois transparentes;

- le flux thermique $\dot{q}_{R\,direct,t}$ du rayonnement solaire direct transmis à travers les parois transparentes;
- le flux thermique $\dot{q}_{R\,diffref,t}$ des rayonnements solaires diffus et réfléchi transmis à travers les parois transparentes;
- le flux thermique $\dot{q}_{inf,t}$ dû aux infiltrations d'air;
- le flux thermique $\dot{q}_{équipement,t}$ dû aux éclairages internes;
- les flux thermiques sensible $\dot{q}^{Sensible}_{occupants,t}$ et latente $\dot{q}^{Latent}_{occupants,t}$ dus aux occupants.

3.2 Obtention des données météorologiques du site du bâtiment

Il est possible de dimensionner le système thermique d'un bâtiment en utilisant les données de conception fournies par l'ASHRAE (2017) pour 8118 localités à travers le monde (dont 103 au Québec). L'Annexe D fournie, à titre d'information, ces conditions de conception pour Montréal. Cependant, ces conditions de conception reposent sur des situations météorologiques extrêmes qui ne sont pas représentatives d'une année complète, et ne permettent pas une analyse détaillée de l'efficacité énergétique annuelle d'un bâtiment. C'est pourquoi l'outil développé au long de ce mémoire utilise les fichiers d'années typiques météorologiques lorsqu'ils sont disponibles au sein d'un pays. Généralement, ces fichiers décrivent, pour chaque mois, les conditions météorologiques d'une journée de 24h (conditions horaires) en se basant sur les mois les plus représentatifs enregistré depuis 15 à 30 ans.

Au Canada, le fichier d'années typiques météorologiques se nomme le CWEC (*Canadian Weather for Energy Calculation*) et a été développé par le Conseil National de Recherches du Canada (Gouvernement du Canada, 2019) à partir de la base de données CWEEDS (*Canadian Weather for Energy Engineering Data Sets*). La base de données CWEEDS regroupe les conditions météorologiques horaires comprenant 492 emplacements canadiens avec au moins 10 années pour la période allant de 1998 à 2014. Son but principal est de fournir des données pour la planification, l'implantation et la conception de systèmes d'énergie renouvelables telles que l'éolien et le solaire, et pour la conception de bâtiments efficaces énergétiquement. Les fichiers CWEC sont créés en sélectionnant douze mois météorologiques typiques issus de CWEEDS.

Les paramètres météorologiques extraits directement des fichiers CWECS sont :

- la température sèche de l'air extérieur T_o;
- la vitesse du vent à la station météorologique v_{met};
- l'humidité relative extérieure hum_o;
- la pression atmosphérique totale au sol p_{atm};
- les rayonnements solaires direct G_{bn} et diffus G_d.

Le rayonnement solaire correspondant aux longueurs d'onde allant de l'ultra-violet à l'infrarouge peut être distingué en trois catégories, tel qu'illustré à la Figure 3.5 : (i) le rayonnement direct G_b correspondant à celui reçu directement du soleil sans avoir été dévié par l'atmosphère; (ii) le rayonnement diffus G_d, i.e. diffusé par l'atmosphère verticalement; et (iii) le rayonnement réfléchi au sol par l'environnement du site du bâtiment G_r diffusé horizontalement. Le rayonnement réfléchi est calculé par l'outil en fonction de l'albédo au sol de l'environnement du site du bâtiment ρ_g.

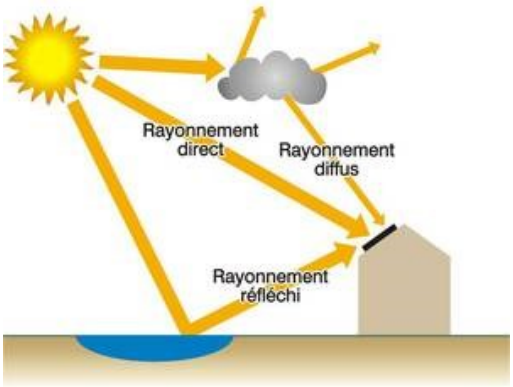


Figure 3.5. Rayonnement impactant une surface quelconque (Systèmes Electro-Energétiques, 2011).

3.3 Rayonnement solaire impactant l'enveloppe du bâtiment

3.3.1 Angle du zénith et de l'azimut solaires

L'angle du zénith θ_z et l'azimut γ_s solaires sont deux paramètres essentiels pour caractériser la position du soleil dans le ciel et calculer le rayonnement impactant une surface quelconque, tel qu'illustré à la Figure 3.5. L'angle du zénith se calcule suivant :

$$\cos\theta_z = \cos\varphi\cos\delta\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta \tag{3.1}$$

où φ est la latitude du site, δ est la déclinaison solaire et ω est l'angle horaire solaire. L'angle horaire solaire ω correspond au déplacement horaire angulaire du soleil au rythme de 15° par heure avec $\omega = 0°$ pour midi heure solaire, et $\omega = 180°$ pour minuit heure solaire. Il s'obtient donc comme étant :

$$\omega = 15(t_s - 12) \tag{3.2}$$

où t_s est l'heure solaire. Étant donné que le soleil met 4 minutes pour parcourir un degré de longitude, la différence Δt en minute entre l'heure solaire et l'heure civile d'hiver est calculée comme étant :

$$\Delta t = 4\Delta L + E \tag{3.3}$$

où ΔL correspond à la différence d'angle entre la longitude du site du bâtiment et celle servant de référence pour le fuseau horaire. E est le paramètre de l'équation du temps permettant de tenir compte du caractère elliptique de l'orbite terrestre (Kummert, communication personnelle, 2017). E est donné par :

$$\begin{aligned} E = 229{,}2\,(&0{,}000075 + 0{,}001868\,\cos B - 0{,}032077\,\sin B \\ &- 0{,}014615\,\cos 2B - 0{,}04089\,\sin 2B) \end{aligned} \tag{3.4}$$

où B est un paramètre donné par :

$$B = \left(\frac{n_h}{24} - \frac{12}{24}\right)\frac{360}{365} \tag{3.5}$$

n_h est le numéro de l'heure dans l'année (avec 8760 heures par an). Il est intéressant de noter que l'équation (3.4) est calibrée pour l'heure de midi de chaque jour, ce qui explique le ratio $12/24$ introduit dans l'équation (3.5). Par ailleurs, la correction apportée par le paramètre E reste toujours inférieure à 15 minutes. D'autres expressions plus performantes de l'équation du temps pourraient être aussi employées (Hughes, Yallop, & Hohenkerk, 1989). Cependant, elles sont ici écartées car elles sont plus complexes et n'impliquent pas de différences majeures dans le contexte de calcul de rayonnement solaire horaire. L'heure civile d'été parfois utilisée par les fichiers météorologiques peut être convertie en heure civile d'hiver en soustrayant une heure.

La déclinaison solaire δ correspond à l'angle entre les rayons solaires et l'équateur. Cet angle varie au cours de l'année à cause de l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre, et est donné par :

$$\begin{aligned}\delta = \frac{180}{\pi}(&0{,}006918 - 0{,}399912\ \cos B + 0.070257\ \sin B \\ &- 0{,}006758 \cos 2B + 0{,}000907 \sin 2B \\ &- 0{,}002697 \cos 3B + 0{,}001480 \sin 3B)\end{aligned} \tag{3.6}$$

La Figure 3.6 illustre certains angles importants pour décrire la position apparente du soleil et les relations géométriques entre un plan quelconque du bâtiment analysé et les rayons du soleil.

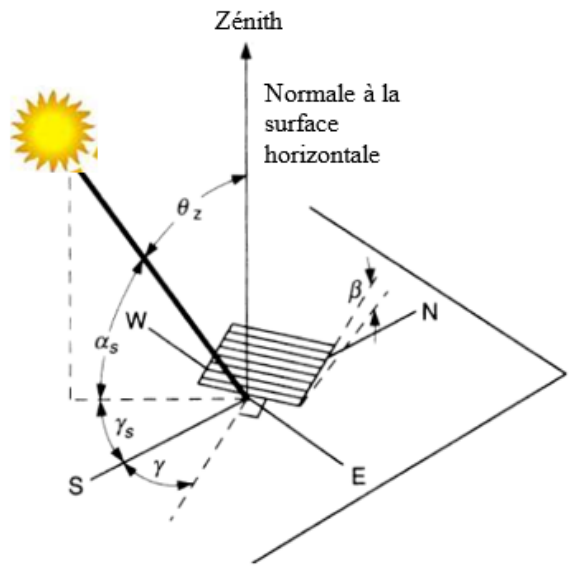


Figure 3.6. Paramètres définissant la position du soleil par rapport à une surface inclinée (Kummert, communication personnelle, 2017).

L'azimut solaire se calcule selon l'équation :

$$\gamma_s = \frac{\omega}{|\omega|}\left|\text{acos}\left(\frac{\cos\theta_z \sin\varphi - \sin\delta}{\sin\theta_z \cos\varphi}\right)\right| \tag{3.7}$$

3.3.2 Rayonnement solaire réfléchi par le sol de l'environnement du bâtiment

Le rayonnement G_r réfléchi par le sol de l'environnement du site du bâtiment, supposé horizontal tel qu'illustré à la Figure 3.5, est calculé comme étant :

$$G_r = \rho_g(G_b + G_d) \tag{3.8}$$

où G_b est le rayonnement direct incliné tenant compte de l'angle du zénith solaire θ_z. G_b est donné par :

$$G_b = \max(0;\ G_{bn}\cos\ \theta_z) \tag{3.9}$$

Il est intéressant de noter que l'albédo ρ_g peut tenir compte du caractère urbain ou non de l'environnement du bâtiment.

3.3.3 Rayonnements solaires direct, diffus et réfléchi impactant une paroi de l'enveloppe du bâtiment

Considérons une paroi de l'enveloppe du bâtiment d'inclinaison β par rapport au sol horizontal et d'azimut géographique γ tel qu'illustré à la Figure 3.5. La part de rayonnement solaire diffus, i.e. diffusé verticalement par l'atmosphère, perçue par la paroi est alors donnée par :

$$G_{dT} = \max\left(0;\ G_d \frac{(1+\cos\beta)}{2}\right) \tag{3.10}$$

De même, la part de rayonnement réfléchi par le sol de l'environnement du site du bâtiment, diffusé horizontalement, perçue par la paroi, est donnée par :

$$G_{rT} = \max\left(0;\ G_r \frac{(1-\cos\beta)}{2}\right) \tag{3.11}$$

Enfin, la part de rayonnement solaire direct, perçue par la paroi, est donnée par :

$$G_{bT} = \max(0;\ G_{bn}\cos\theta) \tag{3.12}$$

où θ est l'angle d'incidence du rayonnement direct sur une surface quelconque donné par :

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta \cos\ (\gamma_s - \gamma) \tag{3.13}$$

Il est intéressant de noter que, de par leur origine physique (le sol et l'air ne réfléchissent pas les ultraviolets), les rayonnements diffus et réfléchi sont caractérisés par de plus grandes longueurs d'ondes (lumière et infrarouge) que le rayonnement direct (ultraviolet, lumière et infrarouges).

3.4 Flux thermique au travers des parois opaques

3.4.1 Bilan thermique à l'extérieur de la paroi : température sol-air

Les parois opaques de l'enveloppe d'un bâtiment peuvent inclure les murs, le toit et le plancher. Avant d'analyser le flux thermique transféré par conduction au sein de ces parois opaques, il est nécessaire d'abord d'effectuer un bilan thermique à l'extérieur de celles-ci. La Figure 3.7 illustre les différents modes de transfert thermique à l'extérieure d'une paroi opaque : les rayonnements solaires direct, diffus et réfléchi calculés précédemment; la convection due à l'air extérieur; et la

radiation rayonnée par la paroi opaque dans le domaine infrarouge due à sa chaleur interne. Ces trois modes de transfert thermique peuvent alors être convertis en un unique mode de transfert thermique convectif équivalent en corrigeant la température sèche de l'air extérieur T_o en une température dite sol-air T_e (Kummert, communication personnelle, 2017). Cette température sol-air est donnée par :

$$T_e = T_o + \frac{\alpha(G_{bT} + G_{dT} + G_{rT})}{h_o} - \frac{\varepsilon\, \delta R}{h_o} \tag{3.14}$$

où α est l'absorptance de la paroi, h_o est le coefficient de convection et de radiation combiné entre la paroi et l'air extérieur, ε est l'émissivité de la paroi, et δR est un facteur permettant de tenir compte de la différence de température entre la surface extérieure de la paroi et son environnement visible. Le terme $\frac{\alpha(G_{bT}+G_{dT}+G_{rT})}{h_o}$ permet alors de tenir compte du gain énergétique de la paroi lié à l'absorption d'une partie du rayonnement solaire. De même, le terme $\frac{\varepsilon\, \delta R}{h_o}$ permet de tenir compte de la perte énergétique de la paroi liée à la radiation réémise par celle-ci dans le domaine infrarouge. Deux situations permettent alors de comprendre le rôle du paramètre correction δR :

- Si la paroi est verticale, la température à sa surface extérieure est approximativement égale à celle de son environnement visible, i.e. la surface extérieure des bâtiments voisins ou la végétation. Le rayonnement infrarouge émis par la paroi est donc compensé par celui émis par son environnement, les deux se comportant approximativement comme des corps noirs. δR vaut donc zéro dans ce cas. Il est important de noter dans ce cas que le rayonnement infrarouge émis par l'environnement est issu de la chaleur interne de celui-ci et est donc différent du rayonnement solaire réfléchi.
- Si la paroi est horizontale, elle fait face au ciel (son environnement visible). Si celui-ci est clair, la différence de température entre celui-ci et la surface extérieure de la paroi s'avère significative. La paroi perd donc en rayonnement infrarouge un flux thermique de $\frac{\varepsilon\, \delta R}{h_o}$ avec $\delta R \approx 63$ W/m^2. Si $\varepsilon = 1$ et h_o vaut approximativement 17 W/m^2-K pour des vitesses de vents intermédiaires, alors $\frac{\varepsilon\, \delta R}{h_o} = 4$°C.

Ce principe de température sol-air est notamment recommandé par la méthode RTSM. Il est à noter que la convection dans la lame d'air derrière les écrans pare-pluie n'est pas considérée.

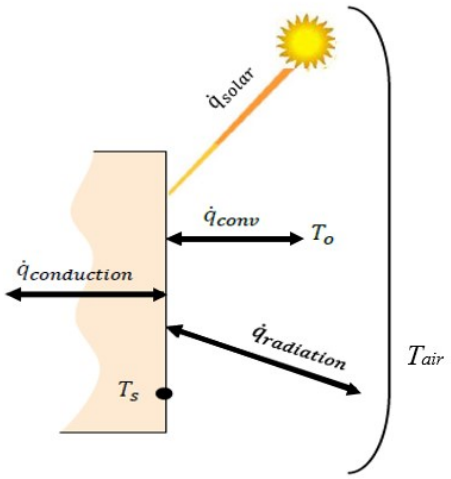


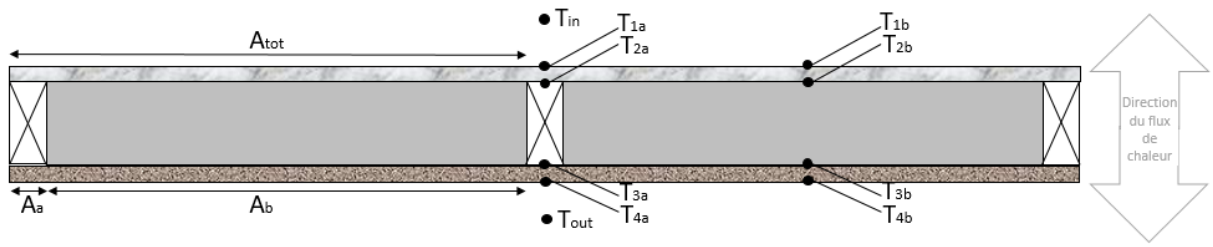
Figure 3.7. Modes de transfert de chaleur à la surface extérieure d'une paroi (Kummert, communication personnelle, 2017).

3.4.2 Conduction au sein d'une paroi opaque comportant des ponts thermiques

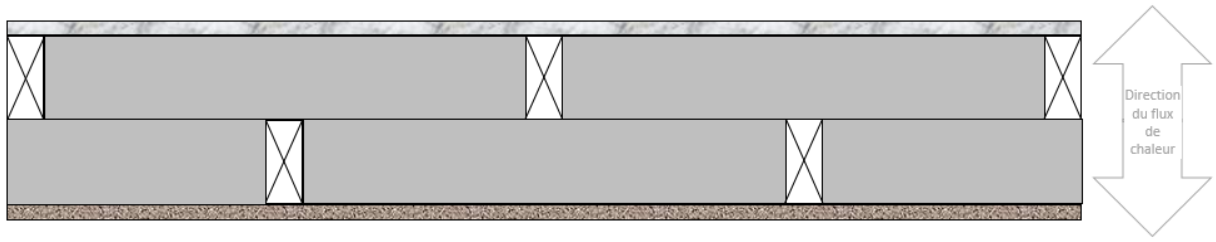
Du fait de spécificités architecturales ou de la présence de ponts thermiques particuliers, le coefficient de transfert de chaleur global U_{paroi} d'une paroi opaque peut ne pas être disponible dans les recommandations de la littérature, tel l'ASHRAE (2017). Pour rappel, les ponts thermiques résultent de couches non-homogènes tel le prolongement d'un plancher à travers un mur pour soutenir un balcon. La Figure 3.8 présente une section de mur pouvant être adoptée au Québec : (a) avec simple ossature et ponts thermiques; et (b) avec double ossature sans pont thermique. Il est important de noter que la construction à double ossature en bois (Figure 3.8 (b)) constitue un assemblage rarement utilisé en construction. La Figure 3.8 présente ici des exemples de section de mur afin d'illustrer les méthodes employées par l'outil pour calculer les transferts par conduction au sein d'une paroi opaque pouvant comporter des ponts thermiques. Cependant, ces mêmes méthodes de calcul peuvent être utilisés avec des assemblages différant de ces exemples, avec ou sans pont thermiques, avec divers matériaux (briques, béton, isolant, mortier, etc.) selon des configurations variables. Le coefficient de transfert de chaleur global U_{paroi} peut être obtenu grâce à l'équation suivante :

$$\frac{1}{U_{paroi}} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_i} + R_{paroi} \tag{3.15}$$

où h_i est le coefficient de convection entre la paroi et l'air intérieur au bâtiment, et R_{paroi} est la résistance à la conductivité thermique de la paroi. L'outil de calcul énergétique peut alors déterminer R_{paroi} en suivant la norme ISO 14683-2007 (ISO, 2007) selon deux méthodes possibles : (i) méthode des surfaces isothermes; ou (ii) méthode des surfaces non-isothermes.



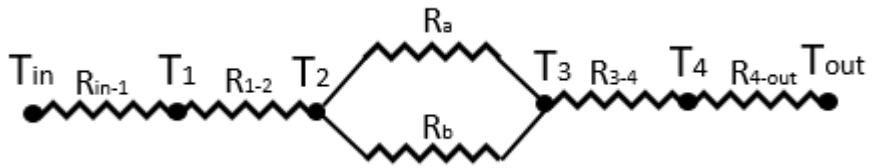
(a)



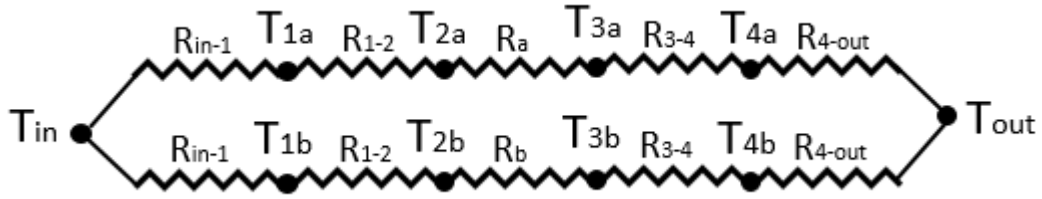
(b)

Figure 3.8. Section de mur pouvant être adoptée au Québec : (a) avec simple ossature et ponts thermiques; et (b) avec double ossature sans pont thermique

Considérons la portion de mur présentée à la Figure 3.8 (a) de section A_{tot}. Ce mur comporte en son milieu un poteau en bois de section A_a et un mur isolant de section A_b. Cette portion de mur peut donc être simplifiée, en considérant un transfert thermique unidimensionnel, comme indiqué à la Figure 3.9 (a) et (b) avec les méthodes isotherme et non-isotherme, respectivement.



(a)



(b)

Figure 3.9. Résistance thermique de la section de mur de la Figure 3.8 : (a) méthode isotherme; et (b) méthode non-isotherme

Dans le cas de la méthode isotherme (Figure 3.9 (a)), la résistance de la section de mur R_{paroi} est donnée par :

$$R_{paroi} = R_{1-2} + R_{eq} + R_{3-4} \tag{3.16}$$

où R_{1-2} et R_{3-4} sont les résistances thermiques des parois de mur comprises entre les températures T_1 et T_2, et T_3 et T_4, respectivement, et :

$$R_{eq} = \frac{A_{tot}}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} \tag{3.17}$$

avec R_a et R_b les résistances thermiques du poteau de bois et du mur isolant, respectivement. Il est intéressant de noter que :

$$R_a = \frac{L_a}{k_a} \tag{3.18}$$

où L_a est l'épaisseur du poteau de bois dans la direction du flux thermique, et k_a est la conductivité thermique du bois.

Dans le cas de la méthode non-isotherme (Figure 3.9 (b)), la résistance de la section de mur R_{paroi} est obtenue par l'équation :

$$\frac{A_{tot}}{R_{paroi}} = \frac{A_a}{R_{1-2} + R_a + R_{3-4}} + \frac{A_b}{R_{1-2} + R_b + R_{3-4}} \tag{3.19}$$

3.4.3 Effet de l'inertie thermique sur le flux total transmis par les parois opaques

Du fait de la variation horaire des conditions météorologiques, le flux thermique échangé par une paroi opaque entre les airs extérieur et intérieur $\dot{q}_{C\ opaque}$ varie au cours de la journée. Or, du fait de son caractère conducteur, la paroi opaque va exercer une résistance au changement de température à mesure que le flux thermique varie : c'est son inertie thermique. La paroi opaque va progressivement emmagasiner et libérer l'énergie thermique en fonction de cette inertie, et un déphasage est induit au sein du flux thermique échangé. Ainsi, en se basant sur la RTSM (ASHRAE, 2017), le flux thermique échangé à l'heure t par une paroi opaque de section A_{tot} entre les airs extérieur et intérieur $\dot{q}_{C\ opaque,t}$ est donné par :

$$\dot{q}_{C\ opaque,t} = \sum_{j=0}^{23} C_j\ U_{paroi}\ A_{tot}\ \left(T_{e,t-j} - T_{rc}\right) \tag{3.20}$$

où T_{rc} est la température fixée à l'intérieur du bâtiment, $T_{e,t-j}$ est la température sol-air de l'heure $t-j$, et C_j est le facteur CTS (*Conduction Time Series Factors*) correspondant à la proportion d'énergie thermique emmagasinée à l'heure $t-j$ et libérée à l'heure t par la paroi opaque. Les facteurs CTS sont donc une correction apportée au flux thermique calculé en régime permanent pour tenir compte des aspects pseudo-dynamiques sur une période de 24h. Les facteurs CTS peuvent être trouvés en fonction du type de paroi opaque dans l'ASHRAE (2017).

3.5 Flux thermique au travers des parois transparentes

3.5.1 Distinction des différents flux thermiques

Contrairement au cas d'une paroi opaque, les flux thermiques s'opérant au sein d'une paroi transparente par conduction-convection et par radiation sont traités séparément. En effet, les flux thermiques correspondant aux rayonnements direct, diffus et réfléchi vont essentiellement traverser la paroi transparente sous forme d'ondes électromagnétiques : aucune conduction ou déphasage

thermiques n'ont lieu. La proportion de rayonnement traversant la paroi transparente sans ombrage interne ou externe s'exprime avec le coefficient de gain solaire $SHGC$ (*Solar Heat Gain Coefficient*). Les rayonnements diffus et réfléchi sont caractérisés par des propriétés différentes du rayonnement direct (longueur d'onde, angle d'incidence, effet de l'ombrage). La proportion de rayonnements diffus et réfléchi traversant la paroi transparente sera donc différente de celle de rayonnement direct. Au final, trois flux thermiques au travers d'une paroi transparente sont donc traités de manière découplée :

- flux thermique dû au rayonnement solaire direct;
- flux thermique dû aux rayonnements solaires diffus et réfléchi;
- flux thermique dû aux convections extérieure et intérieure et à la conduction à travers la paroi transparente.

3.5.2 Rayonnement direct

La proportion de rayonnement direct traversant la paroi transparente sans ombrage interne ou externe s'exprime avec le coefficient de gain solaire $SHGC_{direct}(\theta)$. Ce coefficient peut être trouvé en fonction du type de paroi transparente dans l'ASHRAE (2017) et dépend de l'angle d'incidence θ du rayonnement direct calculé à l'équation (3.13). En effet, les propriétés optiques des vitrages sont sensibles à l'angle d'incidence θ des rayons solaires. Les valeurs de $SHGC_{direct}(\theta)$ y sont données pour la paroi transparente au complet, y compris le cadre. Par ailleurs, le rayonnement direct n'impacte la paroi transparente d'aire A_{tot} que dans l'aire où il n'y a aucun ombrage, notée A_{sunlit}. Enfin, le rayonnement direct perçu à l'intérieur du bâtiment peut être atténué par un ombrage intérieur tel des rideaux ou un store. Cette atténuation est prise en compte par le coefficient IAC (*Indoor Attenuation Coefficient*) qui vaut 1 lorsqu'aucun ombrage intérieur n'est présent. Le flux thermique dû au rayonnement solaire direct traversant la paroi transparente est alors donné, à l'heure t, par :

$$\dot{q}_{R\ direct,t} = IAC\ \ A_{sunlit}\ SHGC_{direct}(\theta)\ G_{bT} \tag{3.21}$$

3.5.3 Rayonnement diffus et réfléchi

La proportion de rayonnements diffus et réfléchi traversant la paroi transparente sans ombrage interne ou externe s'exprime avec le coefficient de gain solaire $SHGC_{diffref}$. Ce coefficient peut être trouvé en fonction du type de paroi transparente, considérée au complet avec le cadre, dans l'ASHRAE (2017). Les rayonnements diffus et direct perçu à l'intérieur du bâtiment sont supposés isotropes, i.e. ils n'ont pas d'angle d'incidence et ne sont pas affectés par la présence d'ombrage extérieur. Le flux thermique dû aux rayonnements solaires diffus et réfléchi traversant la paroi transparente est alors donné, à l'heure t, par :

$$\dot{q}_{R\ diffref,t} = IAC\ A_{tot}\ SHGC_{diffref}\ (G_{dT} + G_{rT}) \tag{3.22}$$

3.5.4 Convection et conduction

Le coefficient de transfert de chaleur par convection et conduction global U_{paroi} d'une paroi transparente, considérée au complet avec le cadre, peut être trouvé au sein de la littérature (ASHRAE, 2017) ou déterminé en suivant la méthode présentée à la section 3.4.2. U_{paroi} peut aussi être fourni par le manufacturier ou estimé avec les logiciels WINDOW et THERM (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2019). Les parois transparentes ont généralement une inertie thermique négligeable du fait de leur faible épaisseur. Un régime permanent est donc considéré, et le flux thermique dû aux convections extérieure et intérieure et à la conduction à travers la paroi transparente est donné, à l'heure t, par :

$$\dot{q}_{C\ transparent,t} = U_{paroi}\ A_{tot}\ (T_o - T_{rc}) \tag{3.23}$$

Comme les flux thermiques dus au rayonnement solaire sont traités séparément, la température sèche de l'air extérieur T_o est ici considérée contrairement au cas des parois opaques où la température sol-air T_e est utilisée.

3.6 Infiltrations d'air

Les infiltrations, i.e. l'air qui entre ou sort du bâtiment de manière non contrôlée, provoquent un échange thermique. Deux conditions sont nécessaires pour la présence d'infiltrations : (i) d'une part, il faut un chemin pour l'air, soit une fente, une ouverture, un tuyau, etc. ; (ii) d'autre part, il

faut une force motrice, soit une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur. Cette force motrice peut être causée par le vent ou l'effet de cheminée tel qu'illustré à la Figure 3.10. L'air échangé entre le bâtiment et l'extérieur par un système ventilation ou de chauffage l'est de manière mécanique et n'est pas considéré comme une infiltration. Les formulations théoriques utilisées pour déterminer le flux thermique dû aux infiltrations de cette section spécifique se base sur Michaël Kummert (2017) du cours ENE6510 : Modélisation énergétique des bâtiments (Polytechnique Montréal), chapitre 3 Infiltration. Il est à noter que la charge due à l'apport d'air frais contrôlé n'est pas considérée dans l'outil de calcul développé puisque ce paramètre relève de systèmes mécaniques et que ces derniers ne sont pas intégrés. Cette composante essentielle pourra être prise en compte lors d'une étape ultérieure du développement du CEEB qui devra permettre le dimensionnement des systèmes CVCA, tel qu'indiqué en Introduction. Cette ventilation forcée devra répondre aux standards ASHRAE 62.1 pour les bâtiments autres que résidentiels, selon deux requis : (i) dégagement d'air; et (ii) renouvellement d'air.

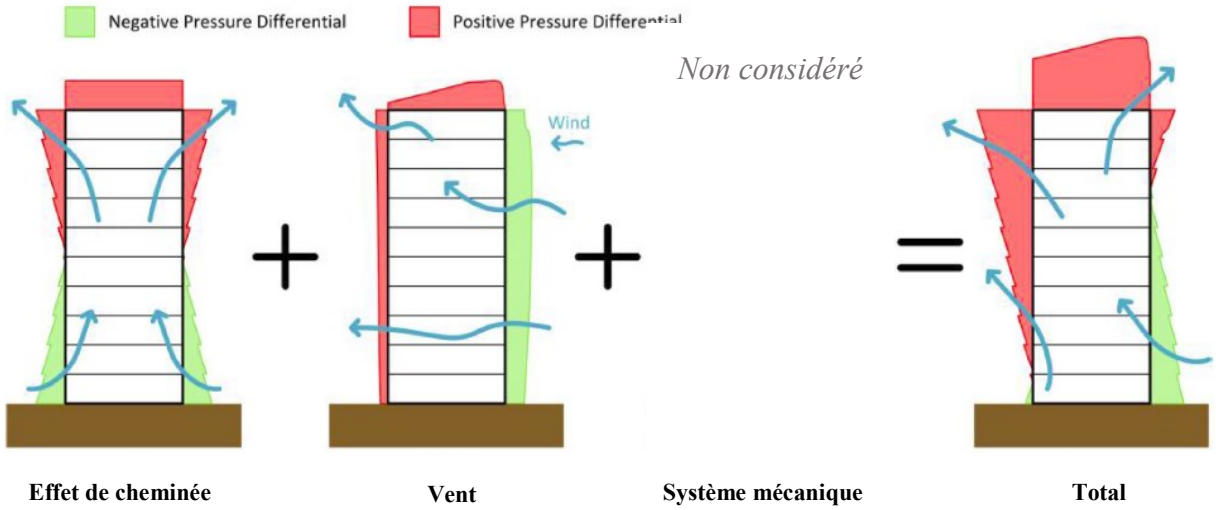


Figure 3.10. Type d'infiltrations d'air dans un bâtiment en climat froid adapté de (RDH Building Engineering Ltd., 2013).

La pression exercée par le vent dépend de sa vitesse $v(z)$ qui varie selon l'altitude z où on l'observe tel qu'illustré à la Figure 3.9. La vitesse du vent mesurée à une station météo v_{met} est souvent mesurée à une altitude $z_{met} = 10$ m. La conversion entre v_{met} et $v(z)$ s'obtient grâce à l'équation :

$$v(z) = v_{met}\left(\frac{\delta_{met}}{z_{met}}\right)^{\alpha_{met}}\left(\frac{z}{\delta}\right)^{\alpha} \tag{3.24}$$

où δ et δ_{met} sont les hauteurs au niveau du bâtiment et de la station météorologique pour lesquelles le profil de vitesse de vent devient constant, tel qu'illustré à la Figure 3.11. α et α_{met} sont des facteurs correctifs pour tenir compte de l'effet du type de terrain au niveau du bâtiment et de la station météo, respectivement. Les valeurs de δ, δ_{met}, α et α_{met} sont disponibles en Annexe E selon quatre catégories de terrain.

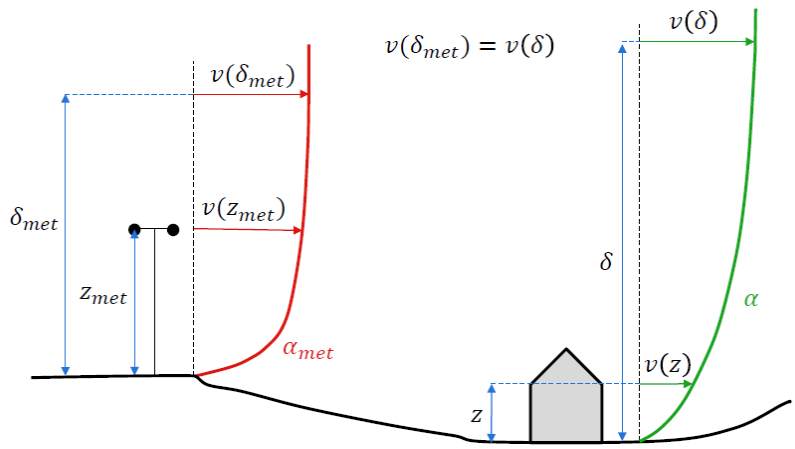


Figure 3.11. Profils de vitesse du vent exponentiels pour la station météorologique et pour le bâtiment (Kummert, communication personnelle, 2019).

Plus la température de l'air extérieur T_o diminue, plus la masse volumique correspondante $\rho_o(T_o)$ augmente, et inversement. La masse volumique de l'air intérieur $\rho_{rc}(T_{rc})$ varie aussi en fonction de la température T_{rc} suivant le même principe. Par ailleurs, d'après le principe de Bernouilli, la pression de l'air diminue avec l'augmentation de l'altitude. En supposant que la température extérieure ne varie pas en fonction de l'altitude (hypothèse raisonnable pour des bâtiments de faible et moyenne hauteur), la différence de pression Δp entre les pressions extérieure $p_o(z)$ et intérieur $p_{rc}(z)$ à une hauteur z, i.e. $\Delta p(z) = p_o(z) - p_{rc}(z)$, est donnée par :

$$\Delta p(z) = (p_{atm} - \rho_o(T_o)\, g\, z) - (p_{atm} - \rho_{rc}(T_{rc})\, g\, z) \tag{3.25}$$

où g est la constante de gravité. L'équation (3.25) permet alors de décrire de manière physique l'effet de cheminé.

L'emploi de l'équation (3.25) nécessite de connaitre l'aire exacte des ouvertures pour calculer le débit d'infiltration. Or, cette information nécessite un test d'infiltrométrie qui est rarement disponible en pratique. Aussi, l'outil développé considère l'effet de cheminé de manière simplifiée en suivant le modèle de Sherman-Grimsrud (ASHRAE, 2017) qui donne le débit d'infiltration au travers de l'enveloppe du bâtiment comme étant :

$$\dot{V}_{inf} = \frac{ELA_4}{1000}\sqrt{C_s|T_o - T_{rc}| + C_w v(z)^2} \tag{3.26}$$

où C_s et C_w sont les coefficients d'effet de cheminée dont les valeurs sont disponibles au sein de l'ASHRAE (2017), et en Annexe E, et ELA_4 est l'air d'infiltration effective (*Effective Leakage Area*) pour $\Delta p = 4$ Pa. Les termes $C_s|T_o - T_{rc}|$ et $C_w v(z)^2$ permettent donc de tenir compte de l'effet de cheminée adapté de l'équation (3.25) et de la vitesse du vent corrigée au besoin par l'équation (3.24), respectivement.

L'aire d'infiltration effective, ELA_4, peut être calculée en utilisant un logiciel spécifique simulant un essai d'infiltrométrie comme Residential Energy Dynamics (2016), tel que décrit en Annexe E. Ce type de logiciel nécessite la superficie et le volume du bâtiment, et la surface de son enveloppe. Il nécessite aussi l'exposant de pression n correspondant aux orifices par lesquels passent les infiltrations d'air, généralement considéré égal à 0,65 (ASHRAE 2017), et le taux de fuite normalisé à une pression différentielle de 50 Pa par mètre carré NLR_{50} (*Normalized Leakage Rate*) (voir l'Annexe B pour le détail du calcul). Le flux thermique issu des infiltrations d'air est alors calculé, à l'heure t, comme étant :

$$\dot{q}_{inf,t} = \dot{V}_{inf}\, \rho\, (H_o - H_{rc}) \tag{3.27}$$

où ρ est la densité moyenne de l'air prise égale à 1,204 kg/m^3 (Kummert, communication personnelle, 2019), et H_o et H_{rc} sont les enthalpies de l'air à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment. Le flux thermique issu des infiltrations d'air $\dot{q}_{inf}$ ne subit aucun déphasage et est intégralement transféré à l'intérieur du bâtiment sous forme convective. Plusieurs logiciels tel Engineering Equation Solver (2020) sont disponibles pour calculer les propriétés thermodynamiques de fluides

ou de mélanges. L'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment peut être considéré comme un mélange air-vapeur d'eau. Son enthalpie peut être calculée en connaissant sa température sèche, la pression atmosphérique et l'humidité relative correspondantes, soit : à l'extérieur T_o, p_{atm} et hum_o fournis par les fichiers de données météorologiques; à l'intérieur T_{rc}, p_{atm} et l'humidité relative intérieure hum_{rc} fixée à 50% pour des conditions optimales de confort. Ces logiciels peuvent donc être employés pour calculer les enthalpies H_o et H_{rc}.

3.7 Gains internes thermiques

3.7.1 Chaleurs sensible et latente des occupants

Les gains internes thermiques provenant des occupants, de l'éclairage, et des autres appareils électriques représentent, de plus en plus, une grande partie du flux thermique apporté aux bâtiments modernes, alors que l'isolation de leurs enveloppes devient de plus en plus performante en réponse aux nouvelles réglementations. L'outil développé considèrent les gains internes liés aux occupants, à l'éclairage et aux équipements. Les êtres humains occupants apportent de la chaleur sensible liée à la température du corps et de la chaleur latente en produisant de la vapeur d'eau en respirant et transpirant. Le gain interne thermique sensible lié aux occupants s'obtient simplement, à l'heure t, par l'équation :

$$\dot{q}^{Sensible}_{occupants,t} = n_{occupants}\, w^{Sensible}_{occupants} \tag{3.25}$$

où $n_{occupants}$ est le nombre d'occupants et $w^{Sensible}_{occupants}$ est la puissance thermique sensible dégagée par un occupant dont la valeur peut être estimée grâce à l'ASHRAE (2017). De même, Le gain interne thermique latent lié aux occupants s'obtient, à l'heure t, par l'équation :

$$\dot{q}^{Latent}_{occupants,t} = n_{occupants}\, w^{Latent}_{occupants} \tag{3.26}$$

où $w^{Latent}_{occupants}$ est la puissance thermique latente dégagée par un occupant dont la valeur peut être estimée grâce à l'ASHRAE (2017).

3.7.2 Équipements

D'une manière générale, le gain interne thermique instantané dû à l'éclairage s'exprime comme étant, à l'heure t,

$$\dot{q}_{éclairage,t} = F_{ul} F_{sa}\, w_{éclairage} \tag{3.27}$$

où $w_{éclairage}$ est la puissance totale d'éclairage installée pouvant être obtenue à partir des valeurs données par les manufacturiers pour l'ensemble des lampes installées, F_{ul} est le facteur d'utilisation et F_{sa} est un facteur spécial. Le facteur d'utilisation F_{ul} correspond au rapport entre la puissance d'éclairage utilisée dans les conditions de conception par rapport à la puissance totale installée. F_{ul} vaut usuellement 1. Le facteur spécial F_{sa} correspond au rapport entre la puissance consommée par le luminaire au complet sur la puissance nominale de la lampe pouvant être obtenu à partir des valeurs données par les manufacturiers. Dans le cas où il n'est pas possible de dénombrer exactement les luminaires, il est possible d'utiliser une estimation de la densité de puissance d'éclairage par unité de surface *LPD* (*Lighting Power Density*) fournie par l'ASHRAE (2017). Les autres gains internes liés aux appareils sont fournis par l'ASHRAE (2017).

3.8 Bilan thermique à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment

Plusieurs flux thermiques correspondant à un gain ou une perte thermique à l'intérieur de l'enveloppe du bâtiment ont été calculés à l'heure t :

- flux thermique dû au rayonnement solaire, à la radiation extérieure, aux convections extérieure et intérieure, et à la conduction au travers des parois opaques $\dot{q}_{C\ opaque,t}$;
- flux thermique au travers des parois transparentes dû au rayonnement solaire direct $\dot{q}_{R\ direct,t}$;
- flux thermique au travers des parois transparentes dû aux rayonnements solaires diffus et réfléchi $\dot{q}_{R\ diffref,t}$;
- flux thermique dû aux convections extérieure et intérieure et à la conduction au travers des parois transparentes $\dot{q}_{C\ transparent,t}$;
- flux thermique dû aux infiltrations d'air $\dot{q}_{inf,t}$;

- flux thermique sensible dû au gain interne lié aux occupants $\dot{q}_{occupants,t}^{Sensible}$;
- flux thermique latent dû aux gains internes liés aux occupants $\dot{q}_{occupants,t}^{Latent}$;
- flux thermique dû aux gains internes liés aux différents équipements $\dot{q}_{équipement,t}$.

L'ensemble de ces flux thermiques vont se séparer en une portion convective et une portion radiative variant en fonction de leur nature. Les coefficients F^C et F^R permettent de calculer, respectivement, les portions convective et radiative des différents flux. Ces coefficients peuvent être estimés au moyen des recommandations de l'ASHRAE (2017) présentées au Tableau 3.1. Ces coefficients varient en fonction de la nature du flux thermique considéré. Ainsi, si aucun ombrage intérieur n'est présent, les flux thermiques au travers des parois transparentes dus aux rayonnements solaires direct, diffus et réfléchi sont purement radiatifs. De même, le flux thermique dû aux infiltrations d'air est de nature purement convectif. Les flux thermiques issus de la conduction au travers de parois disposent d'une partie radiative dans la mesure où une partie de l'énergie stockée par ces parois est libérée sous forme d'ondes infrarouge.

Tableau 3.1. Coefficients de fraction radiative et convective des flux thermiques, adapté de l'(ASHRAE, 2017).

Type de flux thermique	**Fraction radiative F^R recommandée**	**Fraction convective F^C recommandée**
Flux conduit au travers des parois opaques $\dot{q}_{C\ opaque,t}$, sol et mur	$F^R_{C\ opaque} = 0{,}46$	$F^C_{C\ opaque} = 0{,}54$
Flux conduit au travers des parois opaques $\dot{q}_{C\ opaque,t}$, toit	$F^R_{C\ opaque} = 0{,}6$	$F^C_{C\ opaque} = 0{,}4$
Flux solaire direct au travers des parois transparentes $\dot{q}_{R\ direct,t}$	$F^R_{R\ direct} = 1$*	$F^C_{R\ direct} = 0$*
Flux solaires diffus et réfléchis au travers des parois transparentes $\dot{q}_{R\ diffref,t}$	$F^R_{R\ diffref} = 1$*	$F^C_{R\ diffref} = 0$*
Flux conduit au travers des parois transparentes $\dot{q}_{C\ transparent,t}$	$F^R_{C\ transparent} = 0{,}33$ si $SHGC - 0{,}5$ $F^R_{C\ transparent} = 0{,}46$ sinon	$F^C_{C\ transparent} = 0{,}67$ si $SHGC - 0{,}5$ $F^C_{C\ transparent} = 0{,}54$ sinon
Flux dû aux infiltrations d'air $\dot{q}_{inf,t}$	$F^R_{inf} = 0$	$F^C_{inf} = 1$
Flux sensible dû aux occupants $\dot{q}^{Sensible}_{occupants,t}$	$F^{R,Sensible}_{occupants} = 0{,}6$	$F^{C,Sensible}_{occupants} = 0{,}4$
Flux latent dû aux occupants $\dot{q}^{Latent}_{occupants,t}$	$F^{R,Latent}_{occupants} = 0$	$F^{C,Latent}_{occupants} = 1$
Flux dû à l'éclairage $\dot{q}_{éclairage,t}$	$F^R_{éclairage}$**	$F^C_{éclairage}$**

*S'il n'y a pas d'ombrage intérieur, voir de la Tables 14A à la Table 14G de l'ASHRAE (2017) sinon.
**Ces coefficients sont variables et doivent être choisis selon la Table 3 de l'ASHRAE (2017).

Les portions convectives des flux thermiques sont instantanément transférées à l'air de l'intérieur du bâtiment. À l'inverse, les portions radiatives sont emmagasinées par les éléments à l'intérieur du bâtiment et sont libérées par convection au sein de l'air intérieur ultérieurement : ce déphasage thermique est pris en compte par l'outil en appliquant le principe de la RTSM.

Pour ce faire, la RTSM propose l'emploi de coefficients RTF (*Radiant Time Factor*) r_j^{direct} et $r_j^{indirect}$ associés au flux thermique dû au rayonnement solaire direct, et aux autres parties radiatives des flux, respectivement. Ces coefficients RTF permettent de calculer la portion du flux thermique stocké par radiation à l'heure $t - j$ relâché par convection dans l'air du bâtiment à

l'heure t. Les valeurs de ces coefficients RTF r_j^{direct} et $r_j^{indirect}$ peuvent être trouvées au sein de l'ASHRAE (2017). Le premier coefficient RTF de la série est en général compris entre 0,2 et 0,6 tandis que les coefficients suivants, correspondant à des heures plus éloignées dans le passé, décroissent. Plus l'inertie thermique intérieure au bâtiment est faible, plus les coefficients RTF décroitront rapidement. Leur valeur dépend donc de toute propriété amenant à modifier l'inertie thermique du bâtiment :

- sa géométrie extérieure et intérieure;
- les matériaux constituant ses parois extérieures et intérieures;
- le pourcentage de son enveloppe extérieure constitué de parois transparentes;
- l'ameublement intérieur.

Par ailleurs, le rayonnement direct solaire atteindra, en général, préférentiellement le plancher et certains murs intérieurs, contrairement aux autres rayonnements qui sont supposés isotropes. C'est pourquoi le coefficient RTF associé à ce flux r_j^{direct} est différent de celui associé aux autres flux radiatifs $r_j^{indirect}$. L'énergie correspondante ayant été emmagasinée par radiation à l'heure $t-j$ avec $0 \leq j \leq 23$, le flux thermique $\dot{q}_{radiation,t}$ relâché par les éléments internes au bâtiment est donné, à l'heure t, par :

$$\begin{aligned}\dot{q}_{radiation,t} = &\sum_{j=0}^{23} r_j^{direct}\, F_{R\,direct}^{R}\, \dot{q}_{R\,direct,t-j} \\ &+ \sum_{j=0}^{23} r_j^{indirect}\Big(F_{C\,opaque}^{R}\, \dot{q}_{C\,opaque,t-j} + F_{R\,diffref}^{R}\, \dot{q}_{R\,diffref,t-j} \\ &+ F_{C\,transparent}^{R}\, \dot{q}_{C\,transparent,t-j} + F_{occupants}^{R,Sensible}\, \dot{q}_{occupants,t-j}^{Sensible} \\ &+ F_{éclairage}^{R}\, \dot{q}_{éclairage,t-j}\Big)\end{aligned} \tag{3.28}$$

Le flux thermique total échangé au travers de l'enveloppe du bâtiment est alors donné, à l'heure t, par :

$$\dot{q}_{total,t} = \dot{q}_{radiation,t} + F^{C}_{C\ opaque}\ \dot{q}_{C\ opaque,t} + F^{C}_{R\ direct}\dot{q}_{R\ direct,t} + F^{C}_{R\ diffref}\ \dot{q}_{R\ diffref,t} + F^{C}_{C\ transparent}\ \dot{q}_{C\ transparent,t} + \dot{q}_{inf,t} + F^{C,Sensible}_{occupants}\ \dot{q}^{Sensible}_{occupants,t} + \dot{q}^{Latent}_{occupants,t} + F^{C}_{éclairage}\ \dot{q}_{éclairage,t} \quad (3.29)$$

CHAPITRE 4 COMPARAISON ENTRE L'OUTIL, LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ET LE LOGICIEL SIMEB

Ce chapitre présente les travaux effectués pour vérifier la modélisation des transferts thermiques par l'outil de calcul CEEB à différentes échelles d'un bâtiment. Pour ce faire, les résultats de cet outil sont comparés à ceux de modèles d'éléments finis. La méthode des éléments finis (MEF) est pertinente pour le calcul des gains et pertes de chaleur à travers des enveloppes non homogènes de bâtiment ou, à plus grande échelle, à travers des zones thermiques. Les analyses d'éléments finis permettent d'estimer les économies d'énergie réalisées, entre autres, par l'optimisation de la masse, du design et de la qualité du bâtiment appliquée aux choix des matériaux (Mijuca, Gajić, & Vukobrat, 2003). Il est important de noter que les analyses d'éléments finis utilisées à des fins de comparaison au long de ce mémoire sont en régime permanent, comme c'est le cas dans l'étude de Mijuca et al. (2003). Deux échelles sont considérées :

- un mur de briques d'argile est modélisé localement;
- un bâtiment dans son ensemble est considéré avec les convections intérieure, extérieure et le rayonnement solaire.

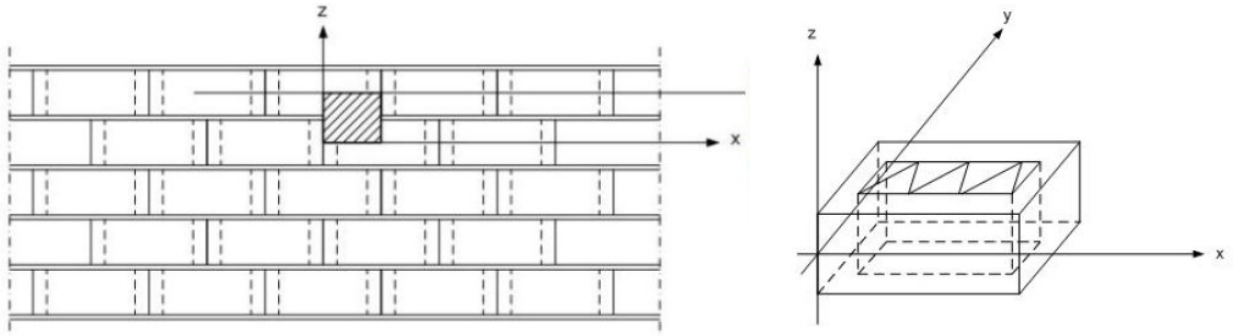
4.1 Modélisation des transferts locaux au sein d'un mur de briques d'argile

4.1.1 Présentation du problème

Cette section compare l'outil de calcul énergétique développé au long de ce mémoire et la MEF en modélisant une portion locale de mur de briques d'argile étudiée par Mijuca et al. (2003). Ceci permet de vérifier les équations de la section 3.4.2 employées par l'outil CEEB, lesquelles permettent de simplifier une couche localement non-homogène de l'enveloppe en une paroi homogène à l'échelle du bâtiment.

Le travail de Mijuca et al. (2003) a permis de démontrer l'employabilité de la MEF pour analyser un problème de transfert thermique 3D au sein d'un mur non homogène constitué de blocs d'agrégats légers en argile expansée rempli de polystyrène, communément appelé brique d'argile, tel que présenté à la Figure 4.1. Cette étude illustre notamment l'impact de l'ajout de laine minérale

dans le mortier de stuc permettant la jonction entre les différentes briques. Ainsi, le polystyrène diminue le flux de chaleur à travers le bloc tandis que la laine minérale diminue le flux de chaleur à travers le mortier.



(a) (b)

Figure 4.1. Mur de brique étudié par (Mijuca et al., 2003) : (a) mur non homogène constitué de blocs d'agrégats légers en argile expansée rempli de polystyrène et portion analysée (hachures); et (b) détail d'un bloc d'argile.

La portion de mur étudiée, tirée de (Mijuca et al., 2003), est présentée en détail à la Figure 4.2 avec la légende des différents matériaux. Les propriétés suivantes sont utilisées :

- conductivité thermique de l'argile expansé du bloc d'agrégat léger, k = 0,16 W/m-K;
- conductivité thermique du polystyrène, k = 0,036 W/m.K;
- conductivité thermique du stuc, k = 0,4 W/m.K;
- conductivité thermique de la laine minérale, k = 0,036 W/m.K;
- coefficient de convection de l'air extérieur, h = 25 W/m^2.K;
- coefficient de convection de l'air intérieur, h = 7,6923 W/m^2.K.

Il est intéressant de noter que Mijuca et al. (2003) utilisent la démarche de calcul des ponts thermiques de l'European standard CEN (Comité européen de normalisation, 2017) ainsi que le logiciel d'éléments finis Straus7 (2003), tandis que l'outil de calcul énergétique se base sur l'ASHRAE (2017). Par ailleurs, le logiciel *Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis* (ADINA, 2020) est utilisé pour construire les modèles d'éléments finis présentés au long de ce mémoire.

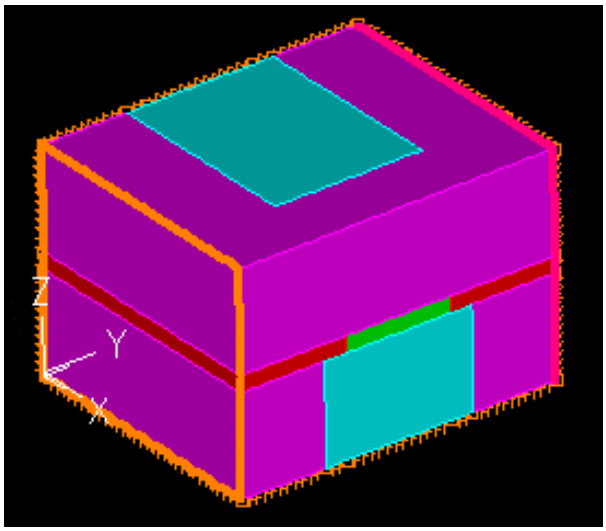


Figure 4.2. Portion de mur de brique non homogène étudiée et composition des matériaux.

4.1.2 Modèles préliminaires

Avant d'analyser la portion de mur détaillée présentée à la Figure 4.2, plusieurs modèles préliminaires d'éléments finis simplifiés ont été construits avec ADINA (2020). Leur configuration est alors complexifiée graduellement pour vérifier progressivement la démarche mathématique de la section 3.4.2 suivie par l'outil de calcul énergétique. Des températures purement théoriques de l'air intérieur et extérieur $T_{in} = 1$ K et $T_{out} = 0$ K sont ici considérées.

Quatre configurations préliminaires sont analysées :

- configuration P1 (Figure 4.3 (a)) : un seul matériau correspondant au bloc seul d'agrégat léger en argile expansée est étudié en considérant les convections intérieure et extérieure;
- configuration P2 (Figure 4.3 (b)) : le polystyrène qui agit comme isolant au centre du bloc d'agrégat est ajouté à la configuration P1 de façon uniforme sur toute la hauteur z de la section, sur toute la largeur x et sur une épaisseur de 140 mm suivant y;
- configuration P3 (Figure 4.3 (c)) : le joint de mortier est ajouté au bloc d'agrégat de la configuration P1 sans considérer la laine minérale;
- configuration P4 (Figure 4.3 (d)) : le polystyrène est ajouté de façon non uniforme au centre du bloc d'agrégat de la configuration P1 en suivant la géométrie étudiée par Mijuca et al. (2003) illustrée à la Figure 4.2.

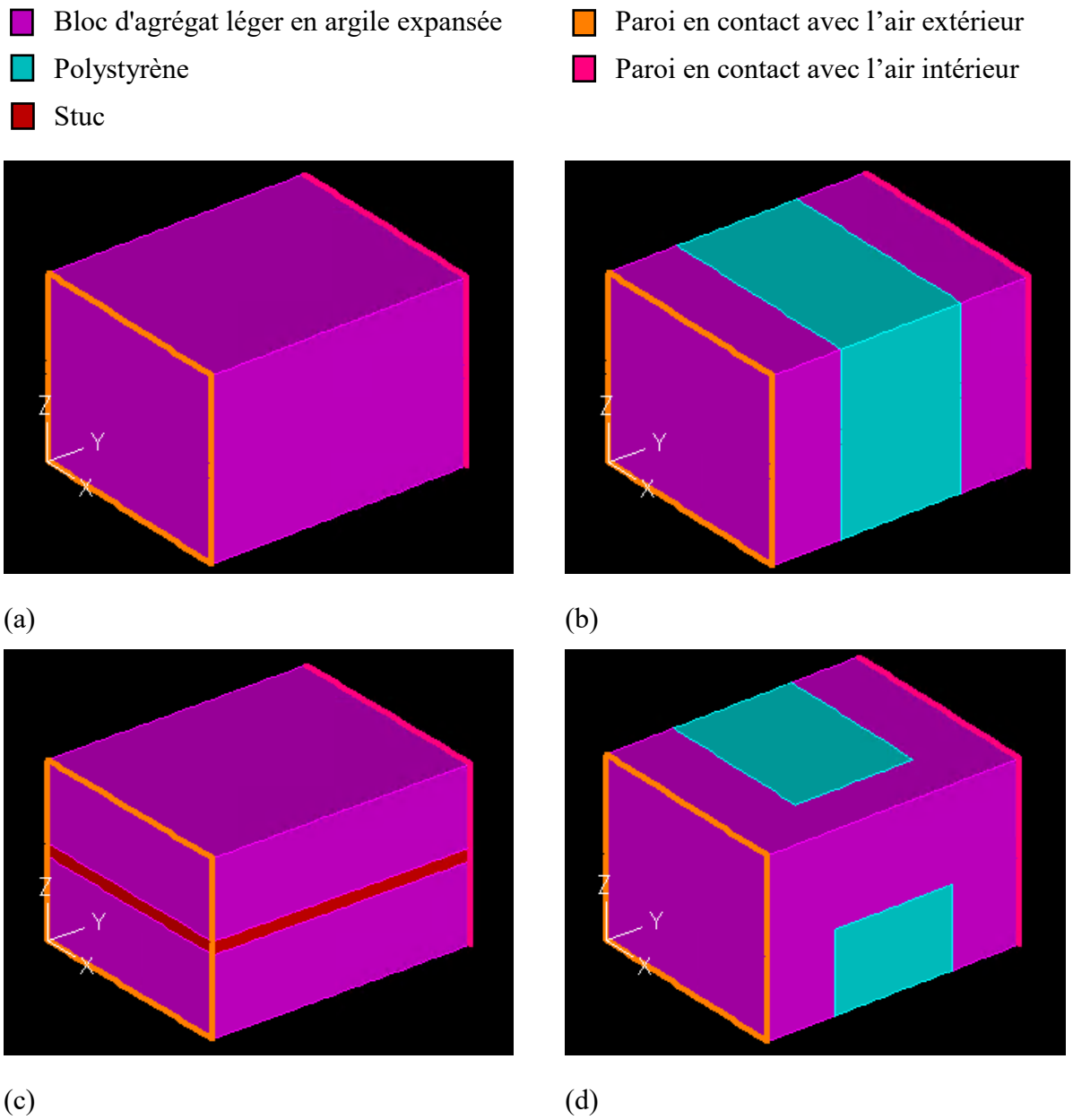


Figure 4.3. Géométrie et composition des quatre modèles préliminaires analysés avec ADINA (2020) : (a) configuration P1; (b) configuration P2; (c) configuration P3; et (d) configuration P4.

Dans un premier temps, un premier type de modèles d'élément finis est construit avec un maillage uniforme et homogène constitué de 36894 éléments 3D cubiques. La convection de l'air intérieur et extérieur est modélisée au moyen d'éléments frontières spécifiques appliqués aux surfaces concernées du mur. Le transfert de chaleur est fixé à zéro suivant l'axe des x, donc l'échange de chaleur est bloqué parallèlement au mur, soit à travers la gauche et la droite, il se produit perpendiculairement au mur. La subdivision des volumes et surfaces en éléments finis de

conduction 3D et de convection, respectivement, est réalisée. La taille des éléments finis est établie à 7,5 mm du fait que l'épaisseur du mortier vaut 15 mm. Les éléments cubiques de conduction ont 8 nœuds alors que les éléments carrés surfaciques de convection ont 4 nœuds. La compatibilité entre les nœuds composant les éléments de conduction et ceux de convection est vérifiée. Les matériaux composants le mur sont considérés isotropes.

Ces modèles permettent de déterminer les températures $T_{y=0}$ et $T_{y=100}$ respectivement aux surfaces extérieure et intérieure de la portion de mur. Il est important de noter que celles-ci diffèrent des températures de l'air intérieur et extérieur T_{in} et T_{out} qui apparaissent à une distance éloignée de la paroi du fait de la convection. Les températures $T_{y=0}$ et $T_{y=100}$ permettent de déterminer le coefficient de transfert équivalent U_λ de la portion du mur sans convection donné par :

$$U_\lambda = \frac{Q_\lambda}{T_{y=100} - T_{y=0}} \tag{4.1}$$

Avec Q_λ le flux thermique selon y sur la surface intérieure ou extérieure déterminé grâce aux modèles d'ADINA (2020).

Dans un second temps, un deuxième type de modèles d'éléments finis est construit sur ADINA (2020) en substituant l'ensemble des 36894 éléments cubiques par un unique élément plaque ayant pour conductivité U_λ. Ce second type se constitue donc de modèles numériques considérablement simplifiés. La convection de l'air y est toujours modélisée au moyen d'éléments frontières spécifiques appliqués aux surfaces extérieure et intérieure du mur. Aucun transfert de chaleur n'est modélisé suivant l'axe des x.

Les deux types de modèles d'éléments finis permettent alors de déterminer le coefficient de transfert équivalent total U_{total} de la portion du mur avec convection donné par :

$$U_{total} = \frac{Q_{total}}{T_{in} - T_{out}} \tag{4.2}$$

Le Tableau 4.1 montre, pour les quatre configurations préliminaires, les coefficients de transfert équivalents totaux obtenus par les deux types de modèles d'élément finis ainsi que par les équations de la section 3.4.2 utilisées par l'outil basées sur les méthodes des surfaces isothermes ou non.

Tableau 4.1. Comparaison des coefficients de transfert global U_{total} obtenus par les équations mathématiques et par la méthode des éléments finis (MEF) pour les différents modèles préliminaires.

	Coefficient de transfert global U_{total} (W/m^2-K)			
Configurations préliminaires	Équation de la méthode isotherme	Équation de la méthode non isotherme	MEF – éléments cubiques 3D	MEF – élément plaque
Configuration P1	0,489	0,489	0,489	0,489
Configuration P2	0,198	0,198	0,198	0,198
Configuration P3	0,539	0,534	0,538	0,539
Configuration P4	0,305	0,287	0,309	0,305

Les différences observables entre les méthodes sont très faibles pour les deux premières configurations homogènes, i.e. P1 et P2, et plus élevées pour les deux dernières non homogènes, i.e. P3 et P4. Il est intéressant de noter que les configurations P3 et P4 sont celles qui présentent des ponts thermiques, venant ainsi ajouter une complexité qui est moins bien pris en compte par les calculs mathématiques. Cependant, les coefficients de transfert global obtenus par les modèles avec un seul élément plaque sont très proches de ceux obtenus avec les modèles constitués de 36894 éléments cubiques tenant compte en détail de l'hétérogénéité des matériaux. Ce principe de simplification semble donc valide. Il faut noter que le modèle avec élément plaque suit une philosophie semblable aux équations de la section 3.4.2 en simplifiant le mur hétérogène par une conductivité thermique globale équivalente. La méthode des surfaces isothermes donne le même coefficient de transfert global que le modèle utilisant un élément fini plaque, au contraire de la méthode non isotherme. La méthode isotherme fournit aussi des résultats plus proches de ceux du modèle hétérogène constitué des éléments cubiques que la méthode non isotherme.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que la configuration P2 est la plus efficace en termes de résistance thermique grâce à l'isolant intégré au centre du bloc d'agrégat léger en argile expansée. À l'inverse, la configuration P3 présente le plus de déperditions thermiques dû au pont thermique créé avec le joint de mortier.

Les modèles préliminaires ont donc permis de dégager les conclusions suivantes, dans le cas de la portion de mur analysée ci-dessus en régime permanent :

- L'utilisation d'un unique élément fini plaque semble être une approximation représentative du modèle complet hétérogène avec 36894 éléments cubiques.
- La méthode des surfaces isothermes semble être mieux adaptée que la méthode des surfaces non isothermes pour modéliser les ponts thermiques dans ce cas particulier.
- Toutefois, la méthode des surfaces non-isothermes permet de prendre en compte les différences de déphasage thermique entre les matériaux et pourrait s'avérer plus précise en régime transitoire.
- Plus la configuration analysée devient hétérogène, plus l'erreur relative entre les équations de la section 3.4.2 et le modèle de 36894 éléments finis cubiques augmente.
- L'équation de la méthode des surfaces isothermes, pouvant être utilisée par l'outil de calcul énergétique développé, semble être une approximation représentative du modèle complet hétérogène avec 36894 éléments cubiques.

Toutefois, il est important de noter que la méthode non-isotherme permet de traduire un certain déphasage thermique pouvant se produire entre les différents matériaux en régime transitoire. Il est donc possible, pour les cas où d'importants phénomènes transitoires se produisent, que la méthode non-isotherme soit plus représentative de la réalité que la méthode isotherme.

4.1.3 Étude du problème complet et vérification des différentes méthodes

La configuration de portion de mur étudiée par Mijuca et al. (2003), illustrée à la Figure 4.2 est ici analysée au moyen de la MEF avec le logiciel ADINA (2020) et les équations de la section 3.4.2 (méthodes isotherme et non isotherme). Pour rappel, ces équations sont celles utilisées par l'outil de calcul énergétique CEEB développé. Le stuc (mortier) peut comporter ou non de la laine minérale.

Les Figure 4.4 (a) et (b) décrivent la composition de la portion du mur de brique selon les plans (x,y) et (x,z) avec y l'axe horizontal selon lequel est orienté le flux de chaleur, x l'axe horizontal perpendiculaire à y et z l'axe vertical. Les aires identifiées sur la Figure 4.4 représentent la hauteur (axe z) et la largeur (axe x) de la section des zones de la portion de mur.

Deux ponts thermiques sont identifiables :

- Un pont thermique se constitue de la partie du bloc d'agrégat léger en argile expansée s'étendant sur toute l'épaisseur du mur, car le polystyrène est seulement au centre de celui-ci (Figure 4.4 (a)).
- Un pont thermique se constitue du joint en stuc, qu'il comporte ou non de la laine minérale (Figure 4.4 (b)).

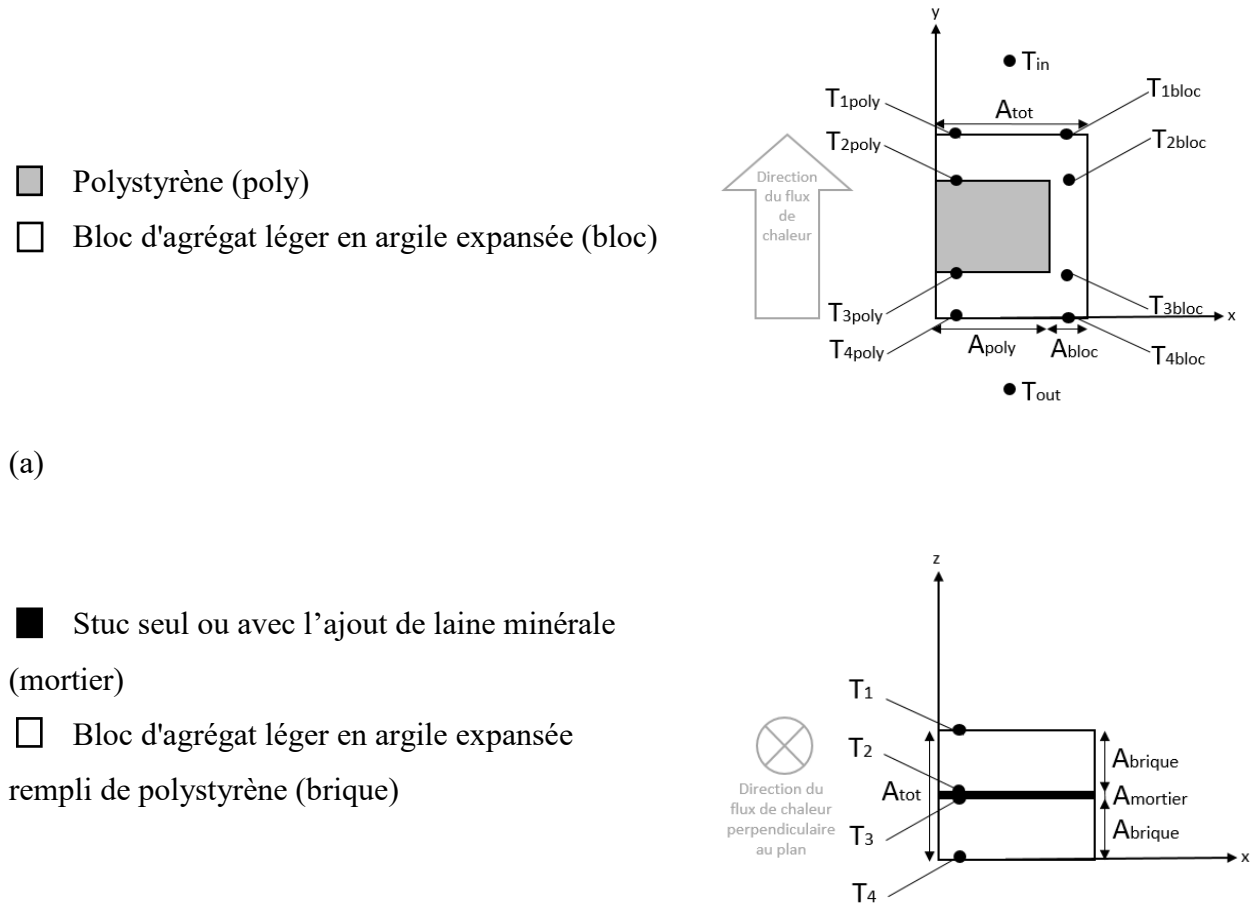


Figure 4.4. Schéma de la portion de mur analysée : (a) selon le plan (x,y); et (b) selon le plan (x,z).

La portion de mur présentée à la Figure 4.2 peut être analysée suivant différentes combinaisons des méthodes isotherme et non isotherme. Quatre configurations sont analysées :

- configuration C1 (Figure 4.5 (a)) : méthode des surfaces non isothermes;

- configuration C2 (Figure 4.5 (b)) : méthode des surfaces isothermes;
- configuration C3 (Figure 4.5 (c)) : méthode des surfaces isothermes sauf pour les zones de convection de l'air qui sont traitées selon la méthode des surfaces non isothermes;
- configuration C4 (Figure 4.5 (c)) : méthode des surfaces non isothermes sauf les zones de convection de l'air qui sont traitées selon la méthode des surfaces isothermes.

Pour plus de clarté, les notations suivantes sont utilisées : T_{in}, température intérieure; T_{out}, température extérieure; air, zone de convection de l'air; bloc, bloc d'agrégat léger en argile expansée; poly, polystyrène; et mortier, stuc seul ou avec ajout de laine minérale.

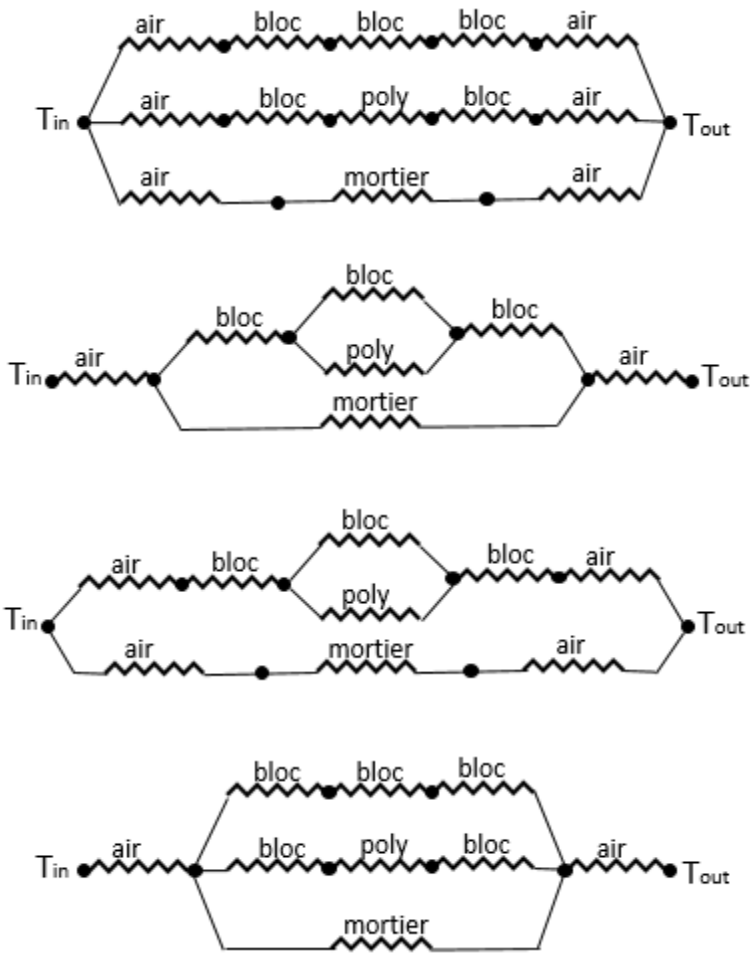


Figure 4.5. Configurations analytiques issues de différentes combinaisons possibles des méthodes isotherme et non isotherme pour étudier la portion de mur hétérogène : (a) configuration C1; (b) configuration C2; (c) configuration C3; et (d) configuration C4.

Les deux types de modèles d'élément finis définis précédemment avec ADINA (2020) sont repris pour analyser la portion de mur présentée à la Figure 4.2 : un modèle détaillé constitué de 36894 éléments 3D cubiques; et un modèle constitué d'un seul élément plaque équivalent conçu selon la méthode présentée à la section 4.1.2. Pour rappel, cette portion de mur a été étudiée par Mijuca et al. (2003) au moyen du logiciel d'éléments finis Straus7 (2003). Les modèles ont été alors construits au moyen de 3840, 480 ou 300 éléments finis cubiques 3D. Mijuca et al. (2003) ont aussi utilisé la démarche analytique proposée par la norme européenne CEN (2017). Le Tableau 4.2 présente, pour la portion de mur étudiée, les coefficients de transfert équivalents totaux obtenus par Mijuca et al. (2003), par les deux types de modèles d'élément finis analysés avec ADINA (2020) et par les quatre configurations issues d'une combinaison des méthodes des surfaces isothermes ou non (basées sur les équations de la section 3.4.2).

Tableau 4.2. Comparaison des coefficients de transfert global U_{total} obtenus par Mijuca et al. (2003), par les deux types de modèles d'élément finis analysés avec ADINA (2020) et par les quatre configurations issues d'une combinaison des méthodes des surfaces isothermes ou non.

	Coefficient de transfert global U_{total} (W/m^2-K)	
Méthode employée	Stuc seul	Stuc avec ajout de laine minérale
MEF, 3840 éléments (Mijuca et al., 2003)	0,3686	0,3035
MEF, 480 éléments (Mijuca et al., 2003)	0,3699	0,3056
MEF, 300 éléments (Mijuca et al., 2003)	0,3704	0,3065
Démarche analytique du CEN (Mijuca et al., 2003)	0,3550	0,2960
MEF, 36894 éléments (ADINA 2020)	0,3678	0,3017
MEF, un élément plaque (ADINA 2020)	0,3587	0,2899
Configuration analytique C1 (méthode des surfaces non isothermes)	0,3304	0,2706
Configuration analytique C2 (méthode des surfaces isothermes)	0,3587	0,2898
Configuration analytique C3 (combinaison des méthodes)	0,3496	0,2898
Configuration analytique C4 (combinaison des méthodes)	0,3425	0,2733

Tout d'abord, on note une excellente concordance entre les résultats des analyses d'éléments finis de Mijuca et al. (2003) et ceux obtenus avec le modèle de 36894 éléments développé au long de ce mémoire. De même, ce modèle donne un coefficient de transfert global très proche de celui obtenu par Mijuca et al. (2003) en suivant la démarche analytique du CEN. D'après les résultats obtenus, la validité du modèle à 36894 éléments construit ici est confirmée. L'écart maximal entre les valeurs obtenues par le modèle de 36894 éléments et celui constitué d'un seul élément plaque reste aussi inférieur à 4 %. Le modèle à 36894 éléments admet certes une représentation plus proche des valeurs de Mijuca et al. (2003) que le modèle avec un élément plaque. Un maillage plus raffiné du modèle permet donc d'augmenter la précision des résultats, ce que confirme les données de Mijuca et al. (2003). Cela étant, il est intéressant de noter que la forte hétérogénéité de la composition de cette portion de mur peut ne pas être représentative des murs typiques. Simplifier un mur hétérogène en le modélisant à grande échelle au moyen d'éléments plaques apparait ici acceptable.

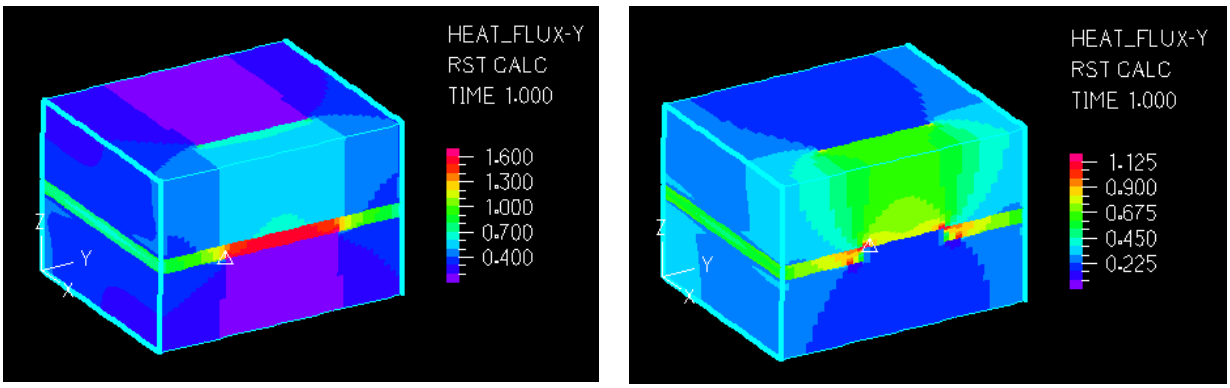
De manière générale, une bonne concordance est aussi observée entre les coefficients de transfert globaux obtenus par les quatre configurations analytiques issues de la combinaison des méthodes des surfaces isothermes et non isothermes (section 3.4.2) et par la MEF. Si on regarde plus en détail, on se rend compte que la configuration analytique C2, qui correspond à l'application de la méthode des surfaces isothermes, donne les résultats les plus proches de ceux obtenus avec ADINA (2020) et par Mijuca et al. (2003). Encore une fois, la méthode des surfaces isothermes semble être mieux adaptée que la méthode des surfaces non isothermes pour modéliser les ponts thermiques dans ce cas analysé en régime permanent.

La méthode des surfaces non isothermes permet de mieux prendre en compte les différences de déphasage thermique entre les matériaux. Toutefois, cela cause une sous-estimation par cette méthode de l'impact des ponts thermiques et des déperditions thermiques correspondantes. Cette méthode s'avère donc moins conservatrice.

En effet, on observe que la démarche analytique de la configuration C2 (méthode des surfaces isothermes) surestime légèrement le coefficient de transfert global et donc sous-estimer la résistance thermique de la portion de mur contrairement aux modèles d'éléments finis de cette étude et de Mijuca et al. (2003). En d'autres termes, la méthode des surfaces non isothermes peut légèrement surestimer la résistance thermique du mur. Afin de corriger ce biais, un facteur de

sécurité de 1,05 est appliqué aux valeurs de coefficient de transfert calculé par l'outil de calcul énergétique tel que recommandé dans la littérature (ISO, 2007).

Enfin, les résultats du Tableau 4.2 démontrent clairement que l'addition de laine minérale au centre du mortier en plus du polystyrène dans le bloc d'agrégat léger en argile expansée, réduit significativement les ponts thermiques au sein du mur de brique. Les Figure 4.6 (a) et (b) présentent les flux thermiques déterminés selon l'axe y avec le modèle à 36894 éléments construit avec ADINA (2020), sans et avec laine minérale, respectivement. Ces figures permettent d'illustrer les mécanismes de transfert locaux de chaleur, ainsi que la diminution de l'effet de pont thermique engendré par l'ajout de laine minérale.



(a) (b)

Figure 4.6. Flux thermique selon l'axe y au sein de la portion de mur de brique non homogène obtenu avec le modèle à 36894 éléments (ADINA 2020) : (a) sans laine minérale; et (b) avec laine minérale.

Les conclusions suivantes peuvent alors être observées :

- Une bonne concordance est observée entre les résultats analytiques et numériques de Mijuca et al. (2003) et les prédictions des modèles d'éléments finis et des quatre combinaisons de méthodes isothermes et non isothermes analysés au long de cette étude.
- Même s'il en résulte une perte de précision, il est possible de simplifier un modèle détaillé hétérogène de centaines d'éléments finis en un modèle équivalent composé de seulement quelques nœuds selon la méthode décrite ci-haut.
- La méthode des surfaces isothermes apparait ici plus en accord avec la MEF et, aussi, plus conservatrice. Par la suite de ce mémoire, un facteur de sécurité de 1,05 est appliqué à la méthode des surfaces non isothermes lors de l'emploi de l'outil de calcul énergétique

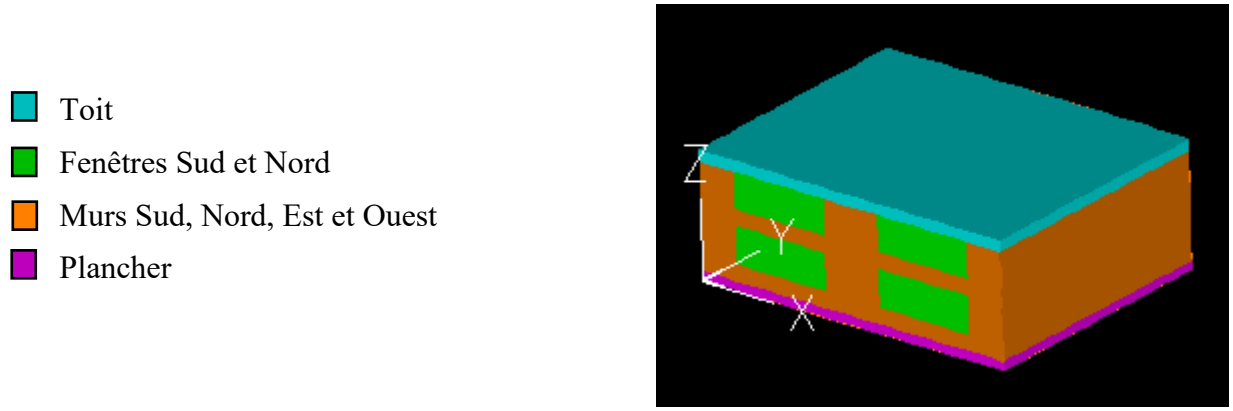
CEEB. Il est important de noter que la méthode non-isotherme permet de traduire un certain déphasage thermique pouvant se produire entre les différents matériaux en régime transitoire. Il est donc possible, pour les cas où d'importants phénomènes transitoires se produisent, que la méthode non-isotherme soit plus représentative de la réalité que la méthode isotherme.

4.2 Modélisation des transferts globaux au travers de l'enveloppe d'un bâtiment

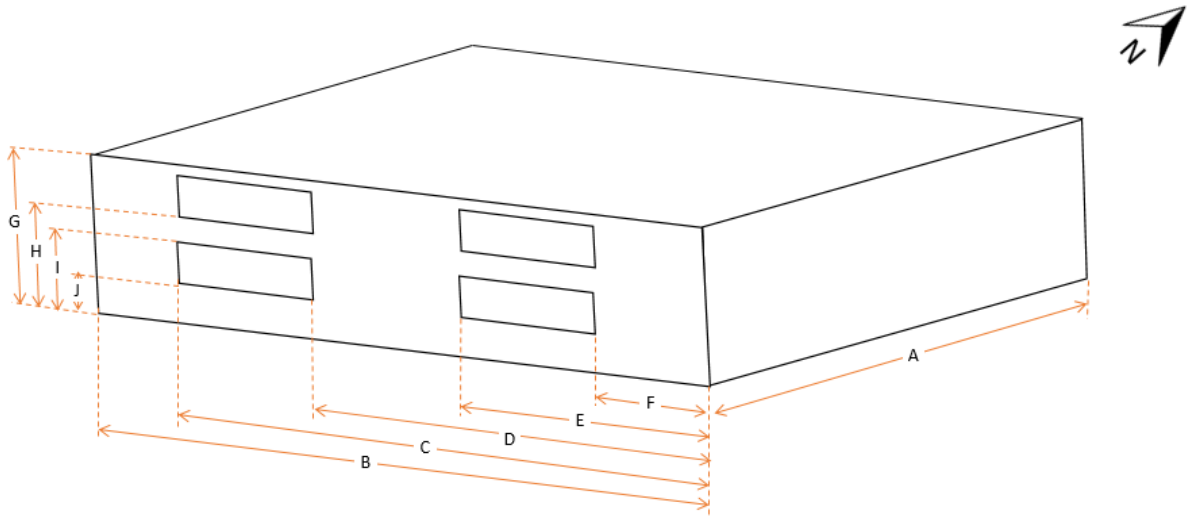
4.2.1 Bâtiment modélisé

Cette section compare l'outil de calcul énergétique développé au long de ce mémoire et la MEF en modélisant un bâtiment au complet dont la géométrie est tirée de l'étude de Montenegro et al. (2012). Ce travail permet de vérifier à l'échelle d'un bâtiment les équations présentées aux sections 3.4.2, 3.5.2 et 3.5.3 (transferts thermiques par convection, conduction et radiation au sein des parois opaques ou transparentes) utilisées par l'outil de calcul énergétique. La géométrie du bâtiment sélectionné est présentée à la Figure 4.7. Sa superficie de plancher est de 504 m^2, et son ratio de surface de fenêtres par surface de mur est de 0,4. Les fenêtres sont présentes seulement aux parois sud et nord.

L'objectif de l'étude de Montenegro et al. (2012) est de fournir des directives de conception pour les bâtiments scolaires en analysant l'impact de leur géométrie sur leurs performances visuelles, thermiques et énergétiques. Différentes configurations de salles de classe et de bâtiments scolaires sont modélisées, en estimant leurs performances énergétiques et environnementales d'après le logiciel de simulation dynamique horaire IES-VE (Integrated Environmental Solutions, 2011). Deux contextes climatiques comportant des charges de chauffage substantielles et un potentiel solaire passif intéressant sont étudiés, soit les climats froids de Montréal et de Santiago, au Chili. La géométrie de bâtiment cubique et compacte est la plus performante d'un point de vue énergétique, avec deux étages et deux rangées de salles de classe. Cette géométrie est sélectionnée pour la présente étude. Cela dit, les résultats semblent contredire l'idée de compacité de la forme comme unique solution optimale pour la performance énergétique. En effet, pour les deux types de climats, les performances énergétiques d'un bâtiment uni-étagé tout en longueur sont très similaires à celles d'un bâtiment cubique, du fait du rôle de l'éclairage naturel aussi essentiel que le chauffage.



(a)



A = 14 m; B = 18 m; C = 16,25 m; D = 10,75 m; E = 7,25 m; F = 1,75 m; G =6 m; H = 4 m; I = 3 m; J = 1 m

(b)

Figure 4.7. Bâtiment scolaire étudié : (a) morphologie générale et composition des matériaux; et (b) géométrie détaillée utilisée au sein des modèles.

Les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment sont considérés isotropes. Les caractéristiques de celle-ci (épaisseur e, résistance thermique R et conductivité thermique k) sont présentées au Tableau 4.3. À noter que k tient compte de l'épaisseur de l'enveloppe au contraire de R, i.e. $k = e/R$. Le modèle est testé selon différents moments de l'année avec conditions climatiques (ensoleillement et température extérieure) distinctes. Des journées typiques des mois de janvier, mai et septembre ont été étudiées le matin à 8h, le midi et en après-midi à 16h. Le choix de ces trois journées est fait pour limiter le nombre d'analyses d'éléments finis et pour bien représenter différents contextes climatiques de l'utilisation d'un bâtiment d'éducation (10 mois d'occupation

typique) : une journée froide avec faible rayonnement (janvier), une journée chaude avec fort rayonnement (mai), une journée chaude avec faible rayonnement (septembre). La convection de l'air intérieur et extérieur est considérée selon les propriétés spécifiées au Tableau 4.4. La température de l'air intérieur est fixée à 22 degrés Celsius. Deux types d'analyses sont menées : (i) une théorique sans rayonnement solaire pour vérifier la modélisation de la convection et de la conduction au travers de l'enveloppe; et (ii) une avec rayonnement solaire.

Tableau 4.3. Caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment scolaire étudié.

Composantes	**Description**	**Épaisseur *e* [m]**	**Résistance *R* [m²-K/W]**	**Conductivité k [W/m-K]**
Toit	Fibres cellulosiques pulvérisées de 12 pouces	0,614	6,3131	0,09491
Plancher	Cellulose en vrac de 8 pouces	0,401	4,4617	0,09061
Mur	Cellulose en vrac de 8 pouces	0,401	4,4617	0,09061
Fenêtre	Double vitrage, 6 mm de verre, 6 mm de vide d'air, Couches claires-claires (fenêtre ID#4)	0,401	0,2165	7,2626

Tableau 4.4. Propriété de la convection de l'air intérieur et extérieur.

	R [m²-K/W]	*h* [W/m²-K]
Air intérieur	0,12	8,33
Air extérieur	0,04	25,00

4.2.2 Application de l'outil de calcul énergétique

Les flux de chaleur par conduction et convection sont déterminés au moyen des équations (3.20) et (3.23) pour les parois opaques et transparentes, respectivement. Pour rappel, les températures de convection extérieures sont les températures météorologiques T_o et sol-air T_e pour les parois transparentes et opaques, respectivement. La température sol-air T_e est déterminée à partir de la température météorologique T_o par l'outil de calcul au moyen de l'équation (3.14) pour tenir

compte de l'impact du rayonnement solaire sur les parois opaques. Le rayonnement solaire est calculé selon la section 3.3.3 en tenant compte de l'orientation des parois et du soleil. Le Tableau 4.5, Tableau 4.6 et Tableau 4.7 présentent les températures externes de convection de l'air pour chaque paroi du bâtiment, selon que le rayonnement solaire est considéré ou non pour les mois de janvier, mai et septembre. Le rayonnement solaire est intégré dans le cas des parois transparentes au moyen des équations (3.21) et (3.22). Le Tableau 4.8, Tableau 4.9 et Tableau 4.10 présentent le rayonnement (ou gain) solaire perçu par les fenêtres lorsque celui-ci est considéré dans les analyses pour les mois de janvier, mai et septembre. Aucun ombrage interne ou externe n'est considéré. Les coefficients $SHGC_{diffref}$ et $SHGC_{direct}(\theta)$ qui dépendent du type et de l'orientation du vitrage sont inclus dans le calcul. Les calculs de transfert thermique entre l'enveloppe du bâtiment et l'air intérieur sont effectués avec les coefficients RTF (*Radiant Time Factor*) présentés à la section 3.8 en suivant le principe de la RTSM. Pour rappel, ces coefficients RTF permettent de calculer la portion du flux thermique stocké par radiation à l'heure $t - j$ relâché par convection dans l'air du bâtiment à l'heure t. Les RTFs caractérisent la réponse d'une zone thermique, et non d'une seule paroi. Les coefficients choisis sont ceux représentants une zone thermique moyenne, sans tapis, avec 40% de surface vitrée.

Tableau 4.5. Températures externes de convection pour chaque paroi du bâtiment, selon que le rayonnement solaire est considéré ou non, pour une journée typique du mois de janvier.

Type de composante de l'enveloppe	Orientation	Température externe de convection de l'air [°C]					
		Sans rayonnement solaire			Avec rayonnement solaire		
		8h	12h	16h	8h	12h	16h
Toit	--	-10,15	-8,54	-7,86	-14,15*	3,96	-6,20
Mur	Sud	-10,15	-8,54	-7,86	-10,15	9,98	1,47
Mur	Nord	-10,15	-8,54	-7,86	-10,15	-3,42	-6,00
Mur	Est	-10,15	-8,54	-7,86	-10,15	-1,44	-6,00
Mur	Ouest	-10,15	-8,54	-7,86	-10,15	-3,42	2,32
Fenêtre	Sud	-10,15	-8,54	-7,86	-10,15	-8,54	-7,86
Fenêtre	Nord	-10,15	-8,54	-7,86	-10,15	-8,54	-7,86

* Température sol-air modifiée pour tenir compte de l'émissivité du toit et de sa paroi horizontale.

Tableau 4.6. Températures externes de convection pour chaque paroi du bâtiment, selon que le rayonnement solaire est considéré ou non, pour une journée typique du mois de mai.

Type de composante de l'enveloppe	Orientation	Température externe de convection de l'air [°C]					
		Sans rayonnement solaire			Avec rayonnement solaire		
		8h	12h	16h	8h	12h	16h
Toit	--	12,53	16,32	17,70	23,65	46,68	41,74
Mur	Sud	12,53	16,32	17,70	18,46	32,81	29,65
Mur	Nord	12,53	16,32	17,70	19,71	26,58	25,03
Mur	Est	12,53	16,32	17,70	28,64	31,63	25,03
Mur	Ouest	12,53	16,32	17,70	18,46	26,58	34,60
Fenêtre	Sud	12,53	16,32	17,70	12,53	16,32	17,70
Fenêtre	Nord	12,53	16,32	17,70	12,53	16,32	17,70

Tableau 4.7. Températures externes de convection pour chaque paroi du bâtiment, selon que le rayonnement solaire est considéré ou non, pour une journée typique du mois de septembre.

Type de composante de l'enveloppe	Orientation	Température externe de convection de l'air [°C]					
		Sans rayonnement solaire			Avec rayonnement solaire		
		8h	12h	16h	8h	12h	16h
Toit	--	15,61	19,96	20,45	20,05	45,42	34,90
Mur	Sud	15,61	19,96	20,45	20,08	38,86	31,67
Mur	Nord	15,61	19,96	20,45	19,22	28,71	25,18
Mur	Est	15,61	19,96	20,45	30,88	34,30	25,18
Mur	Ouest	15,61	19,96	20,45	19,22	28,71	33,54
Fenêtre	Sud	15,61	19,96	20,45	15,61	19,96	20,45
Fenêtre	Nord	15,61	19,96	20,45	15,61	19,96	20,45

Tableau 4.8. Rayonnement (ou gain) solaire, lorsque celui-ci est considéré, perçu par les fenêtres du bâtiment, pour une journée typique du mois de janvier.

Fenêtre considérée	Rayonnement	**Gain solaire [W/m²]**		
		8h	12h	16h
Fenêtre sud	Direct	0	246,31	129,84
	Diffus et réfléchis	0	82,93	30,09
	Total	0	329,24	159,93
Fenêtre nord	Direct	0	0	0
	Diffus et réfléchis	0	82,93	30,09
	Total	0	82,93	30,09

Tableau 4.9. Rayonnement (ou gain) solaire, lorsque celui-ci est considéré, perçu par les fenêtres du bâtiment, pour une journée typique du mois de mai.

Fenêtre considérée	Rayonnement	**Gain solaire [W/m²]**		
		8h	12h	16h
Fenêtre sud	Direct	0	84,85	48,17
	Diffus et réfléchis	95,95497	166,07	118,54
	Total	95,95497	250,92	166,71
Fenêtre nord	Direct	4,865873	0	0
	Diffus et réfléchis	95,95497	166,07	118,54
	Total	100,8208	166,07	118,54

Tableau 4.10. Rayonnement (ou gain) solaire, lorsque celui-ci est considéré, perçu par les fenêtres du bâtiment, pour une journée typique du mois de septembre.

Fenêtre considérée	Rayonnement	**Gain solaire [W/m²]**		
		8h	12h	16h
Fenêtre sud	Direct	2,64	173,90	102,07
	Diffus	58,51	141,69	76,55
	Total	61,15	315,58	178,62
Fenêtre nord	Direct	0	0	0
	Diffus	58,51	141,69	76,55
	Total	58,51	141,69	76,55

4.2.3 Application de la MEF

La convection intérieure et extérieure est imposée aux surfaces concernées de l'enveloppe du bâtiment au moyen d'éléments aux frontières spécifiques. Les températures de convection extérieures imposées correspondent à celles présentées au Tableau 4.5, Tableau 4.6 et Tableau 4.7. Elles varient donc en fonction de la composante de l'enveloppe et de son orientation. Pour rappel, elles correspondent aux températures météorologiques T_o et sol-air T_e pour les parois transparentes et opaques, respectivement, lorsque le rayonnement solaire est considéré. L'enveloppe du bâtiment est modélisée au moyen d'éléments finis 3D à 8 nœuds de conduction. Un seul élément est considéré suivant l'épaisseur de l'enveloppe, étant donné les travaux de la section 4.1 prouvant la validité de cette simplification. Les autres dimensions des éléments finis cubiques sont établies à 0,5 m. Les éléments aux frontières surfaciques de convection ont alors 4 nœuds. Ainsi, le modèle

est composé de 23 groupes d'éléments pour faciliter l'analyse des données, formés de 7908 nœuds, puis de 10512 éléments au total. Lorsque considérés, les gains par rayonnement solaire sont appliqués comme un flux thermique sur la surface intérieure des fenêtres, tel qu'illustré à la Figure 4.8, afin d'être conforme à la philosophie des équations (3.21) et (3.22). La valeur de ce flux correspond alors à celle du rayonnement total, issue de la somme des rayonnements direct, diffus et réfléchi, présentée au Tableau 4.8, Tableau 4.9 et Tableau 4.10. Pour rappel, ces valeurs tiennent déjà compte des coefficients $SHGC_{diffref}$ et $SHGC_{direct}(\theta)$ qui dépendent du type et de l'orientation du vitrage.

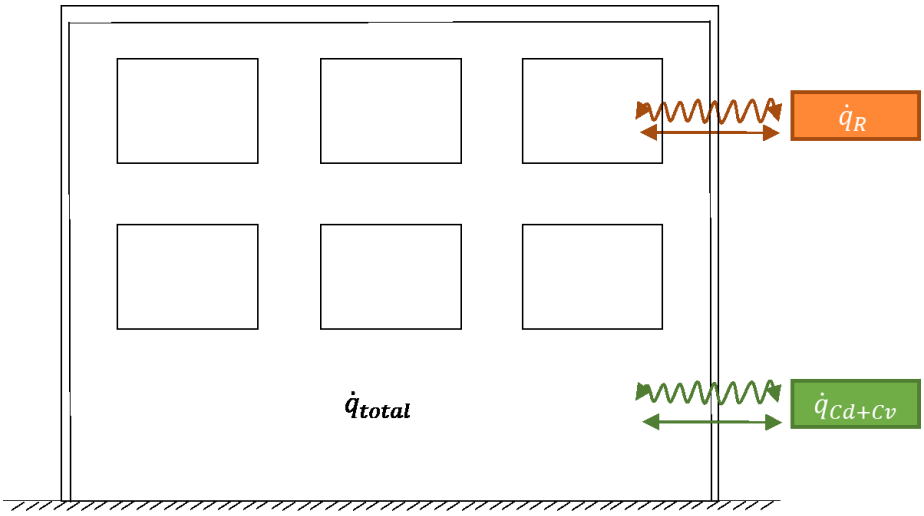


Figure 4.8. Principes généraux suivis pour modéliser les transferts thermiques de conduction, de convection et de radiation solaire à travers l'enveloppe du bâtiment.

Le modèle d'éléments finis permet de prédire le flux thermique $\dot{q}_{Cd+Cv}$ transitant par conduction et convection à la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment (positif lorsqu'il va de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment). En revanche, l'outil de calcul énergétique détermine le flux total transitant au travers de l'enveloppe $\dot{q}_{total}$. Lorsqu'aucune radiation solaire n'est considérée, l'égalité simple $\dot{q}_{total} = \dot{q}_{Cd+Cv}$ est obtenue. En revanche, le rayonnement solaire est directement ajouté à la surface intérieure du bâtiment au sein du modèle d'élément finis, comme étant un flux positif $\dot{q}_R$. De ce fait, lorsque le rayonnement solaire est ajouté, le flux total transitant au travers de l'enveloppe modélisée par éléments finis est déduite comme étant :

$$\dot{q}_{total} = \dot{q}_{Cd+Cv} + \dot{q}_R \tag{4.3}$$

Enfin, une limitation majeure du modèle d'élément finis doit être soulignée : les transferts thermiques sont modélisés comme étant instantanés. Pour rappel, ce n'est pas le cas de l'outil de calcul énergétique qui, conformément au principe de la RTSM (ASHRAE, 2017), considère que l'énergie radiative est en partie emmagasinée par les composantes du bâtiment avant d'être progressivement relâchée sous forme de flux convectif.

4.2.4 Comparaison entre la MEF et l'outil de calcul énergétique

La Figure 4.9 présente le flux total $\dot{q}_{total}$ transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen de la MEF et de l'outil de calcul énergétique, sans rayonnement solaire. Les courbes pleines et pointillées correspondent aux résultats de l'outil et de la MEF, respectivement. Une bonne correspondance entre les deux méthodes est obtenue. En outre, on note que $\dot{q}_{total}$ est très inférieur au mois de janvier par rapport aux mois de septembre et mai. En d'autres termes, les deux méthodes prédisent de bien plus grandes déperditions thermiques du bâtiment en janvier, qu'en mai ou septembre. Ceci est évidemment conforme aux variations de températures annuelles. Ceci tend à valider le principe général des deux méthodes.

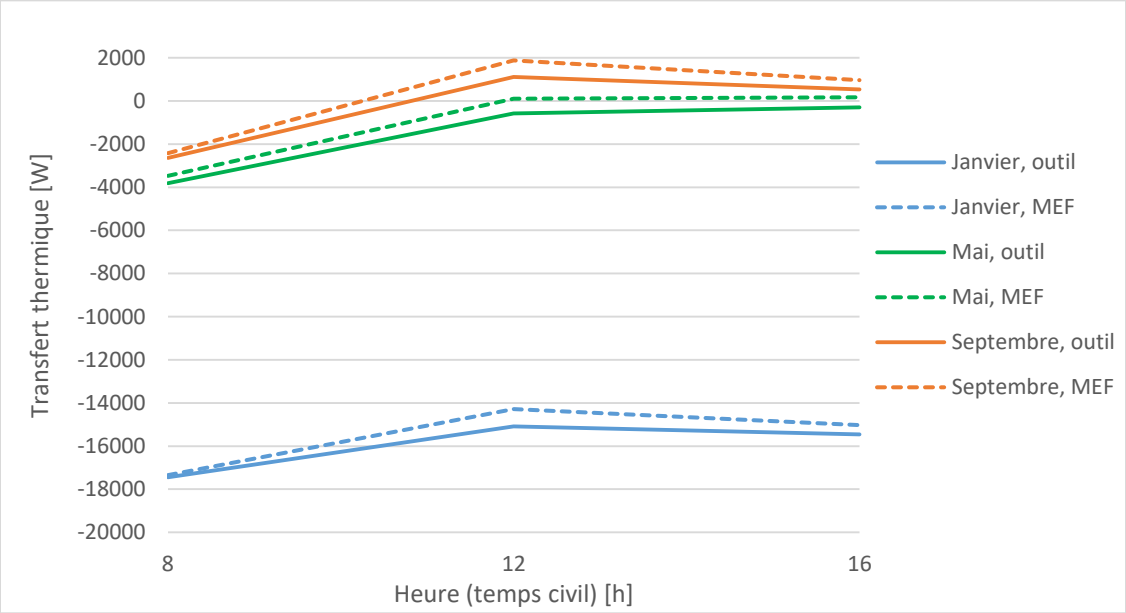


Figure 4.9. Comparaison du flux total transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen de la MEF et de l'outil de calcul énergétique, sans rayonnement solaire.

La Figure 4.10 présente le flux total $\dot{q}_{total}$ transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen de la MEF et de l'outil de calcul énergétique, avec rayonnement solaire. Les courbes pleines et pointillées correspondent aux résultats de l'outil et de la MEF, respectivement. Une bonne correspondance entre les deux méthodes est obtenue à midi pour tous les mois, et à 8h et 16h pour les mois de mai et septembre. En revanche, la MEF surestime les déperditions énergétiques à 8h et 16h au mois de janvier, et dans une moindre mesure à 16h aux mois de mai et septembre. Il est alors important de rappeler que le modèle d'éléments finis modélise les transferts thermiques comme instantanés. Au contraire, l'outil de calcul énergétique considère un certain emmagasinement de l'énergie radiative par les composantes du bâtiment avant d'être progressivement relâchée sous forme de flux convectif durant un cycle de 24h, conformément à l'application de la RTSM (ASHRAE, 2017). Cela explique qu'en fin de journée l'outil prédit une valeur de $\dot{q}_{total}$ plus élevée, i.e. celle-ci est augmentée par l'énergie radiative stockée en milieu de journée tel qu'indiqué par l'équation (3.28). Si on regarde en détail la journée typique de janvier à 8h, on note que le modèle d'élément finis prédit une baisse significative de $\dot{q}_{total}$ à la Figure 4.10 par rapport à la Figure 4.9. Cela est dû au fait que la température convective du toit, qui correspond à la température sol-air, est plus faible. Les déperditions énergétiques sont donc plus grandes. Cette température sol-air plus faible est due à l'émissivité du toit, i.e. celui-ci étant chauffé par l'air intérieur irradie des rayons infrarouges vers le ciel nocturne. En revanche, l'outil prédit une légère augmentation de $\dot{q}_{total}$ à la Figure 4.10 par rapport à la Figure 4.9, alors qu'à 8h, en janvier, pour une journée typique, aucun rayonnement solaire n'est présent (voir Tableau 4.8). Encore une fois, du fait de la méthode RTSM, l'outil prend en compte l'énergie radiative emmagasinée au long des dernières 24h, contrairement à la MEF.

Ces différences ayant été expliquées, les deux méthodes suivent toutefois une tendance similaire suivant les trois journées de mois typique étudiées. Ainsi, $\dot{q}_{total}$ est négatif au mois de janvier, les déperditions énergétiques sont importantes, le bâtiment doit être chauffé. À l'inverse, aux mois de mai et septembre, le flux thermique est entrant, de l'énergie doit être consommée pour neutralisée les flux thermiques apportés depuis l'extérieur du bâtiment, celui-ci doit être climatisé. Ceci est conforme aux variations de températures annuelles et tend à valider le principe général des deux méthodes.

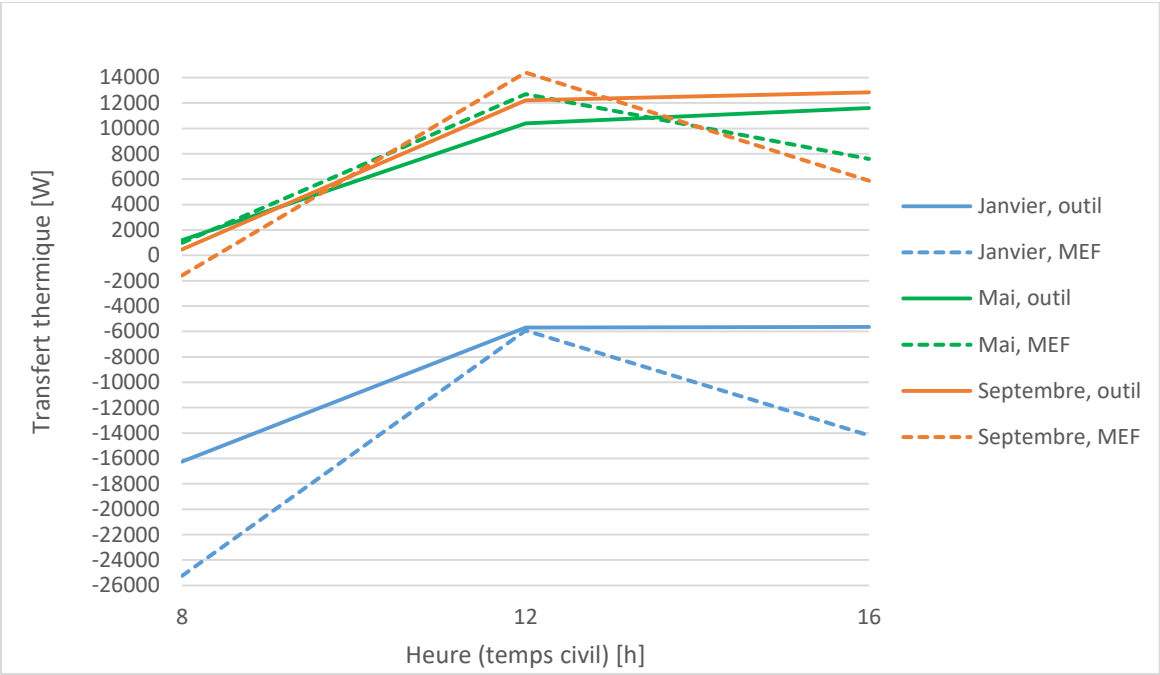


Figure 4.10. Comparaison du flux total transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen de la MEF et de l'outil de calcul énergétique, avec rayonnement solaire.

Les conclusions suivantes peuvent alors être observées :

- Lorsque seules la conduction et la convection sont considérées au travers de l'enveloppe du bâtiment, une bonne correspondance entre les prédictions de la MEF et de l'outil de calcul énergétique est observée.
- Cette correspondance, même si elle est toujours observable, se dégrade lorsque le rayonnement solaire est inclus.
- Contrairement à la MEF, l'outil de calcul énergétique tient compte de l'inertie thermique du bâtiment face au rayonnement solaire, ce qui semble expliquer les différences observées.
- De manière générale, les deux méthodes donnent des prédictions tendant à être cohérentes et à suivre la logique de la variation des températures annuelles.

4.2.5 Comparaison du bâtiment avec le logiciel SIMEB

À l'échelle du bâtiment, les résultats de l'outil CEEB sont comparés avec le logiciel SIMEB développé par Hydro Québec, très populaire au Québec, dont les objectifs et les paramètres de modélisation sont similaires. Le logiciel SIMEB utilise comme moteur de calcul le code DOE

largement reconnu dans l'industrie. Le modèle de bâtiment étudié auparavant est reproduit sur SIMEB pour comparer aux résultats obtenus avec CEEB.

Le bâtiment est modélisé en suivant les mêmes options de géométrie, d'orientation, d'enveloppe thermique et de température de consigne que celles déjà présentées au début de la section 4.2.1. Afin de pouvoir comparer des situations similaires malgré des outils différents, il faut s'assurer d'avoir des paramètres évalués semblables et de bien comprendre les données d'entrée de SIMEB. La différence principale entre SIMEB et l'outil CEEB réside dans l'évaluation de l'énergie. Le premier évalue la consommation énergétique en fonction des équipements mécaniques décrits alors que le deuxième évalue la charge thermique en fonction uniquement des conditions de consigne et des données météorologiques sans prise en compte du rendement des équipements de chauffage ou de climatisation. Par conséquent, pour évaluer la charge en chauffage et en climatisation du bâtiment dans SIMEB, des équipements mécaniques avec un rendement énergétique le plus près possible d'une valeur de un sont choisis. Ainsi leur consommation énergétique sera proche de la charge thermique échangée entre le bâtiment et l'extérieur. Un système CVCA central avec serpentin électrique (rendement de 100%) pour le chauffage et un système avec détente directe (taux de rendement énergétique - *Energy Efficiency Ratio* EER de 4, étant le minimum) sont sélectionnés. Les paramètres d'entrée suivants sont forcés à zéro dans SIMEB : éclairage intérieur et extérieur, humidification, infiltration, charge aux prises, procédés et évacuateurs. Cependant, le logiciel SIMEB n'autorise pas de réduire à zéro la valeur par défaut des paramètres d'entrée suivants : eau chaude sanitaire, ventilation (automatique) et charge lié aux occupants (densité d'occupation à 0,09 m^2/occupant, chaleur sensible à 0,3 W/occupant, chaleur latente à 0,3 W/occupant). Pour annuler la contribution de ces derniers paramètres, leur horaire de fonctionnement est édité à zéro pour toute heure de la journée et tout jour de l'année.

Les données horaires de charge thermique de SIMEB sont plus difficilement extraites du logiciel puisqu'elles ne sont pas directement accessibles et varient selon différents types de solutions et de classes prédéfinies dans l'interface. Il est néanmoins possible de les obtenir en mode chauffage, alors que le bilan thermique est négatif. C'est pourquoi le mois de janvier est analysé en termes de transfert thermique au travers de l'enveloppe du bâtiment à 8h, 12h et 16h selon l'outil de calcul développé, la MEF et le logiciel SIMEB. Il est important de noter que les résultats de SIMEB sont obtenus à partir d'une moyenne des résultats pour chaque journée du mois de janvier 2007 (Hydro-Québec, 2018) à Montréal, alors que CEEB et la MEF utilisent les données météos d'une journée

typique du mois de janvier à Montréal en se basant sur les données des années 1998 à 2014 (fichiers CWEC). La Figure 4.11 présente le flux total $\dot{q}_{total}$ transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen des trois méthodes à 8h, 12h et 16h pour le mois de janvier à Montréal. On note alors que le flux thermique calculé par l'outil CEEB présente des résultats semblables à ceux de SIMEB. De plus, on observe une correspondance plus forte entre le logiciel SIMEB et CEEB qu'entre SIMEB et la MEF. Ce constat est positif car le logiciel SIMEB, contrairement à la MEF, prend en compte le déphasage thermique comme CEEB.

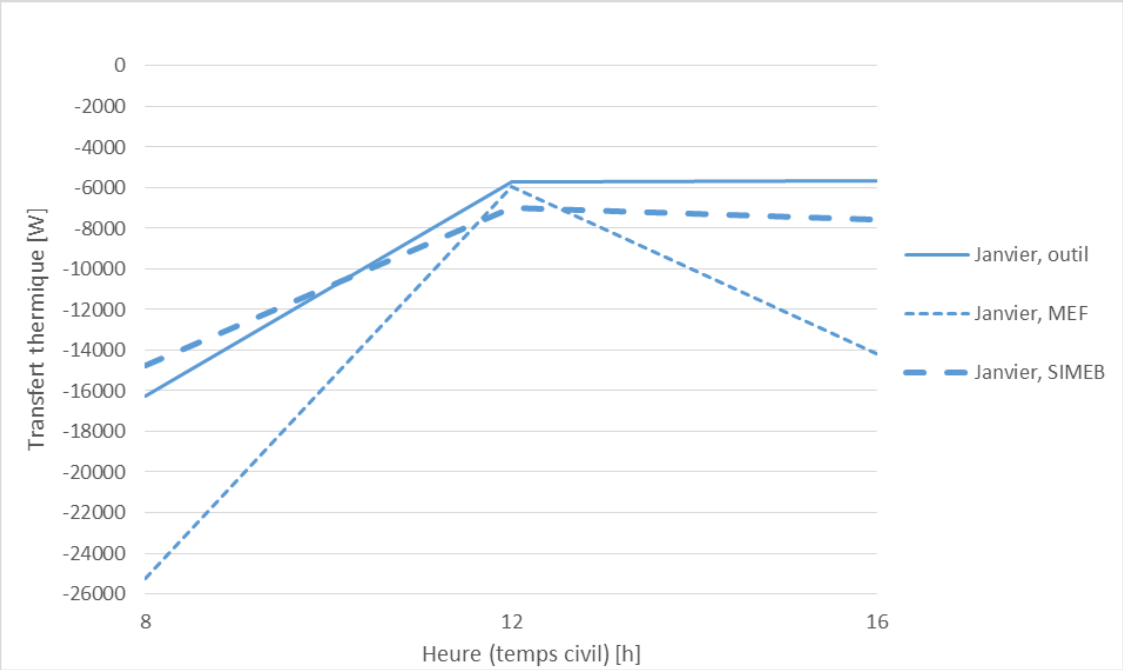


Figure 4.11. Comparaison du flux total transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment au mois de janvier déterminé au moyen de l'outil CEEB, de la MEF et de SIMEB.

Les bilans thermiques positifs, en mode climatisation peuvent être extraits du logiciel SIMEB selon leur appel de puissance, c'est-à-dire la puissance thermique de climatisation maximale. Le Tableau 4.11 présente le flux total $\dot{q}_{total}$ maximum transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment déterminé au moyen de l'outil CEEB, de la MEF et du logiciel SIMEB pour une journée moyenne des mois de Mai et de Septembre. Une assez bonne correspondance entre les méthodes est obtenue, notamment pour le mois de mai. Le mois de septembre est surestimé par l'outil CEEB et la MEF comparativement à SIMEB, qui prédit une charge de climatisation moins conservatrice.

Tableau 4.11. Comparaison du flux total maximal transitant au travers de l'enveloppe du bâtiment au mois de mai et septembre déterminé au moyen de l'outil CEEB, de la MEF et de SIMEB.

Mois		**Appel de puissance [W]**
Mai	outil	11 621
	MEF	12 700
	SIMEB	11 600
Septembre	outil	12 846
	MEF	14 403
	SIMEB	9 600

Les différences entre les résultats de SIMEB et ceux de l'outil peuvent être expliquées par divers facteurs d'imprécision. Tout comme CEEB, SIMEB permet de simuler le comportement énergétique de bâtiments commerciaux et institutionnels en intégrant des valeurs d'entrées détaillées des caractéristiques du bâtiment, des données météorologiques selon le lieu géographique et des données horaires liés à l'utilisation du bâtiment. Toutefois, l'extraction des résultats et le détail de la séparation de la puissance requise selon chaque type de flux thermique n'est pas aussi accessible que dans l'outil développé. Ainsi, il n'est pas évident de cibler précisément la provenance des écarts. Dans SIMEB, les résultats de la consommation d'énergie en kWh sont plutôt présentés par source (électricité et combustible – gaz naturel, propane, mazout) et par type de systèmes mécaniques (chauffage, climatisation, éclairage, équipements, ventilateur, pompe, eau chaude). En revanche, l'outil CEEB présente les résultats selon le type de transfert thermique (conduction ou convection au travers des murs, radiation au travers des fenêtres, infiltrations etc.). De plus, SIMEB utilise les données météorologiques de l'année 2007 de Montréal (Hydro-Québec, 2018). Pour rappel, les données météorologiques de l'outil de calcul développé reposent sur les fichiers CWEC de Montréal, lesquels sont composés à partir des données météorologiques allant de 1998 à 2014. Cette différence peut légèrement affecter les températures moyennes extérieures et le rayonnement solaire au sol. Par ailleurs, les différentes approximations faites de manière à annuler les charges dues aux équipements mécaniques et dû à la simplification des paramètres du modèle analysé peuvent être la cause d'incertitudes. Le choix du système CVCA, bien qu'ayant un rendement énergétique proche de un, induit une certaine erreur.

Comparé au CEEB, les limitations de SIMEB concernent l'absence de présentation des résultats par type flux thermiques (complexifiant la validation physique du modèle), la complexité reliée à l'accès et la modification des données d'entrée météorologiques, les normes et méthodes de calcul non accessibles pour d'éventuelles modifications (reprogrammation difficile) et l'absence de certains paramètres de modélisation impactant de façon importante l'efficacité énergétique tels les ponts thermiques à travers les parois opaques et les écrans thermiques sur les parois transparentes. Pour rappel, la limitation principale du CEEB en comparaison avec SIMEB est l'absence d'intégration des systèmes mécaniques CVAC, laquelle est essentielle en phase avancée de conception de systèmes de chauffage et de climatisation pour les grands projets immobiliers.

En conclusion de ce chapitre, l'outil de calcul énergétique CEEB a été comparé à différentes échelles d'un bâtiment avec la MEF. Deux échelles ont été considérées : (i) un mur de briques d'argile modélisé localement; et (ii) un bâtiment dans son ensemble considéré avec les convections intérieures, extérieures et le rayonnement solaire. Puis, l'outil de calcul CEEB a été comparé avec le logiciel SIMEB à l'échelle du bâtiment. Ce travail a, alors, non seulement permis d'analyser la fiabilité du CEEB au regard d'autres méthodes, mais aussi d'identifier les inconvénients et avantages de chacune d'entre elles. Ainsi, l'outil de calcul énergétique CEEB permet de facilement appréhender la physique globale du bâtiment et de comparer différentes configurations de bâtiments. Il permet aussi de tenir compte de l'inertie thermique du bâtiment face au rayonnement solaire en suivant le principe de la RTSM. Les modèles d'éléments finis permettent, quant à eux, une analyse détaillée des phénomènes thermiques survenant au sein de la structure ou d'un de ses éléments. Ainsi, ils peuvent calculer le transfert de chaleur à travers des ponts thermiques non homogènes ou, à plus grande échelle, à travers les différentes zones thermiques constituant l'enveloppe du bâtiment. Par ailleurs, le logiciel SIMEB est un outil de vérification de la consommation énergétique du bâtiment adapté au contexte québécois permettant d'intégrer les systèmes mécaniques CVCA lorsque ceux-ci sont connus.

CHAPITRE 5 EXEMPLE D'APPLICATION DE L'OUTIL : CAS D'UN BÂTIMENT SCOLAIRE À RÉHABILITER

5.1 Présentation du cas d'étude

Dans ce chapitre, l'outil de calcul énergétique développé est appliqué à un bâtiment institutionnel théorique type pour lequel différentes solutions de réhabilitation sont analysées afin d'améliorer son efficacité énergétique. La toiture est un élément clé avec un fort potentiel pour la proposition de stratégies énergétiques pour un bâtiment institutionnel québécois, tel l'ajout d'une serre. Cette composante du bâtiment est donc investiguée en détail ci-après. Tout d'abord, un bâtiment type institutionnel situé à Montréal (station météorologique McTavish) est étudié selon sept cas :

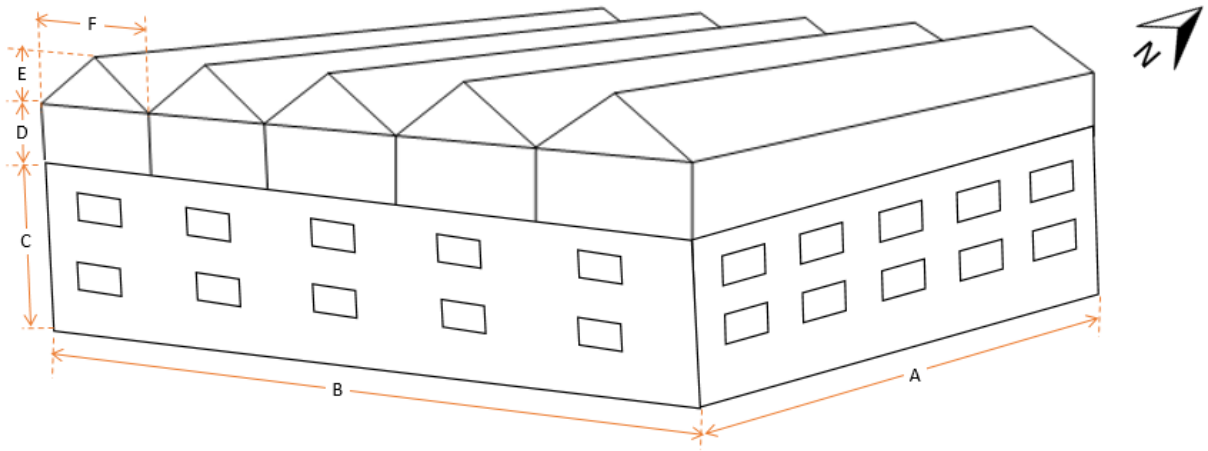
- Cas B1 – Bâtiment seul initial;
- Cas B2 – Bâtiment avec serre active chauffée sur toit;
- Cas B3 – Bâtiment sans ponts thermiques au sein des murs, des fenêtres et du toit;
- Cas B4 – Bâtiment avec ratio de vitrage augmenté à 50% (type de vitrage inchangé);
- Cas B5 – Bâtiment avec meilleure isolation des murs : 12 pouces d'isolant et aucun pont thermique au sein de ceux-ci;
- Cas B6 – Bâtiment avec meilleure isolation du toit : 18 pouces d'isolant et aucun pont thermique au sein de celui-ci;
- Cas B7 – Bâtiment avec meilleure isolation des fenêtres et aucun pont thermique au sein de celles-ci.

Ensuite, la serre type est étudiée seule, puis intégrée à l'analyse du bâtiment en étant ajoutée sur le toit. Cela donne les quatre cas suivants :

- Cas S1 – Serre seule classique sur sol;
- Cas S2 – Serre sur le toit du bâtiment;
- Cas S3 – Serre sur le toit du bâtiment avec écrans thermiques sur le vitrage du toit;
- Cas S4 – Serre sur le toit du bâtiment avec écrans thermiques sur le vitrage du toit et des murs.

5.2 Géométrie du bâtiment et de la serre sur toit

Un bâtiment type construit il y a de 30 à 50 ans est considéré puisqu'il représente un défi de modernisation pour les années à venir. Son manque d'isolation, entre autres au toit, en fait un cas intéressant en termes de déperditions thermiques qu'il est possible de récupérer pour chauffer la serre. Une serre type est considérée, de construction moderne, s'étendant sur toute la superficie de toiture du bâtiment d'accueil suivant la disposition des serres commerciales Lufa (2020). Le Tableau 5.1 et la Figure 5.1 présentent les dimensions générales du bâtiment et de la serre utilisées. Les dimensions sont typiques des bâtiments d'éducation de cet âge (Montenegro & al., 2012; Shaw & Jones, 1979) ou des serres sur toit existantes (Fermes Lufa, 2020; Kuroyanagi, 2017; Les Industries Harnois Inc., 2019; Nexus Greenhouse Systems, 2019; Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013). Il est à noter que la géométrie considérée est simplifiée pour les fins de l'analyse thermique du cas, et donc ne considère pas les structures connexes, le parapet, les équipements mécaniques, etc.



A = 100 m; B = 50m; C = 6m; D = 5m; E = 2m; F = 10m

Figure 5.1 Géométrie du bâtiment éducationnel et de la serre sur toit types analysés.

Tableau 5.1. Dimensions du bâtiment éducationnel et de la serre sur toit types analysés.

Dimension	Bâtiment	Serre
Longueur façade sud et nord	50 m	50 m
Longueur façade est et ouest	100 m	100 m
Hauteur	6 m, 2 étages	5 m mur, 7 m crête toit
Aire de l'enveloppe	6 800 m^2 (5 côtés) et 11 800 m^2 (6 côtés)	4802 m^2 (5 côtés) et 9 802 m^2 (6 côtés)
Aire du plancher	5 000 m^2	5 000 m^2
Volume	30 000 m^3	30 000 m^3

5.3 Propriétés du bâtiment et de la serre

5.3.1 Parois opaques

Le Tableau 5.2 présente les propriétés utilisées par l'outil concernant les parois opaques du bâtiment et de la serre sans écrans thermiques (matériaux, coupes, facteurs de série temporelle, conductivité thermique, etc.). Ces données permettent de calculer les gains par conduction des parois opaques et d'identifier les facteurs RTF au sein de l'ASHRAE (2017). Lorsqu'une serre chauffée est appliquée sur le toit du bâtiment (cas B2), le coefficient de transfert de chaleur global du toit du bâtiment et les coefficients CTS correspondant demeurent inchangés. En effet, on considère une serre avec un système de culture hydroponique verticale dont les couches de substrat ajoutées ne jouent pas le rôle d'isolant du toit. Concernant le cas B5 (meilleure isolation des murs), la cellulose en vrac est appliquée sur 12 pouces et non 8. Le coefficient de transfert de chaleur global des murs passe donc de 0,224 à 0,132 W/m²-K. Concernant le cas B6 (meilleure isolation du toit), les fibres cellulosiques sont pulvérisées sur 18 pouces et non 12. Le coefficient de transfert de chaleur global du toit passe donc de 0,158 à 0,095 W/m²-K. Les coefficients de transfert de chaleur globaux correspondants sont donc ajustés en étant calculés au moyen de l'outil CEEB.

L'étude de la serre seule (cas S1) n'inclut pas de coefficients CTS ou RTF (facteurs de la série temporelle de convection et de radiation, respectivement), car ses parois extérieures sont des vitrages non isolés, très légers. La méthode RTSM qui a pour but de prendre en compte les effets d'inertie thermique est donc peu pertinente pour ce cas. On considère donc le cas limite pour lequel 100% des gains radiatifs sont immédiatement transformés en convectif. Concernant le cas de la serre sur toit de bâtiment (cas S2), la même hypothèse est considérée pour les coefficients RTF.

Cependant, les coefficients CTS sont pris en compte pour le plancher de la serre comme celle-ci est construite sur le toit isolé du bâtiment qui peut générer un effet d'amortissement et de déphasage sur les transferts thermiques par conduction. Le coefficient de transfert de chaleur global du plancher de la serre devient celui du toit du bâtiment. Aucun pont thermique n'y est considéré, car on propose la réfection du toit avec une double ossature lors de l'installation de la serre. Concernant les cas de serres S3 et S4, des coefficients RTF sont considérés pour tenir compte de la présence d'écrans thermiques le long des parois transparentes ou translucides (voir sous-section suivante).

Tableau 5.2. Propriétés des parois opaques du bâtiment et de la serre.

	Bâtiment		Serre	
	Mur	Toit	Plancher sur sol	Plancher sur bâtiment
Matériaux isolants de base, sans ajout	Cellulose en vrac 8 pouces	Fibres cellulosiques pulvérisées 12 pouces	Mousse de polyuréthane 2 pouces	Fibres cellulosiques pulvérisées 12 pouces
Matériaux de revêtement	Brique rouge	Bardeaux noirs	Béton	--
Absorptance solaire (α)	0,63	0,97	0,60	--
Présence de ponts thermiques	Simple ossature	Simple ossature	Dalle de fondation	--
Coefficient de transfert de chaleur global [W/m²-K]	0,224	0,158	0,410	--
Absence de ponts thermiques	Double ossature	Double ossature	--	Double ossature
Coefficient de transfert de chaleur global [W/m²-K]	0,194	0,137	--	0,194
Facteurs de la série temporelle de conduction (CTS)	Mur #13	Toit #4	--	Toit #4
Facteurs de la série temporelle de radiation (RTF)	Zone thermique moyenne sans tapis avec 10% de surface vitrée (Sauf pour le cas B4 dont le ratio de vitrage est augmenté à 50%)		--	--

5.3.2 Parois transparentes ou translucides

Le Tableau 5.3 présente les propriétés utilisées par l'outil concernant les parois transparentes ou translucides du bâtiment et de la serre. Le type de cadrage, le coefficient de transfert de chaleur global et les dimensions de la fenêtre correspondent à une fenêtre type de l'ASHRAE (2017). Les fenêtres ouvrables (*operable window*) sont considérées pour le bâtiment scolaire. Les fenêtres de type mur-rideau et celles avec vitrage incliné sont considérées, respectivement, pour les murs et le toit de la serre. Leur géométrie est illustrée à la Figure 5.2. Le cadrage est considéré en aluminium. Pour rappel, le coefficient *SHGC* correspond à la partie du rayonnement solaire incident traversant une fenêtre. Comme il s'agit d'un bâtiment datant de 30 à 50 ans et d'une serre typique, le même type de fenêtre est considéré sur toutes les façades du bâtiment et de la serre. Le coefficient *IAC* permet de tenir compte de l'ombrage intérieur ou d'un écran thermique tel un rideau. Il s'agit d'un problème complexe, et la valeur de ce coefficient dépend non seulement du type d'ombrage (ombrage de type lattes – stores vénitiens ou persiennes – ou rideaux thermiques – stores déroulants ou moustiquaires), mais également de leurs propriétés (transmittance et absorptance), de leur position (ouvert/fermé/intermédiaire) et du type de vitrage (qui influence leurs propriétés). Pour les cas de bâtiment (B1 à B7) et pour les cas de serre S1 et S2, aucun écran thermique n'est considéré. On considère donc $IAC = 1$. Pour les cas de bâtiment, les coefficients de RTF associés aux parois transparentes considèrent qu'aucun écran thermique n'est présent (zone thermique moyenne sans tapis avec 10% de surface vitrée pour tous les cas de bâtiment excepté pour le cas B4 avec 50% de surface vitrée). Pour les cas de serre S1 et S2, aucune inertie thermique significative ne sera observable au niveau des parois transparentes, aucun coefficient de RTF n'est considéré, comme énoncé à la sous-section précédente.

Tableau 5.3. Propriétés utilisées par l'outil concernant les parois transparentes ou translucides du bâtiment et de la serre.

	Bâtiment		Serre	
	Cas B1 à B6	Cas B7	Murs	Toit
Références				
Fenêtre	ID#4	ID#19	ID#4	ID#4
Vitrage	ID#5b	ID#17b	ID#5b	ID#5b
Double vitrage				
Épaisseur de vitre	6 mm	20 mm	6 mm	6 mm
Inter-vitrage	6 mm d'air	13 mm d'argon	6 mm d'air	6 mm d'air
Dimensions	1,2 x 1,5 m	1,2 x 1,5 m	2 x 2 m	2 x 2 m
Coefficient de transfert de chaleur global [W/m²-K]				
Avec pont thermique	4,62	--	--	--
Sans pont thermique	3,61	2,53	3,79	5,46
Autres propriétés				
SHGC à incidence normale	0,70	0,60	0,60	0,60
Transmittance en gamme visible	0,78	0,73	0,78	0,78

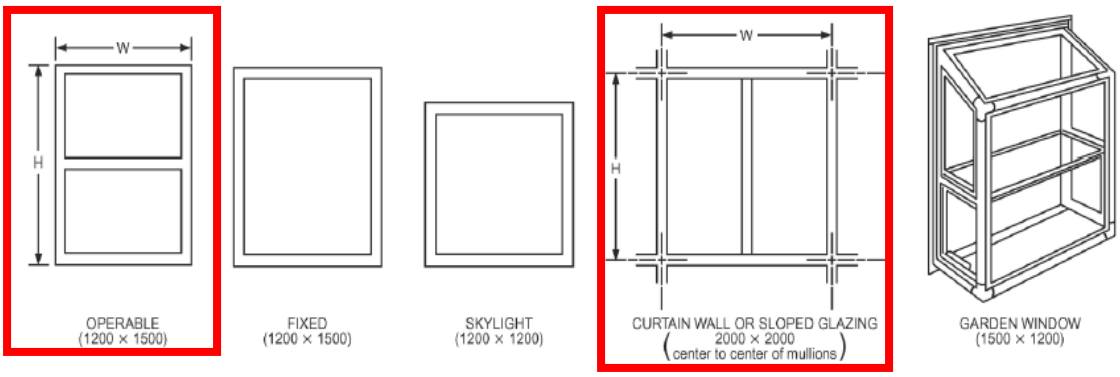
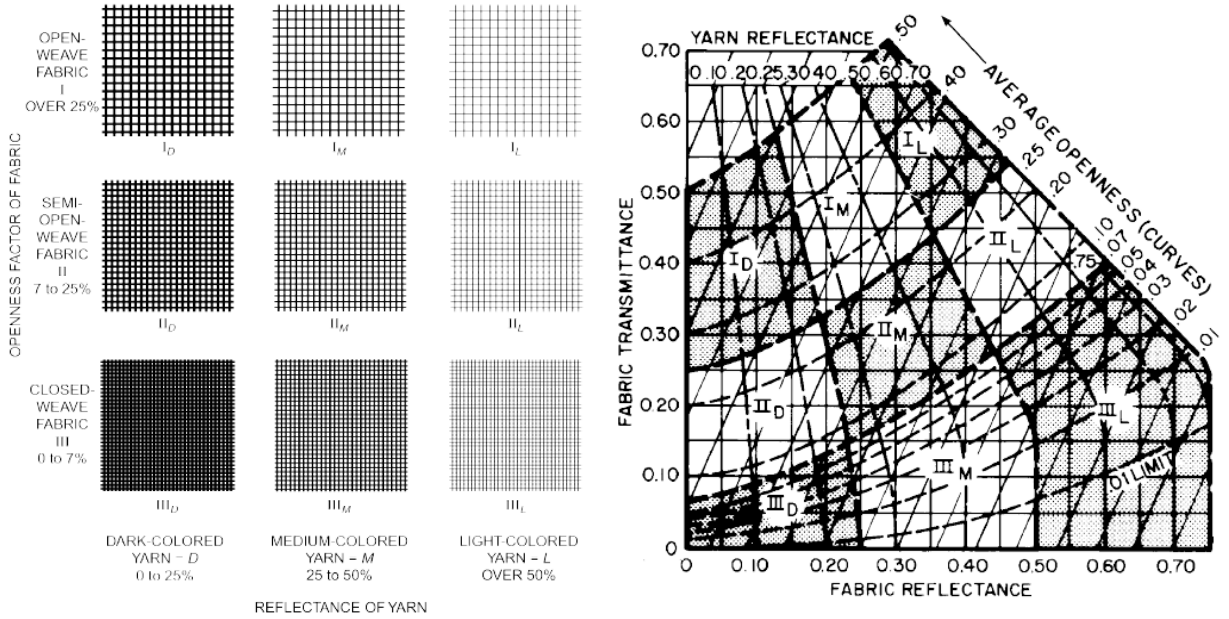


Figure 5.2. Géométrie des fenêtres types et cadrage correspondants documentées par (ASHRAE, 2017)

Des écrans thermiques mobiles dans la serre sont considérés pour les cas S3 et S4. Ceux-ci sont déployés la nuit pour contribuer à l'isolation de celle-ci. De plus, en été, ces écrans peuvent être déployés par journées chaudes et ensoleillées pour diminuer les gains solaires et la surchauffe. Un ombrage intérieur de type rideaux thermiques, stores déroulants ou moustiquaires est considéré. En effet, la valeur du coefficient *IAC* correspondant n'est pas significativement influencée par l'angle d'incidence du rayonnement, i.e. une valeur constante d'*IAC* peut être utilisée. L'ASHRAE (2017) suggère d'utiliser *IAC* = 0,6, ce qui est retenu ici. On peut raisonnablement accepter que les écrans thermiques soient déroulés seulement de nuit l'hiver afin de réduire les déperditions thermiques et de jour en été afin de minimiser le rayonnement solaire, soit de 17h à 8h de octobre à avril et de 9h à 16h de mai à septembre. Cet horaire d'utilisation des rideaux thermiques mobiles est pris en compte par l'outil CEEB. Ces rideaux thermiques sont importants car ils créent un léger phénomène d'amortissement et de déphasage des flux thermiques. Des coefficients RTF sont donc pris en compte pour les cas S3 et S4, au contraire des cas S1 et S2 ou aucune inertie thermique ne sera observable du fait de l'absence d'écrans. Pour les cas S3 et S4, une zone thermique à faible inertie est considérée avec un tapis et 90% de surface vitrée. Cette classification permet de déterminer les coefficients RTS associés au sein de l'ASHRAE (2017).

Les tissus de rideaux thermiques peuvent être classés en fonction de leurs propriétés optique solaire ayant des valeurs spécifiques de transmission et de réflectance du tissu. Des essais d'optique solaire permettent de déterminer avec précision les propriétés solaires des tissus de draperies. Les fabricants peuvent généralement fournir des valeurs de transmittance et de réflectance solaires des produits alors que le facteur d'ouverture (rapport de la surface ouverte entre les fibres à la surface totale du tissu) est une propriété mesurable avec précision (ASHRAE, 2017). La Figure 5.3 (a) illustre la classification des rideaux thermiques en fonction de leurs propriétés. La Figure 5.3 (b) présente le graphique liant les propriétés de transmittance et de réflectance du tissu à son facteur d'ouverture. Un rideau thermique avec un tissu à fibres fermées (facteur d'ouverture du tissu de 0 à 7%) et de couleur claire (réflectance du fil de plus de 50%) est considéré pour le toit de la serre. Ainsi, la classification du rideau est IIIL. On suppose aussi ici 100% de couverture, i.e. la largeur du tissu utilisé est le double de la largeur de la fenestration.



(a) (b)

Figure 5.3. Tissus de rideaux thermiques : (a) Classification; et (b) Propriétés du tissu (ASHRAE, 2017).

5.3.3 Gains internes thermiques : occupants et éclairage

Pour rappel, les gains internes thermiques déterminés par l'outil de calcul énergétique se divisent en deux catégories (section 3.7) : (i) les occupants; et (ii) l'éclairage et les appareils. Les gains produits par les appareils sont négligés par l'outil car ils comportent trop d'incertitude. En outre les ignorer permet d'estimer une charge de chauffage conservatrice durant l'hiver. Les taux d'occupation et d'éclairage du bâtiment peuvent être déduit d'un horaire de fonctionnement classique pour un établissement d'enseignement ouvert 10 mois par an (Hydro-Québec, 2018). Les valeurs de puissances thermiques dégagées par les occupants ou par l'éclairage sont déduites de l'ASHRAE (2017) en considérant, respectivement, un bâtiment de bureaux modérément actif ou un lieu d'audience publique. La combinaison des taux d'occupation et d'éclairage permet alors de déterminer les gains internes thermiques correspondants tel que présenté au Tableau 5.4, en considérant 500 personnes lorsque le bâtiment est pleinement occupé.

Tableau 5.4. Gains internes thermiques liés aux occupants et à l'éclairage du bâtiment éducationnel pouvant inclure une serre sur le toit avec l'horaire correspondant.

			Gains internes (W)				
			Occupants			Éclairage	
			Sensible		Latent	Sensible	
Heure	Taux d'occupation	Taux d'éclairage	Radiatif	Convectif		Radiatif	Convectif
1	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25
2	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25
3	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25
4	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25
5	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25
6	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25
7	0,1	0,3	2175	1575	2750	4522,5	2227,5
8	0,9	0,3	19575	14175	24750	4522,5	2227,5
9	0,9	0,9	19575	14175	24750	13567,5	6682,5
10	0,9	0,9	19575	14175	24750	13567,5	6682,5
11	0,9	0,9	19575	14175	24750	13567,5	6682,5
12	0,8	0,9	17400	12600	22000	13567,5	6682,5
13	0,8	0,9	17400	12600	22000	13567,5	6682,5
14	0,8	0,9	17400	12600	22000	13567,5	6682,5
15	0,8	0,9	17400	12600	22000	13567,5	6682,5
16	0,5	0,7	10875	7875	13750	10552,5	5197,5
17	0,2	0,5	4350	3150	5500	7537,5	3712,5
18	0,1	0,5	2175	1575	2750	7537,5	3712,5
19	0,3	0,7	6525	4725	8250	10552,5	5197,5
20	0,3	0,7	6525	4725	8250	10552,5	5197,5
21	0,3	0,7	6525	4725	8250	10552,5	5197,5
22	0,1	0,3	2175	1575	2750	4522,5	2227,5
23	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25
24	0	0,05	0	0	0	753,75	371,25

5.3.4 Infiltrations d'air

Cette section décrit le processus suivi pour déterminer les paramètres requis pour le calcul du flux thermique dû aux infiltrations d'air par l'outil (application de la section 3.6). La conversion de la vitesse du vent aux conditions locales est réalisée au moyen des paramètres de la Figure E.6.16 de l'Annexe E (ASHRAE, 2017) en utilisant les catégories de terrain suivantes :

- Station météorologique McTavish : catégorie 1.
- Conditions locales de l'établissement scolaire : catégorie 2.

Pour la combinaison de l'effet du vent et de l'effet de cheminée menant au calcul de l'infiltration, plusieurs hypothèses sont considérées. D'abord, il est requis d'estimer l'air d'infiltration effective ELA_4 pour le bâtiment pour l'application de l'équation (3.26). Pour ce faire, le logiciel Residential Energy Dynamics (2016) est utilisé. Ce type de logiciel nécessite la superficie et le volume du bâtiment, et la surface de son enveloppe. Il nécessite aussi l'exposant de pression n correspondant aux orifices par lesquels passent les infiltrations d'air, ici considéré égal à 0,65 en suivant les recommandations de l'ASHRAE (2017). Le taux de fuite normalisé NLR_{50} à une pression différentielle de 50 Pa (*Normalized Leakage Rate*) est aussi requis. En s'appuyant sur la littérature de l'Annexe C, le taux de fuite normalisé NLR_{75} à une pression différentielle de 75 Pa peut être estimé à 1,45 L/s-m² pour le bâtiment sans serre. Ce taux de fuite peut être converti en NLR_{50} en utilisant l'équation (C.1). On obtient un NLR_{50} de 1,11 L/s-m². En ce qui concerne la serre, le taux de fuite choisi pour la serre, le NLR_{75} est estimé, au moyen de la revue de la littérature, à 2,90 L/s-m², et converti en NLR_{50} valant 2,23 L/s-m². L'application détaillée du logiciel Residential Energy Dynamics (2016) est alors illustrée en Annexe E et permet de déterminer les valeurs de ELA_4 présentées au Tableau 5.5. Il est important de noter que calcul de ELA_4, s'effectue en considérant les six côtés de l'enveloppe lorsque le bâtiment ou la serre sont supposés seuls (cas B1, B3 à B7, et S1). Le calcul se base seulement sur les cinq côtés de l'enveloppe lorsque la serre est sur le toit du bâtiment, et y est donc associée (cas B2, et S2 à S4).

Le Tableau 5.5 présente aussi les valeurs de coefficients d'effet de cheminée et de vent C_s et C_w utilisés pour calculer le débit d'infiltration $\dot{V}_{inf}$ au travers de l'enveloppe du bâtiment ou de la serre. Ces coefficients sont déduits de la Figure E.6.17 constituée d'extraits de l'ASHRAE (2017). Comme le bâtiment d'éducation étudié est situé en région urbaine Montréalaise, il est considéré

entouré d'autres bâtiments et la classe d'abri 3 est supposée. Celle-ci correspond à un abri ou une protection due à d'autres bâtiments de l'autre côté de la rue. Pour rappel, le bâtiment seul, la serre seule et le bâtiment avec serre sur le toit sont respectivement composés de deux, un et trois étages.

Tableau 5.5. Paramètres utilisés pour calculer le débit d'infiltration $\dot{V}_{inf}$ au travers de l'enveloppe du bâtiment ou de la serre analysés dans cette étude.

	Bâtiment		Serre	
	Cas B1 et Cas B3 à B7	Cas B2	Cas S1	Cas S2 à S4
Effective Leakage Area à 4 Pa (ELA_4) [cm^2]	9840	5670	20080	11700
Coefficient d'effet de cheminée (C_s) [(m^3/s)^2/(cm^2)^2/K]	0,000290	0,000290	0,00029	0,000435
Coefficient d'effet du vent (C_w) [(m³/s)²/(cm²)²/(m/s)²]	0,000231	0,000231	0,000231	0,000271

5.4 Ventilation et température de consigne

Aucun système de ventilation du bâtiment n'est ici étudié. Le taux de changement d'air afin d'en contrôler sa qualité n'est donc pas considéré par l'outil de calcul énergétique. Cela correspond à la situation d'un système sans recirculation secondaire pour la ventilation : l'air neuf est chauffé et climatisé dans la salle mécanique. Par ailleurs, il peut être supposé que la serre n'ait pas besoin de système de ventilation, car les plantes oxygènent l'air.

Les températures de consigne pour le bâtiment et pour la serre considérées par l'outil de calcul énergétique sont présentées au Tableau 5.6 et au Tableau 5.7, respectivement. Pour rappel, dans le cas du bâtiment B2 où une serre chauffée est considérée sur le toit, la température sol-air au toit devient la température de consigne de la serre. En effet, le toit du bâtiment n'est plus en interaction avec l'air extérieur, mais bien avec l'air de la serre sur son toit. De la même manière, pour les cas S2 à S4 où la serre se situe sur le bâtiment, la température du sol devient la température de consigne du bâtiment.

Tableau 5.6. Température de consigne [°C] du bâtiment.

	Mois											
Heure	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
1	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
2	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
3	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
4	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
5	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
6	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
7	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
8	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
9	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
10	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
11	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
12	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
13	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
14	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
15	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
16	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
17	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
18	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
19	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
20	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
21	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
23	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
24	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Tableau 5.7. Température de consigne [°C] de la serre.

	Mois											
Heure	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
1	14	14	14	14	30	30	30	30	14	14	14	14
2	14	14	14	14	30	30	30	30	14	14	14	14
3	14	14	14	14	30	30	30	30	14	14	14	14
4	14	14	14	14	30	30	30	30	14	14	14	14
5	14	14	14	14	30	30	30	30	14	14	14	14
6	16	16	16	16	26	26	26	26	16	16	16	16
7	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
8	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
9	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
10	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
11	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
12	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
13	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
14	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
15	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
16	18	18	18	18	26	26	26	26	18	18	18	18
17	16	16	16	16	26	26	26	26	16	16	16	16
18	14	14	14	14	26	26	26	26	14	14	14	14
19	14	14	14	14	26	26	26	26	14	14	14	14
20	14	14	14	14	26	26	26	26	14	14	14	14
21	14	14	14	14	26	26	26	26	14	14	14	14
22	14	14	14	14	26	26	26	26	14	14	14	14
23	14	14	14	14	30	30	30	30	14	14	14	14
24	14	14	14	14	30	30	30	30	14	14	14	14

5.5 Résultats

La section suivante présente un résumé des différents résultats obtenus par l'outil de calcul énergétique développé CEEB. Dans un premier temps, une comparaison des différents cas d'étude, correspondant aux solutions de réhabilitation thermique possibles, est menée. Dans un second temps, une analyse détaillée du comportement thermique du bâtiment existant, i.e. le cas B1, est présentée.

Les Tableau 5.8 et Tableau 5.9 présentent les charges de climatisation (i.e. flux de chaleur entrant) et les charges de chauffages (i.e. flux de chaleur sortant) maximales obtenus pour chaque cas de bâtiment et de serre, respectivement. Il est intéressant de noter que le rayonnement solaire incident sur une surface verticale orientée vers le Sud est plus important lorsqu'on s'éloigne du solstice d'été pour des latitudes telles que celles de Montréal, en raison d'un angle d'incidence plus favorable. Il n'est donc pas garanti que les maximums de charges de climatisation ou de chauffage aient lieu lors des mois les plus chauds ou les plus froids, respectivement. Ceci démontre la pertinence de l'outil de calcul énergétique qui permet de calculer les flux de chaleur entrant ou sortant de l'enveloppe pour une journée typique de chaque mois de l'année.

De manière générale, les résultats montrent que les paramètres suivants ont un impact considérable sur l'efficacité énergétique d'un bâtiment : les ponts thermiques et les écrans thermiques sur les surfaces vitrées. Le Cas B2 (ajout d'une serre chauffée sur son toit) constitue la solution de réhabilitation offrant la meilleure réduction de la consommation énergétique pour le bâtiment, tant pour la charge de chauffage en hiver que celle de climatisation en été. En revanche, l'ajout de surface vitrée au bâtiment (Cas B4) induit des pertes thermiques considérables. Bien que les gains par rayonnement soient favorisés, ceux-ci ne compensent pas les déperditions par conduction et convection. Il faudrait donc coupler l'ajout de surface vitrée avec le remplacement du type de vitrage pour une qualité supérieure tel au Cas B7 (meilleure isolation fenêtres, i.e. triple vitrage et absence de ponts thermiques).

Tableau 5.8. Charges de climatisation (i.e. flux de chaleur entrant) et charges de chauffages (i.e. flux de chaleur sortant) maximales obtenus pour chaque cas de bâtiment.

Cas de bâtiment	Charge de climatisation maximale [W]	Charge de chauffage maximale [W]
Cas B1 : Bâtiment existant	126668	85400
Cas B2 : Bâtiment avec serre chauffée sur toit	106477	51401
Cas B3 : Bâtiment sans pont thermique	124161	75196
Cas B4 : Bâtiment avec 50% de vitrage en plus	246000	180051
Cas B5 : Bâtiment avec meilleure isolation thermique des murs	126156	80853
Cas B6 : Bâtiment avec meilleure isolation thermique du toit	119246	75578
Cas B7 : Bâtiment avec meilleure isolation thermique des fenêtres	126908	72795

Le Cas S4 (ajout d'écrans thermiques au niveau du toit et des murs) constitue la solution offrant la meilleure réduction de la consommation énergétique pour la serre, tant pour la charge de chauffage en hiver que celle de climatisation en été.

Tableau 5.9. Charges de climatisation (i.e. flux de chaleur entrant) et charges de chauffages (i.e. flux de chaleur sortant) maximales obtenus pour chaque cas de serre.

Cas de serre	Charge de climatisation maximale [W]	Charge de chauffage maximale [W]
Cas **S1** : Serre seule	2342682	1261259
Cas **S2** : Serre sur toit de bâtiment	2297101	1173329
Cas **S3** : Serre sur toit de bâtiment avec écrans thermiques au niveau du toit	1419861	1148089
Cas **S4** : Serre sur toit de bâtiment avec écrans thermiques au niveau du toit et des murs	1276777	1148142

Une analyse détaillée des résultats pour le bâtiment originel sans réhabilitation (Cas B1) est proposée à la suite. La Figure 5.4 présente ainsi, pour le cas B1, le détail des charges de climatisation (en positif) ou de chauffage (en négatif) calculées par l'outil pour chaque heure d'une journée typique de chaque mois de l'année. La Figure 5.5 et la Figure 5.6 montrent, pour le Cas B1, pour une journée typique respectivement des mois de janvier et d'août, les différents flux de chaleurs calculés par l'outil, i.e. correspondant à gains ou des pertes suivants qu'ils soient positifs ou négatifs. Les flux totaux sont la somme des flux thermiques par conduction/convection, solaires (à travers les fenêtres, i.e. réfléchi, diffus et directs), internes et par infiltration. Pour rappel, il s'agit majoritairement de gains sensibles, seule une petite partie des gains internes provenant des occupants. La partie radiative des gains sensibles subit des phénomènes d'amortissement et de déphasage en raison du stockage thermique dans la masse, ce qui est bien pris en compte par les coefficients RTF. Les flux de chaleur par conduction/convection, de même que ceux par infiltration varient fortement entre l'hiver et l'été.

Heure	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	-73220.32	-66542.62	-37786.95	-16570.36	9355.97	12537.52	18200.24	16356.03	15312.76	-8887.08	-31255.78	-61653.27
2	-74862.55	-68345.39	-40239.08	-19458.96	6199.62	7318.38	13530.95	11811.88	13095.73	-10755.07	-32353.24	-62437.35
3	-76052.40	-70490.59	-42154.45	-22055.77	3568.93	2836.13	9477.10	7751.19	11370.73	-12248.54	-33261.66	-63321.93
4	-77856.06	-72057.15	-44161.86	-24613.80	996.89	-1317.16	5863.32	4244.10	9530.30	-13671.45	-34173.59	-64054.38
5	-79173.84	-73647.61	-46314.61	-26897.38	-1048.49	-4191.08	2739.80	1458.25	7751.39	-14967.69	-35109.97	-64834.75
6	-85399.78	-79934.64	-51897.76	-31187.90	-2329.80	2696.32	7220.61	4029.76	4849.17	-19115.39	-39592.02	-69749.30
7	-83331.21	-78343.46	-47315.80	-22797.22	7118.97	15744.25	19126.34	15309.72	12518.19	-14906.17	-36302.29	-66831.25
8	-44002.59	-36260.21	-2192.16	23899.99	53801.78	64621.74	66577.85	62187.42	58701.04	28733.27	4423.14	-26635.98
9	-29529.05	-19160.15	13797.21	42072.24	70715.26	83600.66	84834.57	80070.65	75699.90	44372.78	18141.22	-13166.03
10	-21267.59	-8355.64	24982.50	54482.86	81955.33	96152.49	96304.82	91325.57	86847.24	53900.60	25657.51	-6016.24
11	-14710.96	1097.65	35217.27	64847.36	91208.32	106798.23	105785.44	101901.73	95632.00	62931.45	32559.68	395.49
12	-13001.85	4247.32	39078.17	69271.15	94438.18	111039.91	109161.84	105323.14	98059.57	65161.21	33310.94	806.77
13	-7028.86	10862.59	46321.90	76069.40	99980.85	116943.01	115075.26	111993.17	104224.86	69779.37	37651.00	5286.04
14	-1679.12	16140.73	53085.70	81521.39	105302.46	122072.09	121001.24	119109.13	108879.90	74014.93	41387.99	9373.01
15	1775.97	20210.42	58123.62	84880.61	109221.80	126667.55	126122.98	123880.06	113265.97	76435.43	43476.59	11381.77
16	-15306.78	4025.81	42079.54	68837.22	95260.05	110840.77	111695.03	108351.86	97437.33	59289.33	25347.33	-6379.71
17	-38215.34	-16338.88	20506.24	47997.67	76691.95	92086.97	92422.56	89202.05	76820.08	36463.14	2242.34	-29322.82
18	-50158.00	-31583.74	7390.47	35384.21	65401.49	82264.88	81309.05	78538.31	63115.81	23720.10	-8060.30	-39843.98
19	-42846.61	-27332.70	9122.83	37051.54	69029.96	86894.41	86078.96	82221.85	66056.80	29557.19	-566.44	-32229.28
20	-45787.50	-32290.17	2440.85	28915.19	60123.79	77424.04	77723.36	74140.84	59319.92	25381.61	-3026.66	-34811.40
21	-48077.16	-36542.30	-3126.57	21995.81	52208.67	69114.11	70272.77	66876.44	53806.07	21567.09	-5423.41	-37079.52
22	-64875.17	-55184.40	-22456.86	1426.89	30717.66	46864.60	49033.92	46250.45	34399.86	3682.55	-21921.84	-53717.62
23	-67679.34	-59415.50	-28748.57	-6764.60	19368.44	26855.31	31039.99	28754.40	22346.68	-3223.71	-26967.78	-57444.05
24	-71189.13	-63402.12	-33648.33	-12108.06	13414.50	19037.52	23808.13	21926.65	18122.57	-6996.86	-30109.69	-60687.14

Figure 5.4. Charges de climatisation (en positif) ou de chauffage (en négatif) calculés par l'outil CEEB pour chaque heure d'une journée typique de chaque mois de l'année pour le Cas B1.

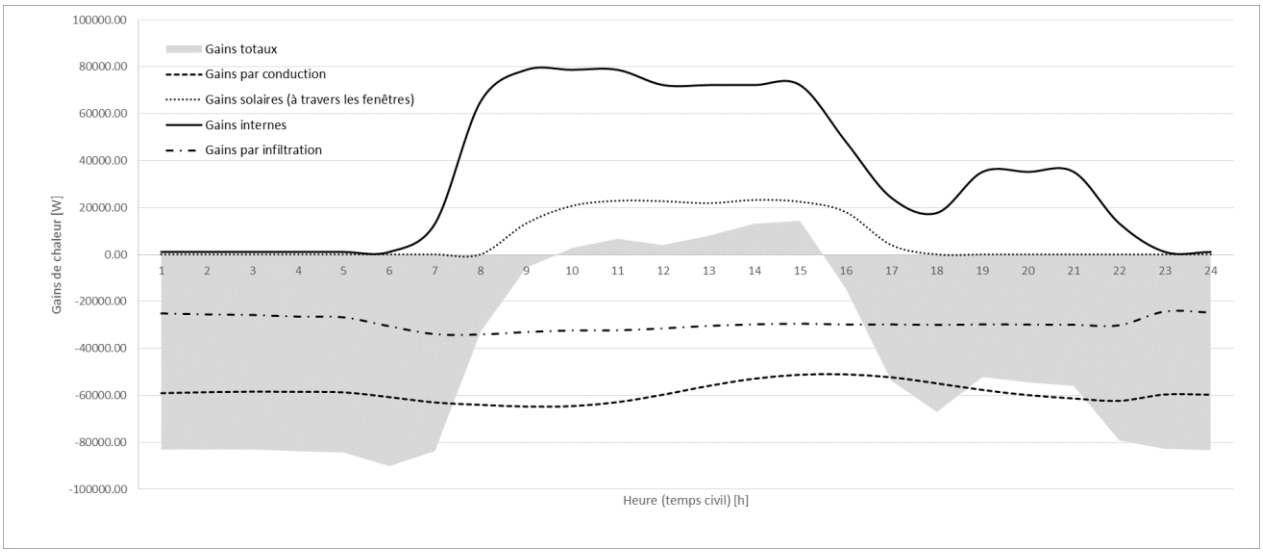


Figure 5.5. Flux thermiques par heure calculés par l'outil CEEB pour le Cas B1 pour une journée typique du mois de janvier.

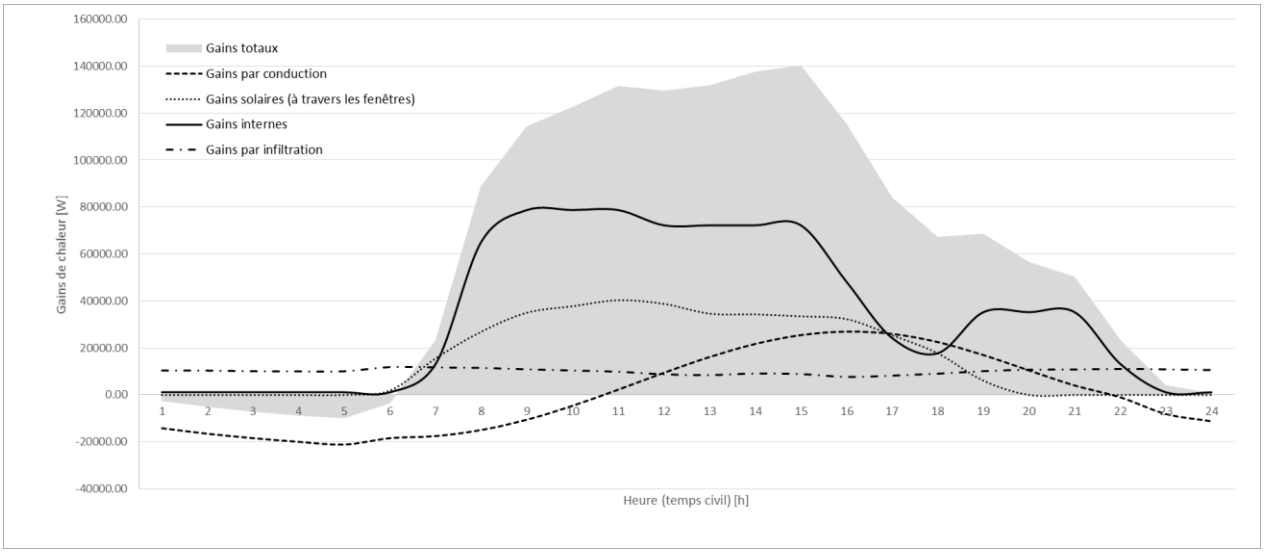


Figure 5.6. Flux thermiques par heure calculés par l'outil CEEB pour le Cas B1 pour une journée typique du mois d'août.

La Figure 5.7 illustre l'évolution du flux de chaleur total échangé au travers de l'enveloppe du bâtiment non réhabilité, pour le cas B1, pour chaque heure de chaque journée typique des douze mois de l'année. Le maximum se produit toujours à 15 heures. Les valeurs extrêmales s'échelonnent de -85400W (janvier, 7h) à 126668 W (juin, 15h). Ceci illustre bien l'importance de prendre adéquatement en compte les variations saisonnières ainsi que de l'inertie thermique du bâtiment. En outre, cela illustre qu'une analyse thermique d'un bâtiment seulement dans des conditions extrêmes hivernales ou estivales n'est pas suffisante : il importe de l'analyser tout au long de l'année pour avoir une idée précise de son efficacité énergétique.

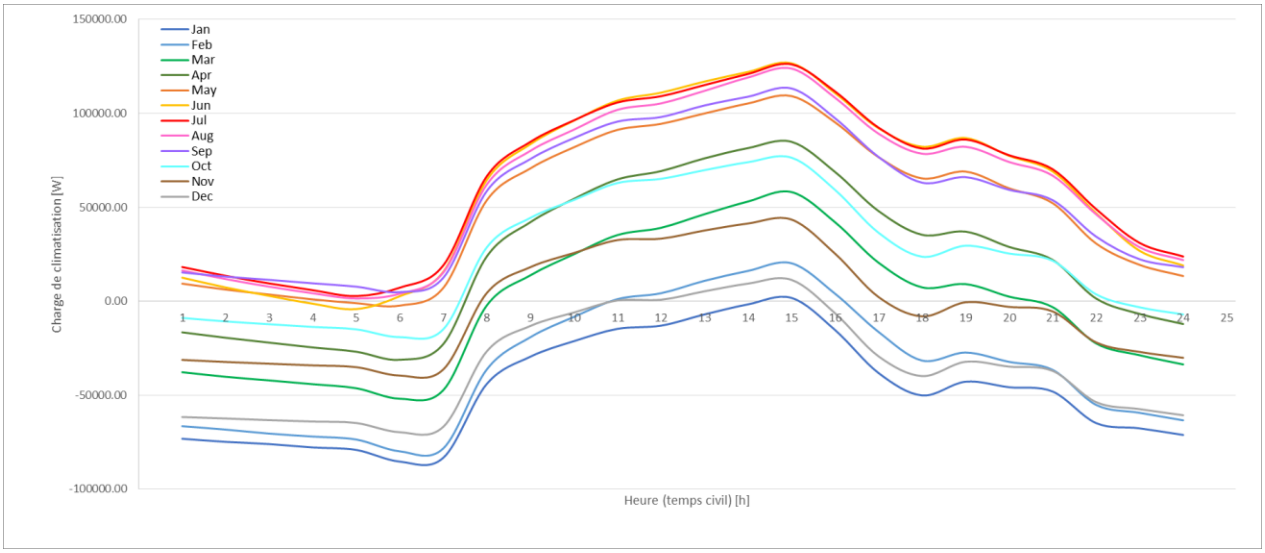


Figure 5.7. Évolution du flux de chaleur total échangé au travers de l'enveloppe du bâtiment pour chaque heure d'une journée typique de chaque mois de l'année pour le Cas B1.

CHAPITRE 6 CONCLUSION, CONTRIBUTIONS ET TRAVAUX FUTURS

6.1 Synthèse du travail effectué

Ce projet de maîtrise a visé à aider à mieux évaluer de manière pratique modulable et vérifiable, la charge thermique d'un bâtiment au Québec en début de phase de conception du projet grâce au développement d'un outil de calcul dédié. Dans cette optique, cet outil se veut accessible, avant tout, pour les ingénieurs praticiens du génie civil. Ceci a mené au développement de l'outil CEEB dont la formulation mathématique a été présentée en détail.

Une revue de littérature a permis de définir le contexte des changements climatiques et la nécessité d'actions dans le secteur de l'énergie et des bâtiments institutionnels québécois. Les défis et les limites des outils d'analyse énergétique existants ont été soulevés permettant de poser les critères de développement de l'outil de calcul créé. En outre, la revue de littérature a permis d'illustrer des pistes de solutions écoénergétiques, notamment l'ajout d'une serre sur le toit d'un bâtiment existant.

L'outil CEEB est basé sur les méthodes existantes de calcul de charge thermique horaire dans les bâtiments, soit la Méthode des séries temporelles radiantes RTSM et la Méthode du bilan d'énergie HBM. En s'appuyant sur les travaux accomplis face au développement d'outils d'aide à la conception simplifiés, l'outil de calcul développé permet d'intégrer facilement, pour un bâtiment donné : des caractéristiques géométriques (orientation, dimensions); des données météorologiques (température, vent, rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi); des caractéristiques thermiques liées à l'enveloppe (constituants, épaisseurs) et à l'occupation (température de consigne, horaire, gains internes). Il modélise la charge thermique par un modèle physique simplifié évaluant séparément les contributions des différents composants ensuite additionnés. L'utilisation d'un chiffrier Excel est choisie pour sa versatilité, son accessibilité et sa compatibilité possible avec plusieurs autres programmes ainsi que sa facilité pour l'utilisateur concepteur de vérifier et, au besoin, de modifier le code et son interface. Les limitations identifiées aux outils existants de vérification de la consommation énergétique font partie des fonctionnalités retenues pour l'outil de calcul développé. Ainsi, l'outil CEEB est unique et original par sa constitution : pratique avec un chiffrier Excel, simplifiée avec ses méthodes de calcul éprouvées, précise avec ses données

météorologiques et les caractéristiques du bâtiment, adaptée avec ses paramètres pertinents (ponts thermiques des parois opaques, infiltration d'air non contrôlée du bâtiment, écrans thermiques sur les parois transparentes) pour le contexte québécois et l'évaluation d'un bâtiment institutionnel avec solutions novatrices.

Par la suite, une comparaison est effectuée entre la méthode des éléments finis et l'outil de calcul énergétique développé, puis avec le logiciel SIMEB. Pour se faire, des modèles d'éléments finis thermiques ont été construits : une section de mur de briques détaillée pour analyser le transfert de chaleur à travers des ponts thermiques et un bâtiment scolaire considéré dans son ensemble pour étudier le transfert de chaleur à travers différentes zones thermiques constituant l'enveloppe du bâtiment.

Enfin, un exemple d'application de l'outil de calcul énergétique développé a été présenté. Différentes solutions de réhabilitation ont été analysées afin d'améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment éducatif grâce à une conception durable et viable. L'étude s'est concentrée notamment sur la toiture qui constitue un élément clé avec un fort potentiel pour l'intégration et la proposition de stratégies énergétiques. L'ajout d'une serre est notamment évoqué, bien que cette solution requière de futures études pour analyser les contraintes structurales, économiques et réglementaires qu'elle implique.

6.2 Contributions au domaine scientifique

L'outil CEEB a été développé de sorte que sa formulation mathématique soit accessible et adaptable par les ingénieurs praticiens souhaitant concevoir des bâtiments plus écologiques. Il peut ainsi servir de guide dans leurs décisions multidisciplinaires. En effet, nombre de projets de modeste envergure sont conçus, au moins en phase préliminaire, par des ingénieurs en génie civil n'ayant pas nécessairement une grande connaissance des logiciels existants en thermique du bâtiment. L'outil développé se veut aussi une aide à la conception en phase préliminaire. L'utilisation du programme permet aux utilisateurs : (i) d'une part, de mieux anticiper les performances énergétiques du bâtiment sans nécessiter une conception détaillée des systèmes thermiques; et (ii) d'autre part, grâce à son adaptabilité, d'envisager des stratégies structurales ou architecturales créatives sur mesure, allant au-delà des conceptions traditionnelles. Cet outil s'intéresse aux phénomènes physiques passifs d'échanges thermiques (enveloppe, fenestration,

pont thermique, stratégies, etc.), et non au dimensionnement des systèmes mécaniques actifs de CVCA.

L'outil de calcul d'optimisation de la conception thermique des bâtiments, CEEB, tente de trouver le point d'équilibre entre : (i) détailler des valeurs d'entrée du bâtiment et du lieu, la prise en compte de paramètres précis, complexes et non négligeables selon les informations disponibles en début de conception; et (ii) offrir une formulation mathématique facile et accessible afin d'être maîtrisé par les concepteurs et de leur permettre d'intégrer et de modifier diverses stratégies créatives sur mesure. En effet, l'outil analyse la charge thermique de bâtiments existants ou en cours de conception, en tenant compte de nombreux paramètres d'entrée (la structure, l'enveloppe et l'épaisseur des divers constituants, l'orientation géographique de ces constituants, les horaires d'occupation et gains thermiques associés, l'infiltration du lieu et du bâti, la présence ou non d'écrans thermiques, horaire d'utilisation des rideaux thermiques mobiles, vitrage teinté, ponts thermiques, etc.). L'utilisation d'un chiffrier Excel permet alors de rendre facilement accessible la formulation mathématique de l'outil CEEB, qui peut être modifiée au besoin par l'ingénieur praticien pour pouvoir intégrer et modifier diverses solutions permettant de diminuer les charges thermiques.

6.3 Principales conclusions

Le travail mené au long de ce mémoire permet de dégager les conclusions suivantes :

- L'outil CEEB permet de facilement appréhender la physique globale du bâtiment, et de comparer différentes configurations de bâtiments. Il prend en compte le déphasage thermique lié à l'inertie thermique des parois opaques et d'une zone thermique en interaction avec son environnement.
- Les modèles d'éléments finis permettent une analyse des phénomènes thermiques survenant au sein de la structure ou d'un de ses éléments. Ainsi, ils peuvent être exploités pour calculer le transfert de chaleur à travers des ponts thermiques non homogènes ou, à plus grande échelle, à travers différentes zones thermiques constituant l'enveloppe du bâtiment. Il est important de noter qu'au long de ce mémoire, les analyses d'éléments finis considèrent les transferts thermiques en régime permanent, moins représentatif de la réalité qu'un régime transitoire.

- Les méthodes de calcul des ponts thermiques ont été étudiées et vérifiées. La méthode des surfaces isothermes apparait plus en accord avec les prédictions de la méthode des éléments finis pour le cas de la section de mur étudiée en régime permanent. Cependant, il est important de noter que la méthode non-isotherme permet de traduire un certain déphasage thermique pouvant se produire entre les différents matériaux en régime transitoire. Il est donc possible, pour les cas où d'importants phénomènes transitoires se produisent, que la méthode non-isotherme soit plus représentative de la réalité que la méthode isotherme. Un facteur de sécurité de 1,05 est appliqué à la méthode des surfaces non isothermes lors de l'emploi de l'outil de calcul énergétique CEEB.
- Des paramètres tels que l'infiltration du bâtiment et l'ajout d'écrans thermiques sur les surfaces vitrées peuvent souvent ne pas être modulables et détaillés en termes d'intrants et de formulations énergétiques. Ces paramètres sont complexes à modéliser. Une revue de littérature détaillée a été réalisée afin de les intégrer dans l'outil de calcul CEEB.
- L'exemple d'application de l'outil à un bâtiment scolaire à réhabiliter a montré que l'ajout de surface vitrée au bâtiment ne semble pas pertinent dans le contexte météorologique du Québec. Bien que les gains par rayonnement soient favorisés, ceux-ci ne compensent pas les déperditions par conduction et convection. Il faudrait donc coupler l'ajout de surface vitrée avec une meilleure isolation des fenêtres (triple vitrage sans ponts thermiques).
- L'ajout d'une serre chauffée sur le toit d'un bâtiment semble être une stratégie intéressante pour réduire sa consommation énergétique et l'empreinte écologique. Cependant, la conception et la construction d'une serre sur un toit en milieu urbain font face à plusieurs contraintes et limitations. Des études ultérieures doivent encore être menées pour analyser les impacts de celles-ci.

6.4 Limitations actuelles et travaux futurs

Ce mémoire a abouti au développement de l'outil de calcul CEEB à destination des ingénieurs praticiens souhaitant incorporer une portée écoénergétique dans les phases préliminaires de conception de projets de bâtiments au Québec. Cependant, certaines limitations doivent être relevées, celles-ci débouchant sur des pistes de travaux futurs :

- L'outil CEEB s'est concentré sur l'effet de l'enveloppe du bâtiment sur les transferts thermiques s'effectuant selon les heures et les jours de l'année. Or, toute intervention sur l'enveloppe du bâtiment modifie non seulement sa charge thermique mais aussi son régime hygrique. Certaines modifications de l'isolation thermique pourraient donc s'avérer inadéquates en termes de confort hygrothermique. L'inclusion d'un couplage entre charge thermique et régime hygrique pourrait alors constituer une phase future du développement de l'outil CEEB.
- L'outil CEEB n'intègre pas, pour le moment, de systèmes mécaniques CVCA (équipements mécaniques de chauffage, ventilation et climatisation). Cette simplification a été opérée dans l'optique de proposer un outil employable en phase préliminaire de conception où le détail et l'expertise en mécanique du bâtiment peut ne pas être disponible. Cependant, il serait très intéressant d'intégrer au logiciel CEEB, dans une seconde phase de développement, l'effet des systèmes CVCA sur la charge thermique des bâtiments.
- Des limitations ont été soulevées lors de la construction de modèles d'éléments finis pour vérifier l'outil CEEB (utilisation d'un régime permanent et non transitoire, modélisation d'un assemblage limité en dimensions ou d'un bâtiment simplifié). D'autres modèles d'éléments finis plus performants pourraient être analysés. Ils pourraient aussi inclure d'autres types de bâtiments. D'autres méthodes thermiques numériques existantes pourraient aussi être utilisées pour vérifier certaines formulations de l'outil.
- D'autres exemples d'application de l'outil pourraient être proposés, en étant plus pratiques ou en intégrant des stratégies et des solutions de réhabilitation supplémentaires.
- Certaines améliorations pratiques pourraient aussi être apportées à l'outil CEEB, comme une automatisation des données météorologiques ou une conversion en application de l'outil pour une version plus compacte.
- Les charges climatiques (notamment l'augmentation de la charge de neige sur le toit avec les changements climatiques) pourraient être facilement intégrées à l'outil afin de peaufiner l'aspect génie civil de l'interaction du bâtiment avec son environnement.
- L'addition d'une serre sur le toit implique également des contraintes structurales, économiques, réglementaires, et de fonctionnalité (déplacement des équipements de

CVCA, de nettoyage des façades, etc.). De futures études seraient requises pour étudier plus en détail la gestion de ces contraintes, et valider l'efficacité énergétique de cette stratégie complexe. Une comparaison avec des données expérimentale, si possible, pourrait s'avérer pertinente.

RÉFÉRENCES

Loi sur le développement durable, RLRQ c D-8.1.1.

Loi sur l'économie de l'énergie dans le bâtiment, RLRQ c E-1.1

ADINA. (2020). ADINA Thermal (Version 9.4.4) [Logiciel]. Tiré de http://www.adina.com/adina-thermal.shtml

Agri-Réseau. (2008). *L'efficacité énergétique dans le secteur agricole* (Rapport nº Mars 2008). Tiré de https://www.agrireseau.net/horticulture-serre/documents/L%27efficacit%C3%A9%20%C3%A9nerg%C3%A9tique%20dans%20le%20secteur%20serricole.pdf

Aksoy, U. T., & Inalli, M. (2006). Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region. *Building and Environment, 41*, 42-54.

Al-Arja, O. A., & Awadallah, T. S. (2016). Energy consumption optimization in schools sector in Jordan. *Architectural Science Review, 59*(5), 400-412. doi:10.1080/00038628.2015.1012637

Al-Homoud, M. S. (2005). Systematic Approach for the Thermal Design Optimization of Building Envelopes. *Journal of Building Physics, 29*, 95-119. doi:10.1177/1744259105056267

Al-Kodmany, K. (2018). The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings, 8*(24). doi:doi:10.3390/buildings8020024

American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). (2003). *Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses*. Norme ASABE EP406.4 JAN2003 (R2008).

Anquez, P., & Herlem, A. (2011). *Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions*. Chaire de responsabilité sociale et de développement durable ESG UQÀM.

Architects, K. C. (2010). Manhattan School for Children. Tiré de http://www.kisscathcart.com/pdf/ManhattanSchoolforChildren.pdf

Armstrong, M. (2 Septembre 2018 2018). *Foreword. In Durability and Climate Change — Changing Climatic loads as may affect the Durability of Building Materials, Components and Assemblies.* Communication présentée à CIB/NRC Symposium, Ottawa, ON.

ASHRAE. (2017). *Handbook – Fundamentals (SI)*. Norme ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Athienitis, A. K., Candanedo, J. A., & O'Neill, B. (2009). *Solar Buildings Research Network Demonstration Projects: Towards net zero energy consumption.* Communication présentée à 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Québec, QC.

Atlas climatique du Canada. (2019). Montréal, Québec. *Prairie Climate Centre - From Risk to Resilience*. Tiré de https://atlasclimatique.ca/sites/default/files/cityreports/Montreal-FR.pdf

Autodesk. (2020). Revit (Version 2021) [Logiciel]. Tiré de https://www.autodesk.ca/fr

Baggio, M., Tinterri, C., Dalla Mora, T., Righi, A., Peron, F., & Romagnoni, P. (2017). Sustainability of a historical building renovation design through the application of LEED rating system. *Elsevier, 113*, 382-389. doi:10.1016/j.egypro.2017.04.017

Boros, I., & al., e. (2015). Thermal Studies of Specific Envelope Solutions for an Energy Efficient Building. *Key Engineering Materials, 660*, 192-197. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.660.192

Brundrett, E., Jewett, T. J., & Quist, R. (1984). Evaluation of polytube heat exchangers for greenhouse ventilation. *Acta-horticultarae, 148*, 49-55.

Bureau du vérificateur général du Canada. (2017). *Progrès vers la réduction des gaz à effet de serre — Environnement et Changement climatique Canada* (Rapport nº Rapport 1). Rapports de la commissaire à l'environnement et au développement durable au Parlement du Canada. Tiré de http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/parl_cesd_201710_01_f_42489.html#

Busse, M., Freisinger, U. B., Sawicka, M., & Specht, K. (2015). There's something growing on the roof. Rooftop greenhouses. Idea, Planning, Implementation. *ResearchGate*. doi:10.13140/2.1.2480.7204

Carrot City Designing for Urban Agriculture. (2014). Fermes Lufa. Tiré de https://www.ryerson.ca/carrotcity/board_pages/rooftops/lufa_farms.html

Centre d'information et de développement expérimental en serriculture (CIDES). (2010). *Démonstration des économies d'énergie liées à l'installation d'écrans thermiques* [Présentation PowerPoint]. Tiré de https://www.agrireseau.net/horticulture-serre/documents/Pr%C3%A9sentation%20%C3%A9crans%20thermiques_Version%20forum.pdf

Cerezo, C., Sokol, J., Reinhart, C., & Al-mumin, A. (2015). *Three Methods for Characterizing Building Archetypes in Urban Energy Simulation. A Case Study in Kuwait City.* Communication présentée à 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India (p. 2873-2880).

Chaire d'études sur les écosytèmes urbains UQAM. (2014). *Étude de l'adaptation aux changements climatiques en lien avec les politiques municipales et les réalités du territoire urbain à l'échelle du quartier : exemple de Montréal* (Rapport nº Rapport final). Tiré de https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportLepage2014_FR.pdf

Classification de Köppen-Geiger. (2018). *Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution*. doi:10.1038/sdata.2018.214

Comité européen de normalisation (CEN). (2017). *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods*. Norme européenne EN ISO 6946:2017. Dublin, Irlande: National Standards Authority of Ireland (NSAI).

Cotter, D. J., & Seay, R. T. (1961). The effect of circulating air on the environment and tomato growth response in a plastic greehouse. *Roc. ASHS 77*, 342-345.

Defeijt, V. (2008). Inventaire corporatif des émissions de gaz à effet de serre 2005 - Synthèse. *Ville de Montréal, Service des infrastructures, transport et environnement, Direction de l'environnement et du développement durable, Planification et suivi environnemental*, 4 p.

Dion, C., & Laurent, M. (réalisateurs). (2015). *Demain* [DVD]. France: Move Movie, France 2 cinéma, Mars films, Mely Production.

Écohabitation. (2011). Construction du mur écologique à double ossature. *La Ruche Cahier de Projet, 3*.

Emmerich, S. J., & Persily, A. K. (2005). Airtightness of Commercial Buildings in the U.S. *International Journal of Ventilation*.

Emmerich, S. J., & Persily, A. K. (2014). Analysis of U.S. Commercial Building Envelope Air Leakage Database to Support Sustainable Building Design. *International Journal of Ventilation, 12*(4), 331-344.

Énergie et ressources naturelles Québec. (2016). Production d'électricité. Tiré de https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/production-electricite/

Enviromontreal. (2011). Concordia greenhouse project. Tiré de https://enviromontreal.com/tag/concordia-greenhouse-project/

Environnement et changement climatique Canada. (2016). *Stratégie canadienne de développement à faible émission de gaz à effet de serre à long terme pour le milieu du siècle*. Gatineau, QC: Gouvernement du Canada. Tiré de https://unfccc.int/files/focus/long-term_strategies/application/pdf/can_strategie_red.pdf

Environnement et changement climatique Canada. (2019a). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement - Émissions de gaz à effet de serre*. Tiré de https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/ghg-emissions/2019/national-GHG-emissions-fr.pdf

Environnement et Changement climatique Canada. (2019b). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre*. Tiré de https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/ghg-emissions/2019/national-GHG-emissions-fr.pdf

Environnement et changement climatique Canada. (2019c). *Rapport d'inventaire national 1990-2017 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada* (Rapport nº Partie 1). La déclaration du Canada à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Tiré de http://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/En81-4-2017-1-fra.pdf

Environnement et changement climatique Canada. (2019d). *Rapport sur le climat changeant au Canada*. Tiré de https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_FULLREPORT-FR-FINAL.pdf

Environnement et lutte contre les changements climatiques Québec. (2020). Engagements du Québec : Nos cibles de réduction d'émissions de GES. Tiré de http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/engagement-quebec.asp

Équiterre. (2018). *Analyse de la performance énergétique de la Maison du développement durable*. Tiré de https://equiterre.org/sites/fichiers/rapport_efficacite_energetique_mdd.pdf

Fermes Lufa. (2020). Nos fermes. Tiré de https://montreal.lufa.com/fr/fermes

Filogamo, L., Peri, G., Rizzo, G., & Giaccone, A. (2014). On the classification of large residential buildings stocks by sample typologies for energy planning purposes. *Elsevier Applied Energy, 135*, 825–835. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.002

Florides, G. A., & al., e. (2002). Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. *Applied Energy, 73*, 299-328.

Fondation David Suzuki. (2013). *Commission sur les enjeux énergétiques du Québec : Mémoire présenté par la Fondation David Suzuki*. Tiré de https://fr.davidsuzuki.org/wp-content/uploads/sites/3/2017/09/Memoire-strate%CC%81gie-enjeux-e%CC%81nerge%CC%81tique-que%CC%81bec-2013.pdf

Freeman, S., L. Eddy, S., McDonough, M., K. Smith, M., Okoroafor, N., Jordt, H., & Pat Wenderoth, M. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *PNAS, 111*(23), 8410–8415. doi:https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111

Freisinger, U. B. S., K.; Sawicka, M.; Busse, M.; Siebert, R.; Werner, A.; Thomaier, S.; Henckel, D.; Galda, A.; Dierich, A.; Wurbs, S.; Grosse-Heitmeyer, J.; Schön, S.; Walk, H. (2015). There‘s something growing on the roof. Rooftop greenhouses. Idea, Planning, Implementation. *Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Muencheberg*. doi:10.13140/2.1.2480.7204

Futura Planète. (2020). Comment fonctionne la culture hydroponique ? Tiré de https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/eau-fonctionne-culture-hydroponique-4828/

GIEC. (2017). Le GIEC et le sixième cycle d'évaluation. Tiré de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/09/AC6_brochure_fr.pdf

Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Québec, QC: Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé publique du Québec.

Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Institut National de Santé publique du Québec. Tiré de http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/988_MesuresIlotsChaleur.pdf

Gouvernement du Canada. (2016a). *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques*. Tiré de http://publications.gc.ca/collections/collection_2017/eccc/En4-294-2016-fra.pdf

Gouvernement du Canada. (2016b). Le Canada présente sa stratégie visant l'horizon du milieu du siècle en vue d'effectuer une transition vers une économie à faibles émissions - Communiqué de presse. Tiré de https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2016/11/canada-presente-strategie-visant-horizon-milieu-siecle-vue-effectuer-transition-vers-economie-faibles-emissions.html

Gouvernement du Canada. (2019). Ensembles de données climatiques en génie. Tiré de https://climat.meteo.gc.ca/prods_servs/engineering_f.html

Gouvernement du Québec. (2016). Politique énergétique 2030. Tiré de https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2016/04/Politique-energetique-2030.pdf

Gouvernement du Québec. (2018a). *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques du Québec 2018 - 2023*. Tiré de https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/plan-directeur/TEQ_PlanDirecteur_web.pdf#page=98

Gouvernement du Québec. (2018b). Plan québécois des infrastructures 2018-2028 - Près de 2,3 milliards de dollars sont ajoutés dans les écoles du Québec : Les investissements sans précédent se poursuivent. Tiré de http://www.fil-information.gouv.qc.ca/Pages/Article.aspx?aiguillage=ajd&type=1&idArticle=2605312911

Gouvernement du Québec. (2019a). Les infrastructures publiques publiques du Québec *Budget des dépenses 2019-2020, 8*.

Gouvernement du Québec. (2019b). Plan québécois des infrastructures - Liste de projets. Tiré de http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/ministere/tableau-PQI.PDF

Green Home NYC. (2019). The Sun Works Center at Manhattan School for Children Tiré de https://greenhomenyc.org/building/the-sun-works-center-at-manhattan-school-for-children/

Greenhouse, T. C. (2019). History of the Greenhouse. Tiré de https://concordiagreenhouse.com/about/history-of-the-greenhouse/

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2019). Réchauffement planétaire de 1,5 °C - Résumé à l'intention des décideurs. Tiré de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf

Guilbault, J.-P. (2019, 30 septembre 2019). Éducation : le système du Québec, « un boulet » pour le Canada. *Radio-Canada*. Tiré de https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1323620/education-rapport-quebec-ocde-pisa-canada-ecoles-publiques?fbclid=IwAR2gLXziwlfMY0hueg-Odr1zz6_b0mcefkzqILnPUhuEfs_OQGK949H94Mo

Gusta, S., Strausa, S., & Gross, U. (2017). Influence of thermal properties of architectural glass on energy efficiency of sustainable buildings. *Engineering for rural development, 24*, 659-666. doi:10.22616/ERDev2017.16.N132

Hellen, T. (2002). How to Use Elements Effectively. *NAFEMS Ltd – The International Association for Engineering Analysis Community*.

HesarakiI, B., & al., e. (2018). Energy Code Compliant 1 House Design for Lowest Lifecycle Cost Based on Market-available Technologies. *Canadian Journal of Civil Engineering, 46*. doi:10.1139/cjce-2018-0237

Hughes, D. W., Yallop, B. D., & Hohenkerk, C. Y. (1989). The equation of time. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 238*, 1529-1535.

Hydro-Québec. (2018). SIMEB (Version 2018) [Logiciel]. Tiré de https://www.simeb.ca/

Institut de l'Énergie Trottier. (2015). Conception des systèmes géothermiques à puits à colonne permanente. Tiré de http://iet.polymtl.ca/projets-finances/conception-des-systemes-geothermiques-a-puits-a-colonne-permanente/

Institut de la statistique du Québec. (2020). *Les portraits*. Tiré de http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/economie/comparaisons-economiques/interprovinciales/portraits.pdf

Integrated Environmental Solutions. (2011). Virtual Environment Energy Simulation [Logiciel]. Glasgow. Tiré de http://www.iesve.com

ISO. (2007). *Ponts thermiques dans les bâtiments — Coefficient linéique de transmission thermique — Méthodes simplifiées et valeurs par défaut*. Norme ISO 14683-20037. Genève, Suisse.

Kummert, M. (communication personnelle, 2017). [MEC8254 : Éléments de mécanique du bâtiment].

Kummert, M. (communication personnelle, 2019). [ENE6510 : Modélisation énergétique des bâtiments].

Kuroyanagi, T. (2017). Investigating air leakage and wind pressure coefficients of single-span plastic greenhouses using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering, 163*, 15-27. doi:10.1016/j.biosystemseng.2017.08.004

Lab-École. (2019). Penser l'école de demain. Tiré de https://www.lab-ecole.com/wp-content/uploads/2019/04/Penser-ecole-demain-Lab-Ecole-2019-BR-2019.pdf

Lacasse, M. A. (2019). An overview of durability and climate change of building components. *Canadian Journal of Civil Engineering, 46*(11), v-viii. doi:10.1139/cjce-2019-0622

Lafrance, G., & al., e. (2016). Impact des changements climatiques sur la demande en énergie. *Rapport final pour Ouranos*.

Lawrence Berkeley National Laboratory. (2019). WINDOW & THERM (Version 7.7.10) [Logiciel]. Tiré de https://windows.lbl.gov/software/

Les Industries Harnois Inc. (2019). Serres jumelées. Tiré de https://harnois.com/wp-content/uploads/2018/03/HARNOIS-LUMINOSA-FR-2017-R%C3%89DUIT.pdf

MattaraChalill, S., Nandakumar, P., Periasamy, C., & Karthikeyan, R. (2017). *Interpretation and analysis about energy savings in commercial green houses using custom - made shadenets as well as thermal reflective screens.* Communication présentée à International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Tampa, FL (p. 1-7).

Mijuca, D., Gajić, D., & Vukobrat, M. (2003). On the three dimensional finite element method in the energy efficiency of building's envelope. *Termotehnika, 29*, 119-134.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission. (2018). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990. Tiré de http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2016/inventaire1990-2016.pdf

Montenegro, E., & al., e. (2012). *Impact of School Building Typologies on Visual, Thermal and Energy Performances.* Communication présentée à PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, Lima, Peru. doi:10.13140/2.1.3557.5363

National Renewable Energy Laboratory. (2020). System Advisor Model (SAM) (Version 2020.2.29) [Logiciel]. Tiré de https://sam.nrel.gov/

Nexus Greenhouse Systems. (2019). Atrium & Dual Atrium. Tiré de http://www.nexuscorp.com/Structures/AtriumDual_Revised.pdf

Noël, L. M. (2010). Des fruits et légumes qui poussent sur les toits Tiré de https://www.protegez-vous.ca/nouvelles/maison-et-environnement/une-serre-a-la-ville-sur-le-toit

Oh, S. (2013). *Origins of analysis methods in energy simulation programs used for high performance commercial buildings.* (Texas A&M University, Texas, USA).

OpenStudio. (2020). OpenStudio (Version 3.0.0) [plate-forme logicielle]. Tiré de https://www.openstudio.net/

Oufa, M., Issa, M., & Merkel, P. (2016). Analysis of real-time electricity consumption in Canadian school buildings. *Energy and Buildings, 128*, 530–539. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.022

Ouranos. (2019). Les villes et l'adaptation aux changements climatiques. *Avis d'Ouranos sur un sujet ciblé*. Tiré de https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/FicheVille_FR.pdf

Pacheco, R., & al., e. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*, 3559-3573.

Papadopoulos, S., Bonczak, B., & Kontokosta, C. E. (2017). *Spatial and Geographic Patterns of Building Energy Performance: A Cross-City Comparative Analysis of Large-Scale Data.* Communication présentée à International Conference on Sustainable Infrastructure 2017, New York, NY (p. 336-348). doi:10.1061/9780784481219.030

Parbst, K. (Juin 2011). Energy curtains for vegetables. *Greenhouse Canada,* 30-33.

Paris, J., Houle, J. F., Bricault, M., & Jackson, H. A. (1989). Évaluation en vraie grandeur d'ecrans thermiques pour serres. *Canadian Society for Bioengineering, section Publications*.

Pineau, P.-O., Gauthier, P., Whitmore, J., Normandin, D., Beaudoin, L., & Beaulieu, J. (2019). *Portrait et pistes de réduction des émissions industrielles de gaz à effet de serre au Québec : Volet 1 - Projet de recherche sur le potentiel de l'économie circulaire sur la réduction de gaz à effet de serre des émetteurs industriels québécois*. HEC Montréal. Tiré de http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2019/09/GESIndQc2019-Volet1_Web.pdf

Price, P. N., Shehabi, A., Chan, R. W., & Gadgil, A. J. (2006). Indoor-Outdoor Air Leakage of Apartments and Commercial Buildings. *California Energy Commission, PIER*.

Québec, É. e. r. n. (2014). *Exigences techniques Novoclimat volets « Maison » et « Petit bâtiment multilogement »*. Québec: Norme Novoclimat.

Québec, É. e. r. n. (2015). *Exigences techniques Novoclimat volet « Grand bâtiment multilogement »*. Québec: Norme Novoclimat.

RDH Building Engineering Ltd. (2013). *Air Leakage Control in Multi-Unit Residential Buildings - Development of Testing and Measurement Strategies to Quantify Air Leakage in MURBS* (Rapport nº 5314). Vancouver, BC: RDH Building Engineering Ltd. Tiré de https://retrotec.com/pub/media/mageworx/downloads/attachment/file/a/r/article-_air_leakage_control_in_large_res._buildings.pdf

Residential Energy Dynamics. (2016). Air Leakage Metrics [Logiciel]. Tiré de https://www.redcalc.com/air-leakage-metrics/

Ressources naturelles Canada. (2007). Enquête sur la consommation d'énergie du secteur commercial et institutionnel - Rapport sommaire. Tiré de http://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/ecesci06/pdf/ecesci06.pdf

Ressources naturelles Canada. (2010). CAN-QUEST (Version 1.2) [Logiciel]. Tiré de https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energy-efficiency-buildings/energy-management-resources-buil/energy-management-software-new-buildings/22468

Ressources naturelles Canada. (2016a). EE4 (Version 1.7) [Logiciel]. Tiré de https://www.rncan.gc.ca/energie/ee4/7454

Ressources naturelles Canada. (2016b). *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada* (Rapport nº de 1990 à 2013). Tiré de https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/evolution2013.pdf

Ressources naturelles Canada. (2017). HOT2XP (Version 2017) [Logiciel]. Tiré de https://www.rncan.gc.ca/energie/hot2xp/7446

Ressources naturelles Canada. (2019a). *Énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES)*. Tiré de https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/energie-emissions-gaz-effet-serre-ges/20074

Ressources naturelles Canada. (2019b). Faits sur l'électricité. Tiré de https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/faits-lelectricite/20079

Rousse, D. R., Martinb, D. Y., Thériault, R., Léveillée, F., & Boily, R. (1999). Heat recovery in greenhouses: a practical solution. *Applied Thermal Engineering, 20*, 687-706. doi:10.1016/S1359-4311(99)00048-4

Rowan Williams Davies & Irwin Inc. (2016). *Air tightness Energy Modelling for Part 3 Buildings*. Toronto, Ontario: Tiré de https://sbcanada.org/wp-content/uploads/2017/04/Air-tightness-Energy-Modelling-for-Part-3-Buildings.pdf

RRC-SITRG. (2015). *Final Report: An Investigation of Airtightness in Manitoba's Commercial Building Sector*. Manitoba: CRSNG.

Samson, C. (14 novembre 2013). Projet de serre hydroponique sur un toit à Québec. *Le Soleil*. Tiré de https://www.lesoleil.com/affaires/projet-de-serre-hydroponique-sur-un-toit-a-quebec-6d200de26eb71415078630aaf495114f

Samson, C. (2013, 19 novembre 2013). Serres industrielles sur les toits: un grand intérêt malgré une consultation express. *Le Soleil*. Tiré de https://www.lesoleil.com/affaires/serres-industrielles-sur-les-toits-un-grand-interet-malgre-une-consultation-express-597ed86f95e8e54c9f109cbe8cf7fbc0

Seto, K. C., & al., e. (2014). Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning. *In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change,* (Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change).

Shaw, C. Y., & Jones, L. (1979). Air Tightness and Air Infiltration of School Buildings. *National Research Council of Canada. Division of Building Research, 85*, 85-95.

Siemens. (2014). Energy Efficiency Calculation Tool (EEC) [Logiciel]. Tiré de https://new.siemens.com/global/en/products/buildings/energy-sustainability/energy-efficiency.html

Sowell, E. F., & Hittle, D. C. (1995). Evolution of building energy simulation methodology. *ASHRAE Transactions, 101*(1), 850-855.

Syndicat des producteurs en serre du Québec. (2008). *Rapport final du projet-pilote « Augmentation de l'efficacité énergétique dans la production en serre par la réalisation d'audits »*. Producteurs en serre du Québec, section Publications — Énergie. Tiré de https://www.serres.quebec/download/publications/Energie/efficacite_energetique/rapport-efficacite-energetique-par-audits-psq-2008-min.pdf

Syndicat des producteurs en serre du Québec. (2013). Rapport sur la serriculture sur les toits en milieu urbain. Tiré de https://www.serres.quebec/download/publications/Etudes_et_rapports/rapport-serriculture-sur-les-toits-milieu-urbain-psq-2013.pdf

Systèmes Electro-Energétiques. (2011). Rayonnements direct, diffus et réfléchi Tiré de http://energie28.blogspot.com/2016/11/rayonnements-direct-diffus-et-reflechi.html

Tamura, G. T. S., C. Y. (1977). Studies on Exterior Wall Air Tightness and Air Infiltration of Tall Buildings. *National Research Council of Canada. Division of Building Research, 82*, 122-134. doi:https://doi.org/10.4224/40000456

Transient System Simulation Tool. (2019). TRNSYS [Logiciel]. Tiré de http://www.trnsys.com/

Tuominen, P., & al., e. (2014). Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. *Elsevier Building and Environment, 75*(May), 153-160. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.001

Tzempelikos, A., & K., A. A. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy, 81*, 69-82.

U.S. Department of Energy's (DOE), Building Technologies Office (BTO), & National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2019). EnergyPlus (Version 9.2.0) [Logiciel]. Tiré de https://energyplus.net/

Waite, M. B., & O'Brien, S. M. (2010). *Air Leakage: Difficulties in Measurement, Quantification and Energy Simulation.* Communication présentée à 2nd Building Enclosure Science and Technology Conference, Portland, OR, USA.

Walker, J. N., & Cotter, D. J. (1968). Condensation and resultant humidity in greenhouses during cold weather. *Trans. ASEA 11*, 263-266.

Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2016). *Portrait global de l'efficacité énergétique en entreprise au Québec*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Tiré de http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2016/09/PGEEEQ2016.pdf

Yang, Z., & al., e. (2006). Study on solar radiation and energy efficiency of building glass system. *Applied Thermal Engineering, 26*, 56-61.

Zhao, H.-x., & Magoulès, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(6), 3586-3592.

Zhivov, A., Herron, D., Durston, J. L., Heron, M., & Lea, G. (2016). Airtightness in New and Retrofitted U.S. Army Buildings. *International Journal of Ventilation, 12*(4), 317-330. doi:10.1080/14733315.2014.11684026

ANNEXE A REVUE DE LITTÉRATURE COMPLÉMENTAIRE SUR LES ÎLOTS DE CHALEUR EN MILIEU URBAIN

Un îlot de chaleur urbain désigne une zone métropolitaine dont la température est significativement plus élevée que celle des zones rurales environnantes tel qu'illustré à la Figure A.6.1. Selon Environnement Canada, la différence de température peut varier de 5°C à 10°C de plus que la moyenne. La variation de température observée résulte de facteurs naturels et de facteurs anthropiques où prédominent les facteurs spécifiques aux milieux bâtis tels que l'absence d'arbres et de végétation, la présence de larges surfaces non réfléchissantes qui absorbent et stockent l'énergie solaire et l'émission de rejets énergétiques multiples (Anquez & Herlem, 2011).

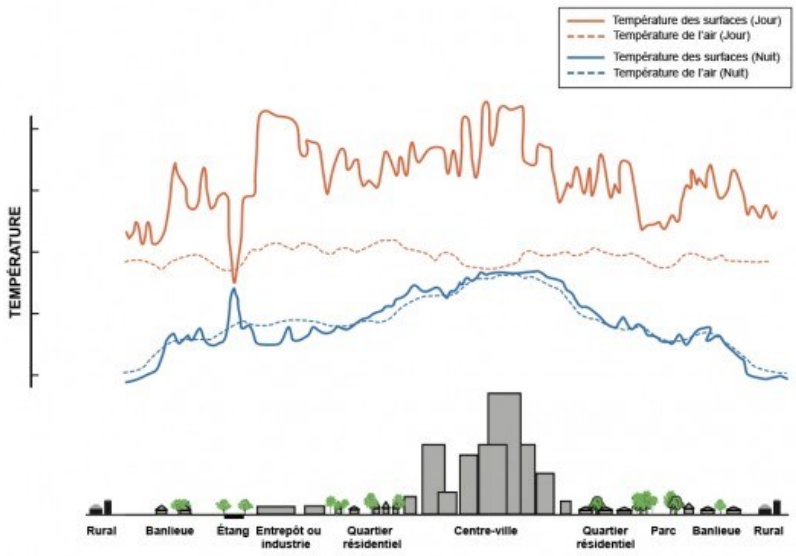


Figure A.6.1 Profil thermique caractéristique d'un îlot de chaleur urbain (Anquez & Herlem, 2011).

Malgré l'impact important de l'emplacement géographique, du climat local et de facteurs météorologiques variables tels que la température, l'humidité et le vent, les sources anthropiques demeurent toutefois les principales causes de l'apparition du phénomène. Les principales causes sont :

1) L'occupation du sol : morphologie, densification et minéralisation.

   Les grands bâtiments et les rues étroites peuvent nuire à la bonne ventilation des centres urbains, car ils créent des canyons où s'accumule et reste captive la chaleur occasionnée par le rayonnement solaire et les activités humaines. En effet, la réduction du facteur de vue du ciel limite les pertes radiatives nettes des bâtiments et des rues. En outre, l'espace urbain se caractérise par une forte densification du cadre bâti qui s'accompagne d'une importante minéralisation. À Montréal, on évalue que près de 80 % de la surface est construite ou asphaltée. Les revêtements imperméables et les matériaux des bâtiments influencent le microclimat et les conditions de confort thermique, car ils absorbent beaucoup de chaleur durant le jour qu'ils rediffusent à l'atmosphère pendant la nuit. Deux propriétés en particulier sont à surveiller : une faible réflexivité (faible albédo) et une forte émissivité. L'albédo est une unité de mesure allant de 0 à 1 qui permet de mesurer le taux de rayons solaires réfléchis par un matériau, tandis que l'émissivité, marquée également sur une échelle de 0 à 1, mesure la chaleur qui est réémise par le matériau après avoir été emmagasinée (Anquez & Herlem, 2011; Giguère, Mélissa, 2009).

2) La perte du couvert naturel et du milieu forestier.

   La diminution de la végétation en zone urbaine a comme résultats de diminuer le nombre de processus naturels rafraîchissants, comme l'évaporation de l'eau contenue dans les sols et l'évapotranspiration de la végétation ou encore l'ombrage au sol, tous des moyens efficaces pour atténuer le réchauffement urbain. De plus, à la différence des couverts végétaux, les zones minéralisées sont souvent recouvertes de matériaux imperméables qui perturbent l'écoulement naturel des eaux de pluie et ne remplissent pas les fonctions de filtration et d'absorption de l'eau tels que les sols naturels (Anquez & Herlem, 2011; Giguère, Mélissa, 2009).

3) Les rejets de chaleur anthropique et gaz à effet de serre.

   Les apports de chaleur anthropique les plus importants sont émis par les véhicules, les climatiseurs et l'activité industrielle. Dans les milieux urbains, les sources d'émission de gaz à effet de serre sont principalement les véhicules, les procédés industriels et le chauffage des immeubles à l'aide de combustibles fossiles. Ces gaz piègent l'énergie solaire

dans l'atmosphère et participent ainsi à son réchauffement (Anquez & Herlem, 2011; Giguère, Mélissa, 2009).

Les conséquences sont :

1) Sur la santé.

   La chaleur accablante engendrée par les îlots de chaleur urbains peut provoquer des inconforts, des faiblesses, des troubles de la conscience, des crampes, des syncopes, des coups de chaleur, voire exacerber les maladies chroniques préexistantes comme le diabète, l'insuffisance respiratoire, les maladies cardiovasculaires, cérébrovasculaires, neurologiques et rénales, au point de causer la mort. Par ailleurs, l'augmentation des températures aggrave la pollution atmosphérique, et accroît les effets néfastes du smog sur la santé respiratoire (Anquez & Herlem, 2011; Giguère, Mélissa, 2009).

2) Sur l'environnement.

   Les îlots de chaleur urbains ont des conséquences immédiates sur la qualité de l'air extérieur, car ils contribuent à la diffusion des polluants et à la formation du smog. Les îlots de chaleur urbains peuvent également affecter les écosystèmes aquatiques environnants en élevant la température des eaux (Anquez & Herlem, 2011).

3) Sur la consommation d'eau et d'énergie.

   Les îlots de chaleur urbains occasionnent aussi une augmentation de la consommation en eau potable par l'augmentation des aires de rafraîchissements telles que les piscines et les jeux d'eaux ou l'arrosage des zones végétalisées. Enfin, les îlots de chaleur urbains contribuent à une augmentation de la consommation d'énergie. En période hivernale, cette conséquence peut être bénéfique, mais en période estivale, il agit sur notre confort et résulte une hausse de la demande énergétique induite par la climatisation (Anquez & Herlem, 2011).

Une étude estime que les surfaces pavées de couleur foncée peuvent représenter jusqu'à 44 % de la superficie d'une ville. Le rayonnement solaire réfléchi par les surfaces varie selon le type de matériau utilisé. Ainsi, chaque matériau a une capacité à absorber la lumière reçue, appelée l'absorptance solaire, et à l'inverse, une capacité réflexive, synonyme de réflectivité, de réflexivité, de réflectance solaire ou encore d'albédo. Les toitures montréalaises sont généralement composées

de bardeaux d'asphalte, de membranes élastomères ou de membranes multicouches d'asphalte et de gravier. Toutefois, tous ces types de revêtement de toiture possèdent une grande absorptance solaire avec leur couleur foncée. Or, dans la lutte aux îlots de chaleur urbains, le choix du type de toiture doit prioriser des matériaux ayant une absorptance solaire faible (près de zéro) et une émissivité élevée permettant une température de surface et ambiante plus fraîche tel que présenté au Tableau A.6.11. L'information sur l'élévation de la température indique l'augmentation de degrés Celsius entre la température de surface du matériau utilisé et la température de l'air ambiant (Anquez & Herlem, 2011; Giguère, Mélissa, 2009).

Selon le Conseil national de recherches Canada et l'Institut de recherche en construction, l'utilisation de toitures réfléchissantes même dans les climats froids tels que le Québec permet de réduire la formation des îlots de chaleur urbains, d'apporter des bénéfices quant à la qualité de l'air et de baisser la consommation énergétique utilisée pour la climatisation de 10 à 30 %.

Les toits verts réduisent la quantité de chaleur transférée du toit vers l'intérieur du bâtiment grâce à l'évapotranspiration et à l'ombrage créé par les plants. En outre, ils permettent de rafraîchir l'air ambiant extérieur tout en contribuant à :

- une augmentation de l'isolation thermique en hiver, mais aussi en été, à l'instar d'autres facteurs qui influencent la fraîcheur de l'air intérieur du bâtiment, comme l'inertie thermique de la couverture végétale et l'eau contenue dans la terre ou le revêtement humidifiant;
- une intégration esthétique des bâtiments au paysage;
- la possibilité de faire de l'agriculture urbaine;
- une amélioration de la qualité de l'air (Anquez & Herlem, 2011; Giguère, Mélissa, 2009).

D'entre tous les types de recouvrement de toits, de classique, à revêtement réfléchissant, à toit végétal, le toit végétal est celui qui présente les conditions de fraîcheur les plus avantageuses. Pendant une journée ensoleillée de 26 °C, un toit foncé peut atteindre jusqu'à 80 °C, un toit blanc, 45 °C et un toit végétal, 29 °C (Giguère, 2009).

Tableau A.6.1. Caractéristiques des matériaux de surface de couverture de toiture les plus communes.

Type de toiture	Description	Durée de vie	Absorptance solaire	Émissivité	Élévation de température
Bardeaux d'asphalte	- Idéal pour toits en pente - Excellente barrière contre l'humidité - Facile et rapide à réparer en cas de bris	20 à 30 ans	Noirs : 0,97 Bruns : 0,91 Gris : 0,82 Blanc : 0,75	0,91	36°C (Blancs) à 46°C (Noirs)
Toit en métal	- Idéal pour toits en pente - Écologique : 100% recyclable peut inclure de 30% à 60% de métal recyclé et ne contient aucun sous-produit pétrolier - Facile d'entretien	100 ans	Acier neuf, nu, galvanisé : 0,39 Aluminium : 0,39	Acier neuf, nu, galvanisé : 0,04 Aluminium : 0,25	27°C (Acier neuf, nu, galvanisé) à 31°C (Aluminium)
Membrane élastomère	- Idéal pour toits plats et à faible pente - Constitué d'une membrane bicouche appliqué à la chaleur et dont les joints sont fixés au chalumeau - Peu ou aucun entretien	20 à 30 ans	Claire : 0,20	0,91	8°C (Claire)
Membrane multicouche d'asphalte et de gravier	- Idéal pour toits plats et à faible pente - Constitué de plusieurs membranes de feutre bitumé superposées et noyées dans de l'asphalte chaud, puis protégée d'une couche de gravier protecteur qui adhère sur la dernière couche d'asphalte - Très abordable	20 à 25 ans	Sombre : 0,88 Clair : 0,66	0,90	32°C (Clair) à 42°C (Sombre)
Membrane thermoplastique polyoléfine (TPO)	- Idéal pour toits plats et à faible pente - Constitué d'une membrane monocouche composée principalement de plastique. - Économique et écologique : 100% recyclable et nécessite moins de colle - Peu de joints, ce qui limite les possibilités d'infiltrations d'humidité et d'eau	40 à 50 ans	Claire : 0,17	0,92	6°C (Claire)

ANNEXE B REVUE DE LITTÉRATURE COMPLÉMENTAIRE SUR LES PRÉCÉDENTS EXEMPLAIRES DE SERRES SUR TOIT

Le choix des dimensions et de l'attachement des serres doit se faire de façon à prioriser les grandes serres plutôt que plusieurs petites serres afin de minimiser les poteaux à attacher aux toits. Contrairement aux serres au sol qui sont normalement installées dans des fondations de type caisson, les serres sur un toit utilisent généralement des plaques particulières installées sur les colonnes pour se fixer au toit, ce qui crée des ponts thermiques (Al-Kodmany, 2018; Busse, Freisinger, Sawicka, & Specht, 2015; Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013).

Fermes Lufa, première serre commerciale sur toit au monde

1) Serre d'Ahuntsic
Location : Montréal, Canada
Designers/Concepteurs : GKC Architectes
Date : 2011
Superficie : 31 000 pieds carrés
Type de serre : 7 serres jumelées
Coût d'investissement : 2 millions de dollars
Énergie : gaz naturel (chauffage) cooling pad et brumisation (climatisation)

Figure B.6.2 Serre d'Ahuntsic. (Fermes Lufa, 2020).

2) Serre de Laval
Location : Montréal, Canada
Designers/Concepteurs : Groupe Montoni de Montréal et compagnie néerlandaise de serre KUBO (conçue et construite en même temps que l'édifice sur lequel est installée)
Date : 2013
Superficie : 43 000 pieds carrés

Figure B.6.3 Serre de Laval. (Fermes Lufa, 2020).

3) Serre d'Anjou
Location : Montréal, Canada
Designers/Concepteurs : compagnie néerlandaise de serre KUBO; équipée par l'entreprise Hortiplan et GE Lighting
Date : 2017
Superficie : 63 000 pieds carrés

Figure B.6.4 Serre d'Anjou. (Fermes Lufa, 2020).

Les fermes Lufa sont les premières serres commerciales du monde aménagées sur un toit en milieu urbain. Des paniers sont distribués chaque semaine dans la grande région de Montréal, mais également jusqu'à Québec et Trois-Rivières maintenant dans plus de 300 points de ramassage. Des fruits et légumes de saison produits par des fermiers de la région complètent les paniers (Carrot City Designing for Urban Agriculture, 2014; Fermes Lufa, 2020).

Culture hydroponique

Les plantes cultivées en serre sont hors-sol et grandissent grâce à la méthode de culture hydroponique. Cette technique ancienne utilise un substrat stérile enrichie de nutriments nécessaires en substitut à la terre. Le rendement de la culture dépend en grande partie d'un apport en eau suffisant (Futura Planète, 2020). La culture hydroponique utilisée permet de cultiver 50

variétés de légumes répartis dans une zone fraîche pour les légumes feuilles, soit les laitues, fines herbes, etc. et dans une zone chaude pour les légumes fruits, soit les tomates, poivrons, etc. (Carrot City Designing for Urban Agriculture, 2014; Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013).

Recirculation de l'eau

Afin d'éviter le gaspillage de l'eau potable et l'ajout d'un volume supplémentaire au traitement des eaux en villes, la récupération de l'eau de pluie et de l'eau de fonte alimente le système d'irrigation hydroponique en circuit fermé. Ainsi, les nutriments sont conservés et 50% de l'eau est économisé comparativement à une ferme n'utilisant pas cette méthode (Fermes Lufa, 2020).

Conversion d'espace

L'agriculture urbaine sur les toits permet à la fois de tirer avantage des espaces inutilisés pour cultiver des fruits et légumes tout en évitant les émissions de GES liés aux milliers de kilomètres de transport du lieu de production des aliments jusqu'aux villes. Ainsi, une alimentation plus fraîche et locale est favorisée (Fermes Lufa, 2020)

Optimisation de la consommation d'énergie

La consommation d'énergie et l'empreinte environnementale sont réduites avec l'implantation de serres sur toits. Il est à l'avantage du propriétaire d'un bâtiment existant d'accueillir une serre sur son toit puisque la couverture végétale réduit la facture énergétique, autant le chauffage en hiver que la climatisation en été (Noël, 2010). Il est estimé que les serres sur toits économisent environ 50 % d'énergie que les serres au sol et que les bâtiments d'accueil consomment environ 25 % moins d'énergie pour le chauffage pour les raisons suivantes :

- Les pertes passives de chaleur des bâtiments d'accueil sous les serres sont récupérées par ces dernières pour se chauffer. Les serres agissent également comme zone tampon contre les variations thermiques extérieures permettant de réduire la consommation énergétique du bâtiment principal. En effet, la serre sur toit augmente l'isolation de l'immeuble et son efficacité énergétique.
- Les températures nocturnes sont considérablement plus élevées en milieu urbain comparativement en milieu rural dû à la densité de la masse thermique et du chauffage des

structures urbaines. Ainsi, les serres sur toits sont uniquement chauffées en hiver avec un système au gaz naturel.

- Par nuits fraîches, des écrans thermiques horizontaux et verticaux (rideaux isolants) sont automatiquement déployés pour contribuer à l'isolation de la serre et minimiser les pertes de chaleur.
- En été, un système de climatisation passif appelé « cooling pad » et de la brumisation sont utilisés en serre.
- En été, la transpiration végétale des plantes contribuent à la réduction des îlots de chaleur.
- La quantité d'énergie généralement requise pour livrer, réfrigérer et entreposer les aliments du lieu de production jusqu'aux marchés urbains est économisée (Fermes Lufa, 2020; Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013).

Visite des serres Lufa

La visite a été effectuée le 21 juillet 2018 à la Serre d'Ahuntsic située au 201-1400 Rue Antonio Barbeau, à Montréal. Cette serre présentée à la Figure B.6.5 est la première serre commerciale au monde, inaugurée en 2011 et d'une superficie de 31 000 pieds carrés.

Figure B.6.5 La première serre commerciale sur toit au monde : serre sur bâtiment industriel du quartier d'Ahuntsic-Cartierville.

Le bâtiment d'accueil est un immeuble industriel de 2 étages conçu initialement pour supporter le poids de l'ajout d'un troisième étage, donc qui pouvait supporter le poids supplémentaire de la serre. Un bail de location à long terme a été signé avec le propriétaire de l'édifice. Ce dernier a procédé à quelques transformations telles que l'accès au toit par un escalier et par un monte-charge, le renforcement de la structure ainsi que l'ajout d'un réservoir d'eau de 140 000 litres pour subvenir aux besoins de la permaculture. La firme d'architecture GKC a mis la majorité de ses efforts en phase d'élaboration de projet comme il s'agit d'un projet précurseur. Étant donné que l'économie d'énergie est un aspect central du projet, plusieurs spécificités techniques ont été étudiées, puis mises en place. D'abord, le vitrage de la serre est ouvrable en été tandis qu'un écran thermique mobile déployé pendant les nuits d'hiver empêche la perte de chaleur. Ensuite, l'intégration d'un réservoir d'eau de pluie et d'un système de filtration permet de réutiliser l'eau de la serre. De plus, un système de chauffage relié à différents circuits au moyen de commandes distinctes permet de créer des microclimats adaptés à chaque type de plantes (Carrot City Designing for Urban Agriculture, 2014). Les Figure B.6.6 suivantes présentent les cultures hydroponiques pour plusieurs variétés de concombres et poivrons avec réseau racinaire dans un substrat de fibre de noix de coco.

(a)

(b)

(c)

Figure B.6.6 Système de culture hydroponique verticale dans la zone chaude pour les légumes fruits : (a) Vue 1; (b) Vue 2; (c) Vue 3.

La Figure B.6.7 suivante montre le système de culture hydroponique horizontal dans la zone froide pour les légumes feuilles, soit pour plusieurs variétés de fines herbes et micro-pousses avec réseau racinaire dans un substrat de fibre de noix de coco. Au toit, des rideaux isolants sont automatiquement déployés par nuit fraîche pour contribuer à l'isolation de la serre et minimiser les pertes de chaleur et par journées très ensoleillées pour diminuer les gains solaires.

Figure B.6.7 Système de culture hydroponique horizontal dans la zone froide pour les légumes feuilles.

La Figure B.6.8 suivante illustre le système de refroidissement par évaporation appelé *cooling pad* (climatisation passive avec carton ondulé humidifié). Suivant les lois de thermodynamique, le système fonctionne par l'évaporation de l'eau qui puisse une grande quantité de chaleur latente pour changer de phase et la retire de l'environnement extérieur. Le système nécessite un réservoir d'eau, une pompe et un carton avec des espaces ondulés pour que l'eau puisse circuler. L'eau s'égoutte lorsque la pompe est branchée sur le réservoir, ainsi le carton est humidifié. Les ventilateurs suspendus au toit de la serre poussent l'air chaud vers le système de refroidissement par évaporation. Donc, il y a évaporation forcée pour refroidir l'air (forcer l'eau à refroidir l'air).

Figure B.6.8 Système de refroidissement par évaporation appelé *cooling pad.*

Canopée, projet de serre hydroponique sur un toit

Le règlement d'urbanisme de la ville de Québec interdit la construction de serres sur les toits du calibre prévu par le projet Canopée. Toutefois, une consultation publique a été tenu en vue de modifier ledit règlement. La modification vise à permettre l'installation, sur une toiture, de serres industrielles pour produire des produits maraîchers tout en respectant le nombre d'étages prévus au zonage et en permettant aux arrondissements de les autoriser ou non. Ce projet a un objectif semblable aux fermes Lufa : alimenter plusieurs centaines de familles chaque semaine en produits frais avec des paniers en mettant les agriculteurs de la région à contribution. Il ne s'agit pas d'une simple entreprise commerciale, mais plutôt de la concrétisation du concept d'urbanisme responsable grâce à un système de chauffage innovant, à la récupération de l'eau de pluie, à la réduction des émissions de GES et du fait qu'elle se trouvera en plein coeur de la ville, à proximité des futurs consommateurs (Samson). Malheureusement, ce projet n'a pas vu le jour. Le développement d'une vision d'ensemble pour l'agriculture urbaine pourrait faciliter la mise en place de tel projet à Québec (Samson, 2013).

Concordia greenhouse

Location : Montréal, Canada
Designers/Concepteurs : L'OEUF firme d'architecture a évalué les systèmes, la structure et l'enveloppe de la serre
Date : 2006 dans sa forme actuelle, mais présente depuis la construction du bâtiment en 1966
Superficie : n.d.

Figure B.6.9 The Concordia Greenhouse. (Greenhouse, 2019).

Le bâtiment Henry F. Hall a officiellement ouvert ses portes en octobre 1966 et comprenait une serre au 13e étage. La serre faisait partie du département de biologie. La serre a été construite comme une série de compartiments en verre séparés orientés à l'ouest le long d'un couloir. Les compartiments comprenaient du matériel spécialisé pour le contrôle de la chaleur, l'arrosage automatique et des stores grillagés pour le contrôle de la lumière du soleil. En 1974, le Loyola College et le SGWU ont fusionné pour créer l'Université Concordia fusionnant ainsi les deux départements de biologie. En 2002, Concordia a annoncé que la serre de l'immeuble Hall serait démantelée puisque la construction du complexe scientifique ultramoderne Richard J. Renaud sur le campus de Loyola comprendrait toutes les sciences physiques sous un même toit, incluant une nouvelle serre pour le département de biologie. En septembre 2004, le coordinateur de la durabilité et un coordinateur étudiant de Concordia durable ont ouvert un dialogue avec l'administration de Concordia afin d'arrêter les projets de démolition et proposaient plutôt de rajeunir et de réaffecter la serre. En novembre 2006, la serre rénovée a été officiellement inaugurée et a comme objectif d'être un espace organique pour l'éducation et la recherche, promouvant l'horticulture durable et la construction de communautés. Toutefois, la serre Concordia n'est pas une démonstration d'efficacité énergétique puisqu'elle fait partie de la structure originale du bâtiment (Greenhouse, 2019).

Il est à noter que lorsque la serre elle-même a été rouverte au public et aux étudiants en 2006, la structure originale construite en 1966 n'a pas été sérieusement modifiée, à l'exception de l'extraction de l'amiante qui faisait partie de l'ancien mobilier. Par conséquent, les matériaux utilisés dans sa construction et la technologie utilisée sont assez vieux. La plupart sont toujours fonctionnels mais seraient considérés comme très désuets par les normes des ingénieurs et des utilisateurs modernes.

La serre Concordia est chauffée mais non climatisée. Il s'agit donc d'un système actif pour le chauffage et d'un système passif pour la climatisation (conduites de ventilation latérales et supérieures.) Le système de chauffage est un système de radiateur faisait partie de la structure d'origine et est reliée à la chaudière principale du hall. Des thermostats permettent de contrôler la chaleur dans chaque compartiment de la serre. Il n'y a pas de refroidissement par évaporation ni aucun autre type de refroidissement dans l'installation, à l'exception des ventilateurs et de la brumisation, et bien sûr des conduites de ventilation.

En ce qui concerne la récupération de la chaleur du bâtiment, l'Université Concordia a adopté une politique de développement durable il y a quelques années. En hiver, le chauffage est arrêté dans tous les bâtiments de l'université pendant la nuit, à partir d'environ 18h jusqu'au lendemain matin. Par conséquent, la température dans la serre a baissé brusquement, ce qui a posé quelques problèmes. D'un point de vue efficacité énergétique, l'Université ne peut pas laisser fonctionner les chaudières pour l'ensemble du bâtiment uniquement pour alimenter la serre en chaleur. C'est pourquoi il y a quelques années, quatre radiateurs électriques dans deux compartiments ont été installés pour compenser les baisses de température nocturnes (Enviromontreal, 2011).

The Greenhouse Project at Manhattan School for children (PS 333)

Location : New York City, États-Unis
Designers/Concepteurs : architectes Kiss + Cathcart ; ingénieurs en structure Rober Silman Associates ; ingénieurs consultants Goldman Copeland Associates ; fabricant de serre (vail-atrium) Nexus Greenhouse Systems ; Fabricant du système de plantation hydroponique BrightFarm Systems.
Date : 2010
Superficie : 1 500 pieds carrés
Coût : 500 000 USD

Figure B.6.10 Manhattan school for children greenhouse. (Freisinger, 2015).

Cette école primaire publique de plus de 700 élèves de la maternelle à la 8e année a construit une serre d'éducation environnementale sur le toit produisant des légumes de culture hydroponique sur la partie ouest de son toit tel que représenté à la Figure B.6.11. L'idée fait suite à deux constats : l'enseignement des sciences de l'environnement fait défaut dans le système scolaire public de New York et plusieurs écoles ont un espace vacant sur le toit qui pourrait constituer un espace idéal pour des installations d'apprentissage pratiques. The Greenhouse Project est un programme pilote pour construire des laboratoires de sciences de l'environnement sur le toit des écoles publiques de New York. L'organisme à but non lucratif NY Sun Works a bâti des laboratoires scientifiques hydroponiques, enseigne la science et la durabilité aux classes et aux enseignants, puis mets en connexion les gens en favorisant l'implication communautaire.

(a)

(b)

Figure B.6.11 The Greenhouse Project. (Architects, 2010) : (a) Plan en élévation; (b) Salle de classe.

Le programme inclut la production alimentaire durable avec différentes zones de plantation pour des projets individuels et de classe, des systèmes de culture hydroponique et aquaponique, un centre de compost, une zone pour l'élevage des insectes, une station météo et une salle de cours. Un système de collecte des eaux de pluie récupère 40 000 gallons d'eaux de pluie annuellement destinées à être utilisées en serre. Premier laboratoire de sciences environnementales sur le toit d'une école publique de la ville de New York, la serre produira 8 000 livres de produits par an.

Les besoins en énergie de la serre ont été réduits par une bonne étanchéité à l'air, une couverture chauffante rétractable et un toit en polycarbonate à double paroi. Le fait d'abaisser la température la nuit et les week-ends contribue également à réduire les besoins en énergie. Des panneaux solaires sont installés afin d'obtenir une source d'énergie verte. Le chauffage est assuré par une pompe à chaleur électrique avec condenseur intégré dans le bâtiment pour utiliser la chaleur stockée dans le bâtiment (Freisinger, 2015; Green Home NYC, 2019).

ANNEXE C REVUE DE LITTÉRATURE COMPLÉMENTAIRE SUR LA MODÉLISATION THERMIQUE DE PHÉNOMÈNES SPÉCIFIQUES

Écrans thermiques

Les écrans thermiques sont des toiles tissées à opacité variable, rétractables, constituées de couches de polyester et d'aluminium. En saison froide, ils sont déployés pendant la nuit pour réduire les pertes de chaleur lorsque la température extérieure diminue considérablement et qu'il n'y a plus de rayonnement solaire permettant la photosynthèse des plants. En saison chaude, les écrans peuvent également servir d'ombrage lorsque le rayonnement solaire est trop intense. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un isolant proprement dit, l'écran thermique contribue de façon significative à l'isolation des serres. Les économies d'énergie réalisées dépendent principalement de la période de production et du type de serre. Les économies d'énergie varient entre 10 et 50 % selon les différentes sources consultées (Agri-Réseau, 2008).

Les principaux avantages des écrans thermiques sont la diminution du taux de perte de chaleur et l'augmentation de la température de la surface du toit. La perte de chaleur est ralentie en interrompant divers modes de transfert de chaleur, soit la conduction, la boucle de convection, le rayonnement et l'infiltration. Les écrans climatiques des serres devraient être un textile, qui est un matériau flexible constitué de fibres. La flexibilité est importante pour ranger l'écran quand il est indésirable et que les fibres, ou fils, sont indispensables pour faire face à l'humidité. Les écrans thermiques sont installés de façon horizontale dans les serres à pignons. Une barrière horizontale est alors produite et un grenier froid est créé dans le pignon de la serre. Il est à noter que l'air froid piégé doit être mélangé progressivement dans la zone de culture lors du rangement de la toile afin d'éviter la condensation sur la culture. D'une manière générale, les trois facteurs influençant la qualité des plants en serre, c'est-à-dire la température, l'humidité relative et la quantité de lumière peuvent être influencés positivement par l'utilisation d'écran thermique. Effectivement, la production doit être couverte quand la consommation d'énergie est trop grande, quand les rayons solaires sont trop intenses ou lorsque le taux d'humidité est trop bas. (Parbst, 2011). Les rideaux thermiques protègent les cultures du stress thermique, en augmentant à la fois la qualité des cultures et la productivité. Le terme intégral de la lumière quotidienne (DLI : *Daily Light Integral*) fait

référence nombre de photons photosynthétiquement actifs, soit les photons dans la gamme de rayonnement photosynthétiquement actif (PAR : *Photosynthetically Active Radiation*). Il s'agit de particules de longueur d'onde de 0,4 µm à 0,7 µm, inclues dans le spectre du rayonnement solaire reçus sur une période de 24 heures. Cette variable est particulièrement utile pour décrire l'environnement lumineux des plantes. Les écrans permettent d'obtenir un niveau optimal en variant l'intensité lumineuse qui doit être maximisée en hiver et réduite en été. Le défi technique majeur est la sélection du type de rideau d'ombrage en fonction de sa microstructure et de son analyse radiométrique spectrale (MattaraChalill, Nandakumar, Periasamy, & Karthikeyan, 2017). En somme, les rideaux mobiles agissent non seulement sur l'efficacité énergétique, mais également le rendement de croissance des plantes dans la serre.

Selon l'étude du Centre d'information et de développement expérimental en serriculture (CIDES), l'utilisation d'écrans thermiques de nuit en serre a permis d'économiser 33,1 % d'énergie pendant la période nocturne et 23,5 % en moyenne sur une période de 24 heures. La serre étudiée, produisant des fleurs annuelles, est en film de polyéthylène et polycarbonate, composée de 10 chapelles de 50 820 pi^2 (21 pi x 242 pi), sans isolation, avec une ventilation naturelle, chauffée au gaz naturel et est située à Saint-Rémi, en Montérégie. Les écrans thermiques, installés au toit de la serre sur toute sa superficie, à 14 pi du sol, sont 100% aluminisés et ont un taux théorique de rétention de chaleur de 80%. Ils sont déployés pendant la nuit, du coucher au lever du soleil et les mesures sont prises de février à avril. De plus, d'autres conclusions ont été énoncées, notamment, la présence d'écrans thermiques diminue l'effet du vent sur les pertes de chaleur. Il est important de maximiser l'isolation et l'étanchéité de la serre afin d'obtenir le plein potentiel de l'écran thermique. La période de retour sur investissement varie entre 2,3 et 7,7 années selon la période d'utilisation de la serre (Centre d'information et de développement expérimental en serriculture, 2010).

Dans le cadre du projet d'initiatives structurantes en technologies efficaces, 30 entreprises de production en serre ont été analysées au moyen de différentes stratégies afin d'augmenter l'efficacité énergétique. La mesure la plus efficace est la mise en place d'écrans thermiques engendrant en moyenne 9,1 % d'économie d'énergie. Il est à noter le plus faible pourcentage provient du fait que des 10 producteurs ayant installé des écrans thermiques, seulement trois ont une couverture complète puisque l'implantation de cette mesure est limitée par la hauteur de la structure, surtout pour les serres plus âgées. Les 30 entreprises auditées, d'un âge moyen de 14 ans,

ont une superficie moyenne de 130 000 pi^2 et sont chauffés à 48 % au gaz naturel, à 18 % à la biomasse et à 15 % à l'huile usée (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2008).

Des économies d'énergie variant de 28 à 49 % dépendamment du modèle d'écran ont été mesurées dans l'étude de PARINOVA Inc., de Polytechnique Montréal et du Centre de recherche technique et statistique, Agriculture Canada. La serre analysée est une structure typique ogivale recouverte d'une paroi double de polyéthylène gonflée, composée de 19 modules jumelés de 2 766 m^2 (5,2 m x 28,0 m) et située dans la région de Montréal. Elle est orientée sud-est nord-ouest. Le mur nord-est est opaque et isolé et le mur sud-ouest est isolé jusqu'à une hauteur de 1,2 m. La serre est chauffée par un système à air chaud, soit des calorifères fonctionnant au mazout, à raison d'un par deux modules (Paris, Houle, Bricault, & Jackson, 1989).

Infiltration

Principes théoriques

L'échange d'air intérieur-extérieur se fait de deux manières : par ventilation volontaire et par infiltration indésirable ou fuite. La deuxième est analysée ici puisqu'il s'agit d'une quantité d'air difficile à contrôler et qui impacte la consommation d'énergie du bâtiment en particulier dans les climats soumis au chauffage. En effet, contrairement à la ventilation, qui est réalisée de façon contrôlée par un système mécanique, le taux d'air lié à l'infiltration entrant ou sortant du bâtiment se produit sans refroidissement ou préchauffage de celle-ci, déséquilibrant ainsi le bilan énergétique du bâtiment. Il s'agit essentiellement d'une mesure de l'étanchéité à l'air ou de l'étanchéité de l'enveloppe d'un bâtiment. Cependant, les difficultés à estimer l'infiltration sont nombreuses et les données, peu nombreuses pour les bâtiments commerciaux et institutionnels comparativement aux bâtiments résidentiels (Rowan Williams Davies & Irwin Inc., 2016).

Par conséquent, plusieurs projets ne prêtent pas suffisamment attention à l'infiltration lors de la phase de conception. Effectivement, des calculs détaillés, des modèles informatiques de dynamique des fluides ou des tests sur site sont nécessaires pour déterminer plus précisément le taux d'infiltration à appliquer à un modèle énergétique. De plus, les codes de l'énergie les plus couramment utilisés au Canada, notamment *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) 90.1 et *National Energy Code of Canada for Buildings*

(NECB) ne permettent pas d'associer des économies d'énergies liées directement aux technologies et stratégies réduisant l'infiltration (Rowan Williams Davies & Irwin Inc., 2016).

La revue de littérature suivante et la prise en compte du taux d'infiltration dans les calculs de l'outil, bien que non exhaustives, ont comme objectif non seulement d'utiliser la meilleure estimation possible, mais de le faire varier selon différents paramètres et de comprendre l'impact qu'il peut avoir dans le modèle énergétique.

L'infiltration réelle dans un bâtiment existant est souvent mesurée à l'aide d'un test porte-soufflante dans laquelle le bâtiment est pressurisé avec un ventilateur et la fuite est mesurée par le volume d'air que le ventilateur envoie dans le bâtiment pour maintenir cette pression. Ces tests sont généralement effectués à des pressions comprises entre 50 et 300 Pa, mais la plus courante est 75 Pa. Étant donné que ces pressions élevées ne sont pas typiques des conditions de fonctionnement de la plupart des bâtiments commerciaux, les taux de fuite à ces pressions élevées sont rarement des entrées appropriées pour un modèle énergétique (Rowan Williams Davies & Irwin Inc., 2016). Ceux-ci sont donc convertis en une autre unité telle que l'ELA_4 (*Effective Leakage Area*) ou encore en un deuxième taux de fuite d'infiltration par unité d'enveloppe du bâtiment Q_2 pour un test à une pression de ΔP_2 :

$$Q_2 = \frac{Q_1}{(\Delta P_1)^n}(\Delta P_2)^n \tag{C.1}$$

Où Q_1 est taux de fuite d'infiltration par unité d'enveloppe du bâtiment pour un test à une pression ΔP_1, n est l'exposant de la courbe de débit normalement mesuré par infiltrométrie (pressure exposant). Cet exposant est égal à 0.5 pour un orifice parfait. En pratique, il varie de 0.5 (débit turbulent complètement développé) à 1 (longue et mince fente, débit laminaire). Lorsqu'on ne connaît pas n, on suppose généralement une valeur de 0.65 (ASHRAE 2017).

Normes pour les bâtiments commerciaux et institutionnels

Au Canada, on estime que l'étanchéité à l'air a été mesurée pour 250 000 à 500 000 maisons pendant la période 1980-2015. Contrairement à la construction résidentielle, le nombre de bâtiments commerciaux dont l'étanchéité à l'air a été testée est au mieux de quelques centaines. La base de connaissances existantes sur les données d'étanchéité à l'air des bâtiments commerciaux est donc

limitée. Suite à ce constat, plusieurs études ont testés, documentés et rapportés le taux d'infiltration de certains bâtiments commerciaux dans la littérature (Price, Shehabi, Chan, & Gadgil, 2006).

Le Tableau C.6.2 suivant présente différentes normes et exigences liées à l'obtention d'une certification reconnue ou normes du taux de fuite normalisé à une pression différentielle de 75 Pa (NLR_{75} : *Normalized Leakage Rate at a pressure differential of 75 Pa*) par unité d'enveloppe des bâtiments commerciaux et institutionnels pour le Canada et les États-Unis. Le taux d'infiltration est pour l'ensemble du bâtiment et est basé sur les six côtés, y compris la dalle et les murs sous terre. La source des données, sauf indication contraire, provient de l'ASHRAE (2017). Il est à noter que GBM fait référence à grand bâtiment multilogement (habitation multilogement d'une hauteur d'au moins quatre étages et d'au plus dix étages ou d'une aire de bâtiment de plus de 600 m²) et que PBM fait référence à petit bâtiment multilogement (habitation multilogement d'une hauteur d'au plus trois étages et d'une aire de bâtiment d'au plus 600 m^2).

Tableau C.6.2. Normes et exigences de certification pour le taux de NLR_{75} des bâtiments commerciaux et institutionnels au Canada et aux États-Unis.

Normes	NLR_{75} [L/s-m^2]
ASHRAE (2017) **(Tamura, 1977)**, tight building	0,51
R-2000 Standard **(Zhivov, Herron, Durston, Heron, & Lea, 2016)**	0,66
United Kingdom Building Regulations (2006), **(Rowan Williams Davies & Irwin Inc., 2016; Waite & O'Brien, 2010)**	0,76
Novoclimat **(Québec, 2014, 2015)**	GBM : 0,74 | Maison-PBM : 0,74 détaché et 1,02 attenant
ASHRAE (2017)	1,27
International Green Construction Code (IgCC)	1,27
U.S. Army Corps of Engineers (USACE)	1,27
ASHRAE (2017) **(Tamura, 1977)**, average building	1,52
LEED **(Zhivov et al., 2016)**	1,52
International Energy Conservation Code (IECC)	1,98
U.S. General Services Administration (GSA)	2,03
ASHRAE (2017) **(Tamura, 1977)**, leaky building	3,05

Études du taux d'infiltration pour les bâtiments commerciaux et institutionnels

Le Tableau C.6.3 résume les résultats de différentes études concernant le NLR_{75} dans les bâtiments commerciaux et institutionnels. Il est à noter que le taux d'infiltration est pour l'ensemble du bâtiment et est basé sur les six côtés, y compris la dalle et les murs sous terre, sauf indication contraire. Les différentes études présentent le même constat général, soit que les immeubles à bureaux ont des taux de fuite d'air plus grand que ce qui était attendu ou prévu dans les normes.

Tableau C.6.3. Résumé des données de NLR_{75} de bâtiments commerciaux et institutionnels au Canada et aux États-Unis provenant de différentes études.

Études	Description des bâtiments	NLR_{75} [L/s-m^2]	
		Intervalle	Moyenne
(Tamura, 1977) Tests de pressurisation Effet de cheminé : considéré Effet du vent : négligé	8 immeubles à bureaux, fenêtres fixes à double vitrage, de 1964 à 1974 11 à 22 étages Ottawa, Canada	0,610 à 2,438	-
(Persil et Grot 1986) Tests de pressurisation	8 immeubles à bureaux États-Unis	1,082 à 5,222	-
(Emmerich & Persily, 2005, 2014) Tests de pressurisation	387 bâtiments commerciaux, environ 70 construits de 2000 à 2010 États-Unis	-	5 côtés : 5,417 6 côtés : 3,639

Dans le passé, les enveloppes de grands bâtiments commerciaux étaient souvent présumées être assez hermétiques. Pourtant, l'étude de (Tamura, 1977) a démontré que, en supposant un exposant n de la courbe de débit normalement mesuré par infiltrométrie égal à 0,65 les taux de fuites d'air étaient considérables. Les tests de pressurisation de Persil et Grot (1986) ont montré que le débit d'air de pressurisation par unité de volume était relativement faible par rapport à celui de bâtiments résidentiels. Cependant, si ces débits d'air sont exprimés par unité d'enveloppe du bâtiment, les résultats indiquent que l'étanchéité à l'air de l'enveloppe est similaire à celle des maisons nord-américaines typiques. Pour des bâtiments semblables, l'étude de Persil et Grot (1986), réalisée sur des immeubles des États-Unis, obtient des résultats de taux d'infiltration deux fois plus grands que celle de (Tamura, 1977), réalisée sur des immeubles du Canada.

(Emmerich & Persily, 2005, 2014) ont analysé 228 anciennes données de 2005 et 2011 avec l'ajout de 159 nouvelles données en 2014 du taux d'infiltration pour des bâtiments commerciaux aux États-Unis. Les fuites d'air moyennes obtenues du total de 387 bâtiments sont 20% plus petites que celles des anciennes données de 2011. Ceci s'explique en partie, car les ajouts récents à la base de données comprennent de nombreux bâtiments construits pour les spécifications des programmes de construction durable des États-Unis tels que le système d'évaluation LEED du Green Building Council, ainsi que des bâtiments conçu et construit avec un pare-air. Les données ont été analysées pour déterminer quels facteurs affectent le plus l'étanchéité à l'air. En conclusion, les données ne montrent que de faibles tendances liées à l'année de construction, la hauteur, la surface de plancher, la construction du mur ou le type de bâtiment, mais démontrent que les bâtiments conçus et construits avec une attention particulière à l'étanchéité à l'air sont beaucoup plus étanches que les bâtiments commerciaux typiques. L'analyse a constaté que les 79 bâtiments dotés d'un pare-air avaient un taux de fuites d'air moyenne près de 70% plus petit que la moyenne des 290 bâtiments non spécifiés comme ayant un pare-air. Ce constat soutient le besoin critique de concevoir et de construire des bâtiments commerciaux avec des pare-air afin de soutenir la conception de bâtiments durables. Cependant, la grande variation des données d'infiltration mesurée et le manque de descriptions détaillées des pare-air utilisés rend difficile la prédiction d'un niveau précis d'étanchéité à l'air résultant de l'utilisation d'une approche spécifique pour les pare-air. Ces travaux ont conduit à l'examen et à l'adoption de pare-air normatif dans les normes, codes et programmes de construction.

Études du taux d'infiltration pour les bâtiments d'éducation

Le Tableau C.6.3 résume les résultats de différentes études concernant le NLR_{75} dans les bâtiments d'éducation. Il est à noter qu'il est présumé que le taux d'infiltration pour l'ensemble du bâtiment est basé sur les six côtés, y compris la dalle et les murs sous terre, bien qu'il n'est pas spécifié tel quel dans les articles. Les écoles sont un type de bâtiments de la grande catégorie des bâtiments commerciaux et institutionnels présentant des taux de fuite considérables quant aux normes, bien qu'inférieurs à ceux de leur catégorie globale.

Tableau C.6.4. Résumé des données de NLR_{75} de bâtiments d'éducation au Canada et aux États-Unis provenant de différentes études.

Études	Description des bâtiments	NLR_{75} [L/s-m^2]	
		Intervalle	Moyenne
1) **(Price et al., 2006)** 2) Compilation et analyse des données disponibles provenant de 15 études différentes	11 écoles en maçonnerie Canada	-	1,46
3) **(RRC-SITRG, 2015)** 4) Tests de dépressurisation et de pressurisation, puis moyenne de ces deux résultats	4 écoles âgées de 1 à plus de 100 ans Manitoba, Canada	0,19 à 1,98	1,12
5) **Projet ASHRAE 1478-RP (2014)** 6) Tests de pressurisation	16 bâtiments âgés de 5 ans et moins 4 à 14 étages États-Unis	0,30 à 3,81	1,47
7) **Proskiw Engineering Ltd (2001)** 8) Compilation et analyse des données disponibles provenant de différentes études	11 écoles âgés de 3 à 28 ans, structure en maçonnerie 1 étage Ottawa, Ontario, Canada	0,74 à 2,11	1,48
9) **(Shaw & Jones, 1979)** 10) Tests de pressurisation	11 écoles âgés de 3 à 24 ans, structure en maçonnerie 1 étage Ottawa, Ontario, Canada	5,30 à 12,10	8,04

Le taux d'infiltration moyen pondéré est de 1,44 L/s-m² pour l'ensemble des données de toutes les études présentées à l'exception de l'étude de (Shaw & Jones, 1979) qui présente des résultats plus anciens. En prenant en compte cette dernière étude, le taux d'infiltration moyen pondéré monte à 2,81 L/s-m².

Étude 1

L'objectif de l'étude de (Price et al., 2006) est la compilation et l'analyse des données disponibles concernant les taux de fuite d'air intérieur-extérieur et des paramètres d'étanchéité des constructions commerciales et des appartements provenant de 15 études différentes. Les prévisions du taux d'infiltration d'air donnent des valeurs plus élevées en hiver en raison de forces motrices.

Les 267 mesures de bâtiment utilisées constituaient, lors de la réalisation de l'étude, en juin 2006, la plus grande collecte de données d'infiltration non résidentielles à ce jour. L'analyse a été réalisée selon un large éventail de paramètres des bâtiments. L'ensemble de données est toutefois trop petit pour produire une conclusion significative en utilisant des méthodes d'analyse traditionnelles. Ainsi, la modélisation hiérarchique bayésienne (*Bayesian Hierarchical Modeling* également connue sous le nom de *Bayesian Multilevel Modeling*) a donc été utilisée comme voie intermédiaire, permettant un partage partiel des informations entre les catégories suivantes. Les paramètres sont :

- 5 pays développés : États-Unis (61%), Canada (13%), Royaume-Uni (11%), Suède (9%) et France (6%);
- 12 types d'utilisation des bâtiments : écoles (27%), bureaux (18%), industries et entrepôts (13%), petits commerces de détail (7%), bâtiments publics (7%), centres de loisirs et auditoriums (7%), centres commerciaux (6%), puis finalement supermarchés, restaurants, hébergement, établissements de santé et autres (15%);
- 7 types de construction : maçonnerie (51%), ossature en maçonnerie (6%), panneau de béton/inclinable (8%), ossature métallique (16%), mur-rideau (1%), préfabriqué (2%), ossature en bois (5%).

Le nombre d'étages, l'année de construction et la superficie des bâtiments sont également des caractéristiques du bâtiment qui ont été analysées de façon indépendante.

L'estimation de l'infiltration pour un bâtiment d'éducation en maçonnerie au Canada (CanEduMas) basée sur 11 mesures de bâtiments de ce type est alors : $10^{0.051} = 1{,}12460497$ L/s-m^2 mesurée à une différence de pression de 50 Pa. En convertissant ce taux de fuite pour une différence de pression plutôt à 75 Pa d'après l'Éq. (C.1), on obtient un NLR_{75} de 1,46 L/s-m².

Voici les principales conclusions de l'étude concernant les bâtiments commerciaux :

- Dans une activité donnée (éducation, vente au détail, etc.), il semble y avoir peu de variation systématique de l'étanchéité en fonction du type de construction.
- Dans un type de construction donné (ossature métallique, maçonnerie, etc.), il existe certaines preuves que les écoles et les bâtiments de rassemblement public ont tendance à

être un peu plus étanches que la moyenne. À l'inverse, les entrepôts ont tendance à présenter plus de fuites que la moyenne.

- Les bâtiments avec une petite surface de toit, soit moins de 1000 m^2, ont tendance à présenter de 25% à 50% plus de fuites par unité d'enveloppe que les bâtiments à grandes empreintes.
- Les bâtiments les plus hauts semblent être légèrement plus étanches (les bâtiments à un étage présentent entre 10 et 25% plus de fuites que les bâtiments plus hauts par unité d'enveloppe). Cependant, cette observation est difficile à défendre et à expliquer. D'une part, la rareté des immeubles de grande hauteur dans la base de données laisse peu de puissance statistique. D'autre part, presque tous les grands immeubles sont des bureaux, ainsi il est impossible de distinguer s'il s'agit de la conséquence de la hauteur ou du type de bâtiment.
- Pour les bâtiments d'un type de construction, d'une activité, d'un nombre d'étages et d'une empreinte spécifiques, les fuites par unité d'enveloppe sont approximativement distribuées avec la loi lognormale, avec un écart type géométrique compris entre 1,7 et 2,2 environ.
- En moyenne, les bâtiments commerciaux peuvent avoir environ deux fois plus de fuites que les maisons unifamiliales, par unité d'enveloppe de bâtiment.

Étude 2

Le groupe de recherche sur la technologie des infrastructures durables du Red River College (RRC-SITRG : *Sustainable Infrastructure Technology Research Group at Red River College*) à Winnipeg, au Manitoba, au Canada a mené un projet de recherche ayant pour objectif d'élargir la base de connaissances sur les caractéristiques d'étanchéité à l'air des bâtiments commerciaux en effectuant des tests sur un échantillon représentatif du parc de bâtiments commerciaux du Manitoba. Entre 2012 et 2014, 26 immeubles commerciaux au Manitoba ont été testés dont 4 écoles.

La méthodologie utilisée est le protocole de test de fuite d'air pour les enveloppes de bâtiment, version 3, publié en 2012 par le US Army/ABAA. La pratique standard lors de la réalisation d'essais d'étanchéité à l'air dans les bâtiments commerciaux consiste à effectuer des essais séparés,

d'abord de dépressurisation, puis de pressurisation. L'étanchéité finale du bâtiment est ensuite calculée comme la moyenne de ces deux résultats.

Les quatre écoles étudiées sont âgées entre un an et plus d'un siècle et sont situées dans les villes du Manitoba, soit Winnipeg, Steinbach, St. Pierre et Swan Lake First Nations. Les résultats du NLR_{75} pour les 4 bâtiments d'éducation se situent entre 0,19 L/s-m^2 et 1,98 L/s-m^2, avec une moyenne de 1,12 L/s-m^2. La moyenne du taux de fuite est la plus faible de toutes les études présentées, et ce, malgré le fait que les écoles manitobaines ont été testées avec une moyenne d'âge d'environ 50 ans et une seule a été conçue dans le souci de l'étanchéité à l'air.

Bien que la taille de l'échantillon soit petite, l'observation la plus surprenante est que le NLR_{75} varie d'un facteur supérieur à 10 entre les écoles les plus étanches et celles présentant le plus de fuites. Cependant, cela s'explique en grande partie par le fait que la structure la plus étanche de l'échantillon global de l'étude de 26 bâtiments fait partie de ce type de bâtiment, soit une école âgée de un an lors du test, doté d'un pare-air soigneusement conçu et installé. Son NLR_{75} mesuré n'était que de 0,19 L/s-m^2, ce qui en fait l'un des bâtiments les plus étanches de sa taille jamais testé dans le monde. Ces résultats sont particulièrement encourageants, car il s'agissait d'un des bâtiments avec une conception architecturale et un agencement les plus complexes de l'échantillon global. En effet, le type de structure le plus facile à rendre étanche, qu'il s'agisse d'un bâtiment commercial, résidentiel ou autre, est une forme rectangulaire simple. Au contraire, celui-ci comprenait deux niveaux de plancher, plusieurs hauteurs de mur et de toit, un système mécanique moderne intégré avec de multiples pénétrations à travers l'enveloppe du bâtiment, un système de dépoussiérage puissant pénétrant dans l'enveloppe. Dans un autre ordre d'idées, l'école de Winnipeg, avec un NLR_{75} mesuré de 1,22 L/s-m^2, qui était l'une des plus anciennes structures de l'échantillon global, a été modernisée au cours du projet (voir la section suivante concernant les mesures d'améliorations pour l'étanchéité des bâtiments); les résultats d'étanchéité précédents concernent le test avant modernisation.

Étude 3

Ce projet a mesuré l'étanchéité à l'air de 16 nouveaux bâtiments, avec des hauteurs allant de 4 à 14 étages construits depuis 2000. Les bâtiments testés étaient situés aux États-Unis. Les résultats du taux de fuite de l'étude d'ASHRAE présentent une moyenne de NLR_{75} de 1,47 L/s-m^2, soit une valeur raisonnable par rapport aux autre études, mais toutefois supérieure à celle de (RRC-SITRG,

2015), et ce, même si tous les bâtiments de l'étude d'ASHRAE avaient moins de cinq ans et que la plupart avaient été explicitement conçus pour atteindre un niveau élevé d'étanchéité à l'air. À noter que, bien que cette étude ne traite pas exclusivement de bâtiments d'éducation, elle en comprend tout de même et demeure pertinente pour l'analyse comparative.

Étude 4

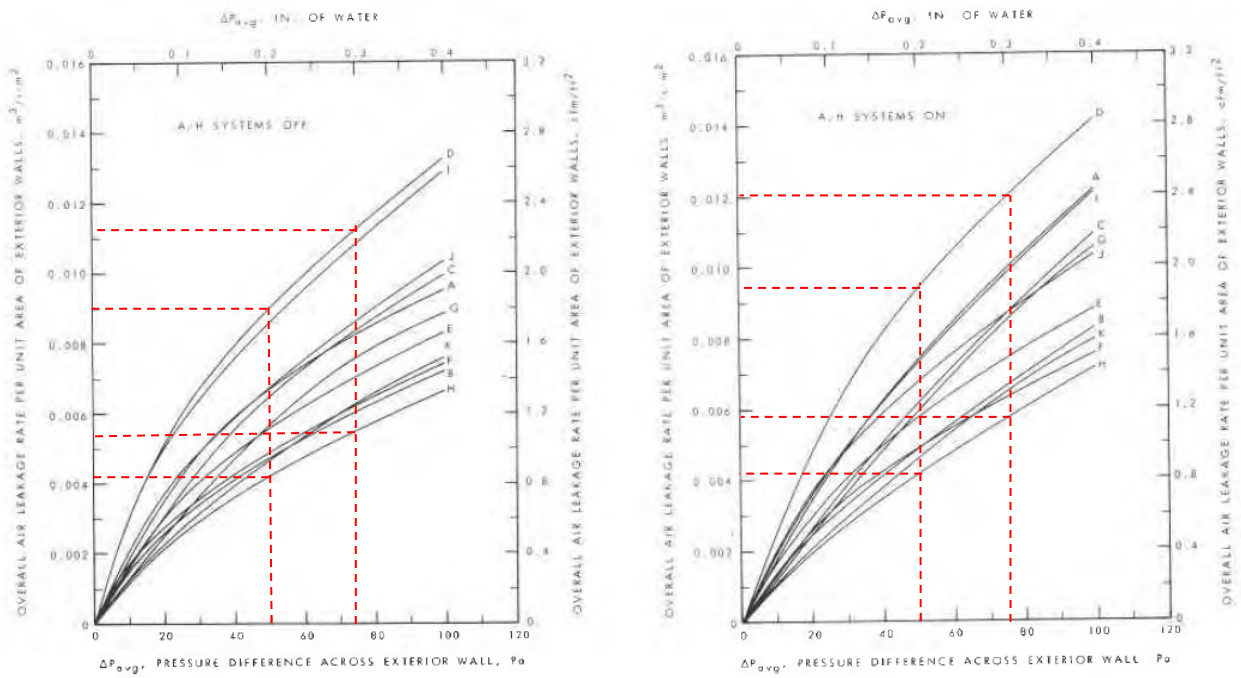
Cette étude bibliographique a été réalisée pour le compte de la Société canadienne d'hypothèques et de logements (SCHL). Il a identifié des résultats d'étanchéité à l'air dans 192 bâtiments au Canada, aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en Suède. Le rapport de Proskiw Engineering Ltd contient des données sur 11 écoles testées parmi l'échantillon global. Elles ont enregistré une moyenne de NLR_{75} de 1,48 L/s-m^2, soit très semblable aux études de (Price et al., 2006) et de l'ASHRAE (2014). Les bâtiments scolaires analysés sont tous composés de structures de maçonnerie à un étage, situés à Ottawa et âgés de 3 à 28 ans avec une moyenne de 12 ans au moment du test. De plus, il faut souligner que le rapport de Proskiw Engineering Ltd a été rédigé 12 ans avant le rapport de RRC-SITRG, avec probablement une prise de mesures plus rudimentaire pouvant expliquer en partie le taux de d'infiltration plus élevé.

Étude 5

La Division des recherches en bâtiment du Conseil national de recherches du Canada a collaboré avec le Conseil scolaire du district Ottawa-Carleton, à l'automne 1975, dans le cadre d'un programme visant à réduire la consommation d'énergie dans les écoles sachant que les écoles, en tant que groupe, constituaient le troisième consommateur d'énergie parmi les édifices du Canada. Un des principaux problèmes rencontrés au départ était celui du manque de données sur les infiltrations d'air pour les édifices scolaires. Un programme de mesure des pertes d'air dans les écoles a donc été entrepris. Les résultats de ces relevés ont ensuite été appliqués à un modèle simple d'édifice scolaire, à partir duquel les infiltrations d'air et leur apport à la charge globale de chauffage ont pu être calculés. Onze bâtiments scolaires d'essai ontariens ont été en fonction de leur consommation d'énergie de 1975. Les écoles analysées sont toutes composés de structures de maçonnerie à un étage et âgées de 3 à 24 ans avec une moyenne de 10 ans au moment du test. Puisque cette étude a été réalisée à une certaine époque, la prise de mesures est plus rudimentaire. Les caractéristiques de fuite d'air des bâtiments scolaires ont été mesurées à l'aide de la méthode de pressurisation. Les bâtiments ont été testés avec le système de traitement de l'air en

fonctionnement et arrêté. Avec le système activé, une première lecture de la différence de pression à travers les murs extérieurs a été prise avec le ventilateur de test arrêté et son ouverture d'approvisionnement scellée. Cette lecture, qui est la quantité de la pressurisation résultant du déséquilibre entre les débits d'air entrant et sortant des installations de traitement de l'air, a ensuite été soustraite algébriquement des lectures de la différence de pression obtenue avec le ventilateur de test en fonctionnement. Les taux de fuite d'air par les ouvertures d'approvisionnement et d'échappement d'air, les fenêtres ouvrantes et les portes ont été obtenus en comparant les taux de fuite d'air globaux pris avant et après leur scellement. En raison des difficultés d'étanchéité, seules les écoles dotées d'un système de traitement d'air centralisé ont été testées. De plus, puisque les joints entre les cadres de fenêtres ou de portes et les murs n'étaient pas scellés, toute fuite y est considérée comme faisant partie de la fuite d'air à travers les murs.

Les taux de fuite d'air par unité d'enveloppe et leur différence de pression correspondante sont illustrés dans la Figure C.6.12 pour le système de traitement d'air en fonctionnement ou à l'arrêt. Les résultats varient de 5,3 à 12,1 L/s-m^2 pour une différence de pression de 75 Pa. Ces résultats sont les plus élevés de toutes les études du NLR_{75} pour les bâtiments d'éducation. Ceci s'explique probablement du fait que tant l'année de construction des bâtiments, variant de 1952 à 1973, que l'année des tests, soit 1976, sont globalement les plus vieilles des différentes études présentées. Ainsi, la méthode et l'équipement utilisé pour les tests de pressurisation ont été améliorés pour les études suivantes. De plus, des mesures d'étanchéité normatives ont été intégrées aux normes, codes et programmes de construction tel le pare-air suite aux études de (Emmerich & Persily, 2005, 2014). Ces figures montrent également que, de manière générale, le fonctionnement du système de traitement de l'air a peu d'effet sur le taux de fuite d'air lorsque les différences de pression sont inférieures ou égales à 50 Pa (à l'arrêt : 4,1 à 9,0 L/s-m^2 pour 50 Pa et 5,3 à 11,2 L/s-m^2 pour 75 Pa; en fonctionnement : 4,2 à 9,4 L/s-m^2 pour 50 Pa et 5,8 à 12,1 L/s-m^2 pour 75 Pa).



(a) (b)

Figure C.6.12. Taux de fuite d'air globaux des écoles, adapté de (Architects, 2010; Shaw & Jones, 1979) : (a) sans et (b) avec un système de traitement de l'air en fonctionnement.

La variation des fuites d'air d'une école à l'autre ne s'explique pas par la construction des murs parce qu'ils avaient tous une conception semblable. L'analyse de la construction de l'école présentant la valeur de fuite la plus élevée (école D) a toutefois révélée un grand nombre d'ouvertures autour des solives du toit et au niveau des murs extérieurs, ce qui suggère que les défauts de fabrication et le manque de souci pour l'étanchéité peut conduire à un taux d'infiltration important.

Mesures d'améliorations pour l'étanchéité des bâtiments

Il est intéressant de souligner que certaines mesures d'amélioration à l'étanchéité d'un bâtiment peuvent être apportées afin de diminuer les pertes liées à l'infiltration. Il peut s'agir d'une simple installation d'un coupe-froid de base sur certaines portes et fenêtres ou alors d'une reconstruction partielle ou complète de l'enveloppe du bâtiment. Ces solutions, bien qu'ayant des impacts variables, sont toutes considérées comme des mesures d'étanchéité contre les fuites d'air. Le Tableau C.6.5 décrit plusieurs améliorations distinctes du scellement des fuites d'air étudiées par quatre études différentes.

Tableau C.6.5. Exemples de solutions de réhabilitation pour limiter les fuites d'air d'un bâtiment.

Études	Descriptions		Réduction du NLR_{75}	
	Bâtiments	Améliorations	[L/s-m^2]	[%]
1) **(RRC-SITRG, 2015)**	Tour de bureaux de 1976 16 étages Winnipeg, Manitoba, Canada	Remplacement des vitrages de mur-rideau et des panneaux d'allège	0,21	17
	Bâtiment de bureaux de 1975 avec sous-sol et construit avec panneaux de béton préfabriqués isolés 2 étages Selkirk, Manitoba, Canada	Remplacement de 80% des fenêtres non ouvrantes (cadres et vitrages isolants) et autres mesures de base	0,21	19
	École de 1900 en maçonnerie; extension de plain-pied de 1950 à ossature de bois; nouveau gymnase récemment achevé (vides sanitaires dans tout bâtiment) Winnipeg, Manitoba, Canada	Scellement des portes, fenêtres et divers trajets de fuite d'air identifiés	0,16	13
2) **Projet ASHRAE 1478-RP (2014)**	École récente avec une géométrie et une construction assez complexes 4 étages États-Unis	Scellement des portes, fenêtres et divers trajets de fuite d'air identifiés	-	34
3) **RDH Building Engineering Ltd (2013)**	6 IRLM Canada et États-Unis	Rénovations pour réduire les fuites d'air (aucun détail)	-	31
4) **Proskiw Engineering Ltd (2001)**	15 bâtiments IRLM (3) Bureaux (5) Écoles (4) Bâtiments industriels (3) Canada, États-Unis, Grande-Bretagne et Suède	Rénovations pour réduire les fuites d'air (aucun détail)	-	17
	Piscine municipale Winnipeg, Manitoba, Canada	Reconstruction de l'ensemble du système de murs	-	92

La réduction moyenne pondérée du taux d'infiltration suite aux mesures d'améliorations pour l'étanchéité est de 16% pour les trois bâtiments de l'étude de (RRC-SITRG, 2015) et de 21% pour

l'ensemble des données de toutes les études présentées à l'exception du cas particulier de la reconstruction complète de la piscine municipale de Winnipeg.

Étude 1

La réduction absolue du NLR_{75} produite par les améliorations de l'étude du (RRC-SITRG, 2015) est étonnamment cohérente, allant de 0,16 à 0,21 L/s-m². De plus, les deux premiers bâtiments à bureaux âgés d'environ 40 ans au moment de l'étude et dont les vitrages ont été remplacés ont connu la même réduction de leur NLR_{75}, soit 0,21 L/s-m², passant de 1,24 à 1,03 L/s-m² pour le bâtiment à 16 étages et de 1,11 à 0,90 L/s-m² pour le bâtiment à 2 étages. Quant à l'école centenaire, elle est passée d'un taux de fuite de 1,22 à 1,06 L/s-m² suite aux rénovations de l'étanchéité.

Étude 2

Dans l'étude d'ASHRAE, présentée précédemment, le bâtiment étudié pour les mesures d'améliorations de l'étanchéité est celui présentant le plus grand taux de fuite de l'échantillon d'ASHRAE composé de 16 bâtiments. Ceci peut expliquer en partie le fort taux de réduction du NLR_{75} qui est le double de celui de l'étude du (RRC-SITRG, 2015). Deux séries de tests d'étanchéités distincts ont été effectués avant, pendant et après les travaux d'améliorations et ont permis de réduire de 34% le taux de fuite. Le point de fuite majeur de l'air et la principale zone attaquée pendant les travaux de scellement étaient, comme dans plusieurs des bâtiments de l'étude du RRC-SITRG, l'intersection du mur extérieur et de la terrasse du toit, en particulier là où la terrasse du toit rencontre les murs.

Étude 3

Cette étude bibliographique, commandée par la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement (SCHL), s'intéressait principalement aux résultats documentés sur l'étanchéité à l'air des Immeubles Résidentiels à Logements Multiples (IRLM), car il s'agit de l'objectif principal de la SCHL. Le rapport contient les résultats de 296 bâtiments au Canada et aux États-Unis, bien que seulement 15% (43 sur 296) soient des IRLM. La plupart des résultats, soit 83% (245 sur 296), provenaient d'essais effectués pour la US Army Corp. of Engineers sur des bâtiments militaires américains.

Les améliorations apportées pour les 6 IRLM de l'étude RDH ont été, dans l'ensemble, assez réussies par rapport à celles de l'étude RRC-SITRG puisque la réduction moyenne du NLR_{75} est de

31%. Cependant, un constat semblable à l'étude d'ASHRAE doit être souligné : une différence évidente entre les deux groupes est que les bâtiments de l'étude RDH présentaient initialement des fuites; leurs valeurs de NLR_{75} allant de 3,2 à 5,0 L/s-m². En revanche, l'échantillon total de 26 bâtiments de l'étude RRC-SITRG présentaient des valeurs NLR_{75} allant de 0,19 à 3,4 L/s-m². Ceci est important, car il est généralement plus facile de sceller les bâtiments présentant des fuites plus importantes que ceux présentant des fuites plus modestes.

Étude 4

À noter que cette étude de de Proskiw Engineering Ltd est précurseur au rapport (RDH Building Engineering Ltd 2013) et que 5% à 15% des résultats de cette étude ont également été mentionnés dans le rapport RDH. Le rapport de Proskiw Engineering Ltd, exposé préalablement, a identifié 16 bâtiments dans la littérature qui avaient été rénovés, bien que seulement 15 d'entre eux correspondent réellement à des mesures d'améliorations de l'étanchéité des fuites d'air. Le 16e bâtiment a enregistré une réduction remarquable de 92% de son NLR_{75} mesuré et est traité séparément, car il s'agit plutôt une reconstruction que d'une rénovation. Les 15 bâtiments du groupe principal ont obtenu une réduction moyenne de leur NLR_{75} semblable à celle observée avec l'étude de RRC-SITRG. Enfin, les murs extérieurs de la piscine municipale de Winnipeg, qui consistaient en une ossature en acier avec un remplissage en unités de maçonnerie en béton et une finition intérieure ont été complètement supprimés, de sorte que la seule partie du système de murs extérieurs qui subsistait était l'ossature en acier. Un pare-air très soigneusement appliqué et inspecté a été intégré à la nouvelle construction. En effet, son NLR_{75} final mesuré est de 0,04 L/s-m², soit l'un des bâtiments les plus étanches de la littérature.

Études du taux d'infiltration pour les serres

Au cours des dernières années, l'infiltration de l'air dans les serres a été réduite considérablement. Le nombre de changement du volume d'air dans le bâtiment en une heure à une différence de pression de 50 Pa (ACH_{50} : *Air Changes per Hour at a pressure differential of 50 Pascals*) est passé de 3 h^{-1} ou plus à moins de 0,5 h^{-1} (Brundrett, Jewett, & Quist, 1984). Effectivement, une autre étude sur l'estimation de l'ACH_{50} selon le type du recouvrement et l'âge de la serre expose des résultats équivalents présentés au Tableau C.6.6.

Tableau C.6.6. Taux d'infiltration estimés pour les serres selon le type et l'année de construction adapté de (American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003).

Type et âge de la serre	Intervalle d'ACH_{50} [h^{-1}]
Nouvelles constructions	
verre ou fibre de verre	0,5 à 1,0
double film de plastique	0,75 à 1,5
Vieilles constructions	
verre, bon entretien	1,0 à 2,0
verre, mauvais entretien	2,0 à 4,0

La diminution du taux d'infiltration dans les serres permet une réduction significative des coûts de chauffage. Cependant, ceci peut être réalisé au détriment des cultures, soit une conséquence non négligeable à prendre en considération. En effet, des taux d'échange d'air très faibles peuvent entraîner des taux d'humidité anormalement élevés autant le jour que la nuit. La corrélation entre le taux d'humidité et l'impact sur les plantes n'est pas encore parfaitement démontré, contrairement à celle avec la lumière, la température et le dioxyde de carbone (Walker & Cotter, 1968). En effet, il peut être difficile de mesurer et contrôler l'humidité dans de grands espaces et de relier les mesures d'humidité aux taux de transpiration des cultures (Cotter & Seay, 1961). Néanmoins, un après-midi au-dessus de 95% d'humidité relative peut tuer ou endommager une récolte entière. D'ailleurs, même lorsque les cultures produisent à des niveaux d'humidité élevés sans aucun dommage, leur taux de production est beaucoup plus bas que dans un environnement contrôlé. Pour éviter des niveaux d'humidité trop élevés, la ventilation et le chauffage restent souvent les seules solutions, mais ceci peut donc annuler les gains obtenus par la réduction d'infiltration. Les systèmes traditionnels de chauffage et de ventilation génèrent une utilisation de l'énergie inefficace et coûteuse, en particulier en hiver dans les régions froides du monde. En réponse à ce problème, l'étude de D.R. Rousse et al. propose un prototype d'échangeur de chaleur multitubes à air spécialement conçu et construit pour répondre aux exigences des serres dans un climat froid (Rousse, Martinb, Thériault, Léveillée, & Boily, 1999).

Les fuites d'air peuvent représenter 20% de la charge de chauffage pour les serres chauffées (Takakura et Okada, 1972) et environ 50% de l'approvisionnement en dioxyde de carbone (CO_2) pour les serres enrichies en CO_2 (Kuroyanagi et al., 2014). De plus, les fuites d'air sont un facteur

affectant l'équilibre de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la serre (Reichrath et Davies, 2002) provoquant ainsi un moment de flexion et une force de cisaillement sur la structure. Par conséquent, il est essentiel d'évaluer quantitativement les fuites d'air de la serre non seulement pour estimer les coûts variables des serres chauffées et enrichies en CO_2, mais également pour s'assurer de réaliser une conception adéquate en termes de résistance de la structure. Les informations disponibles sur les fuites d'air de serre sont principalement basées sur l'expérimentation sur le terrain. Plusieurs mesures expérimentales du taux de fuite sur les serres ont été réalisées en utilisant soit la technique du gaz traceur, soit l'équation du bilan d'énergie (Van de Voorent et Udink, 1985; Fern andez et Bailey, 1992; Baptista et al., 1999; Kuroyanagi et al., 2014). Les résultats expérimentaux indiquent que le taux de fuite en serre corrèle de manière significative avec la vitesse du vent tandis que sa corrélation avec la différence de température intérieure et extérieure est moins marquée. De plus, les informations concernant sa corrélation avec la différence de pression intérieure et extérieure sont limitées. En effet, peu d'études associent la pression exercée par le vent avec les phénomènes de fuite d'air de serre (Kuroyanagi, 2017).

Le Tableau C.6.7 résume les résultats de différentes études concernant le NLR_{75} dans les serres. Les serres présentent des taux de fuite considérables quant aux normes de bâtiments commerciaux et institutionnels. Dû au faible nombre de données et à la disparité des résultats, le taux d'infiltration moyen pondéré n'est pas pertinent. Toutefois, il est possible de comparer les moyennes présentées au taux d'infiltration moyen pondéré de 1,44 L/s-m² pour les bâtiments d'éducation.

Tableau C.6.7. Résumé des données de NLR_{75} des serres provenant de différentes études.

Études	Description des bâtiments	NLR_{75} [L/s-m^2]	
		Intervalle	Moyenne
1) **(RRC-SITRG, 2015)** Tests de dépressurisation seulement	2 serres, une conventionnelle et l'autre solaire passive, âgées de 2-3 ans Winnipeg, Manitoba, Canada	2,88 à 2,94	2,91
2) **(Kuroyanagi, 2017)** Tests expérimentaux et simulations CFD	Serre légère en plastique orientée parallèlement au vent Shikoku, Japon	0,22 à 0,46	0,33

Dû au faible nombre de données et à la disparité des résultats, le taux d'infiltration moyen pondéré n'est pas pertinent. Toutefois, il est possible de comparer les moyennes présentées au taux d'infiltration moyen pondéré de 1,44 L/s-m² pour les bâtiments d'éducation.

Étude 1

Deux serres, situées sur le campus RRC, ont été conçues et utilisées de ce groupe de recherche sur la technologie des infrastructures durables. L'une, de conception conventionnelle, était de forme symétrique avec des quantités égales de vitrage sur les côtés nord et sud alors que l'autre, de conception solaire passive, était de forme non symétrique avec un mur nord isolé et plus de vitrage au sud. Les deux étaient composées d'un simple vitrage et construites sur des dalles de béton sur sol. Ce dernier point est important, car certaines serres utilisent un sol en terre qui tend à augmenter les fuites d'air. À noter que, contrairement à certaines serres commerciales, celles-ci étaient très bien entretenues, ce qui les aidait à préserver leur étanchéité initiale.

Il est intéressant de remarquer que, bien que les deux structures soient bien distinctes en termes de conception énergétique, les résultats de mesures d'infiltration sont semblables. Effectivement, leur différence de NLR_{75} varie de seulement 2%. Puisqu'une serre est une structure composée en grande partie de vitrage dont les joints ne peuvent pas être scellés aussi facilement qu'avec d'autres matériaux, il n'est pas étonnant que les deux serres fussent parmi les bâtiments les moins étanches de l'échantillon total de 26 bâtiments de l'étude. Ceci signifie également qu'il y a une plus grande place à l'amélioration de l'étanchéité à l'air dans ce type de structure, si toutefois, l'impact qui peut en résulter sur l'humidité, tel qu'énoncé précédemment, est bien géré.

Étude 2

L'étude comporte des expériences sur le terrain qui permettent de mesurer le profil du vent et le taux de fuites d'air associé ainsi que de valider les résultats de la simulation obtenus par la méthode de la mécanique des fluides numérique (CFD : *computational fluid dynamics*). Les mesures de fuite ont été effectuées dans deux serres légères en plastique, voûtées, à travée simple et construites selon les mêmes spécifications et dimensions, soit une surface au sol de 6 m par 14 m ; une hauteur du toit de 2,0 m ; une hauteur de la crête de 3,5 m ; un volume de serre de 254 m^3 ; des rideaux thermiques ; un chauffage à air pulsé en fonction lorsque la température intérieure de la serre est sous 12 °C. Les deux serres, l'une s'étendant dans la direction nord-sud (serre NS), et l'autre

s'étendant dans la direction est-ouest (serre EW), sont situées à la station de recherche de Shikoku, NARO Western Region Agricultural Research Center, au Japon. Pour l'analyse des données, seuls les moments où le vent soufflait principalement des directions ouest-sud-ouest à ouest-nord-ouest ont été utilisés.

D'après l'étude de (Kuroyanagi, 2017), le taux d'infiltration mesuré en terme de ACH_{50} est fonction de la vitesse du vent et de l'orientation du bâtiment. Les résultats démontrent qu'une serre dont les plus grandes façades sont orientées principalement parallèlement au vent (serre EW) a une infiltration deux fois plus importante qu'une serre dont les plus grandes façades sont orientées principalement perpendiculairement au vent (serre NS). Toutefois, ce constat n'est pas valable si un traitement d'étanchéité est réalisé. Ainsi, l'équation de régression linéaire du ACH_{50} [h^{-1}] en fonction de la vitesse du vent la plus critique, c'est-à-dire pour une serre s'étendant parallèlement au vent sans traitement d'étanchéité est donnée par :

$$ACH_{50} = 0{,}202.v + 0{,}069 \tag{C.2}$$

Avec v la vitesse du vent. Connaissant les dimensions des serres de l'étude et les données de vitesse locale du vent, il est possible d'appliquer cette équation critique du taux d'infiltration développée par Takeshi Kuroyanagi en fonction des valeurs minimale, maximale et moyenne de la vitesse locale du vent. Le taux d'infiltration moyen et son intervalle de valeurs en termes de NLR_{75} est obtenu par conversion d'après l'Éq. (C.1) et d'après l'outil de simulation de l'essai d'infiltrométrie (voir Annexe D). Les valeurs de NLR_{75} calculées sont inférieures à celles de l'étude de RRC-SITRG. Le taux de fuite moyen est près de 90% inférieur à la première étude comparable. L'écart des résultats entre l'étude canadienne, réalisée en climat subarctique, et l'étude japonaise, réalisée en climat subtropical humide, doit prendre en considération les différences quant au type de serre utilisée et quant à l'emplacement de celle-ci lors des tests.

ANNEXE D TABLEAUX ASHRAE UTILISÉS POUR L'OUTIL DE CALCUL DÉVELOPPÉ

Table 21 RTS Representative Zone Construction for Tables 19 and 20

Construction Class	Exterior Wall	Roof/Ceiling	Partitions	Floor	Furnishings
Light	Steel siding, 2 in. insulation, air space, 3/4 in. gyp.	4 in. LW concrete, ceiling air space, acoustic tile	3/4 in. gyp., air space, 3/4 in. gyp.	Acoustic tile, ceiling air space, 4 in. LW concrete	1 in. wood @ 50% of floor area
Medium	4 in. face brick, 2 in. insulation, air space, 3/4 in. gyp.	4 in. HW concrete, ceiling air space, acoustic tile	3/4 in. gyp., air space, 3/4 in. gyp.	Acoustic tile, ceiling air space, 4 in. HW concrete	1 in. wood @ 50% of floor area
Heavy	4 in. face brick, 8 in. HW concrete air space, 2 in. insulation, 3/4 in. gyp.	8 in. HW concrete, ceiling air space, acoustic tile	3/4 in. gyp., 8 in. HW concrete block, 3/4 in. gyp.	Acoustic tile, ceiling air space, 8 in. HW concrete	1 in. wood @ 50% of floor area

Figure D.6.13 Type de construction selon la masse thermique dans la paroi et selon la présence d'ameublement, tiré de (ASHRAE, 2017).

MONTREAL MCTAVISH, QC, CANADA (WMO: 716120)

Lat:45.510N Long:73.58W Elev:73 StdP: 100.46 Time zone:-5.00 Period:93-14 WBAN:99999

Annual Heating and Humidification Design Conditions

Coldest Month	Heating DB		Humidification DP/MCDB and HR						Coldest month WS/MCDB				MCWS/PCWD to 99.6% DB	
			99.6%			99%			0.4%		1%			
	99.6%	99%	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	WS	MCDB	WS	MCDB	MCWS	PCWD
1	-22.0	-19.2	-28.7	0.3	-21.0	-26.0	0.4	-18.6	5.5	-9.0	5.2	-9.0	2.1	270

Annual Cooling, Dehumidification, and Enthalpy Design Conditions

Hottest Month	Hottest Month DB Range	Cooling DB/MCWB						Evaporation WB/MCDB						MCWS/PCWD to 0.4% DB	
		0.4%		1%		2%		0.4%		1%		2%			
		DB	MCWB	DB	MCWB	DB	MCWB	WB	MCDB	WB	MCDB	WB	MCDB	MCWS	PCWD
7	8.0	30.1	21.9	28.6	20.9	27.2	20.1	23.3	28.2	22.2	26.6	21.4	25.5	2.1	190

Dehumidification DP/MCDB and HR									Enthalpy/MCDB						Extreme Max WB
0.4%			1%			2%			0.4%		1%		2%		
DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	DP	HR	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	Enth	MCDB	
21.6	16.4	26.1	20.7	15.5	25.1	19.8	14.6	24.1	69.7	28.3	65.8	26.6	62.5	25.5	28.2

Extreme Annual Design Conditions

Extreme Annual WS				Extreme Annual Temperature				n-Year Return Period Values of Extreme Temperature							
				Mean		Standard deviation		n=5 years		n=10 years		n=20 years		n=50 years	
1%	2.5%	5%		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
5.0	4.4	3.9	DB	-24.2	32.8	2.9	1.3	-26.3	33.7	-28.0	34.5	-29.6	35.2	-31.7	36.1
			WB	-24.9	25.3	3.0	1.1	-27.1	26.2	-28.8	26.8	-30.5	27.5	-32.7	28.3

Monthly Climatic Design Conditions

			Annual	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperatures, Degree-Days and Degree-Hours	DBAvg		7.8	-8.0	-6.6	-0.8	6.9	14.1	19.4	21.8	21.0	16.5	9.6	3.0	-4.1
	DBStd		11.51	6.83	5.88	5.81	4.70	4.21	3.73	2.74	2.93	3.91	4.37	4.74	5.80
	HDD10.0		2198	558	466	338	116	9	0	0	0	2	62	213	436
	HDD18.3		4146	816	699	594	344	144	32	4	9	79	272	458	694
	CDD10.0		1399	0	0	2	22	137	281	366	340	197	49	4	0
	CDD18.3		304	0	0	0	1	12	63	111	91	25	2	0	0
	CDH23.3		1833	0	0	1	9	92	416	672	504	136	4	0	0
	CDH26.7		409	0	0	0	1	18	101	152	107	29	0	0	0
Wind	WSAvg		1.9	2.1	2.0	2.1	2.2	2.0	1.8	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9
Precipitation	PrecAvg		1095	73	74	81	80	82	93	101	105	95	85	101	108
	PrecMax		1379	142	181	137	164	164	151	193	205	190	145	234	203
	PrecMin		888	19	23	20	24	16	21	41	31	22	20	40	48
	PrecStd		134	31	40	33	29	38	36	39	45	41	32	37	42
Monthly Design Dry Bulb and Mean Coincident Wet Bulb Temperatures	0.4%	DB		9.5	8.0	17.8	24.6	29.0	31.7	31.9	31.5	30.1	23.6	16.7	10.7
		MCWB		8.5	5.4	13.1	15.8	19.1	23.0	23.8	22.7	21.6	17.2	13.8	9.2
	2%	DB		6.3	5.2	11.9	19.7	25.8	29.3	29.9	29.2	26.8	20.6	14.0	7.3
		MCWB		5.2	3.3	7.5	11.8	16.6	21.3	22.1	21.2	20.1	15.5	11.5	5.8
	5%	DB		3.7	3.4	8.7	16.8	23.4	27.6	28.4	27.7	24.5	18.1	11.8	5.1
		MCWB		2.5	1.7	5.0	10.2	15.4	20.1	21.2	20.6	18.8	13.9	9.3	3.6
	10%	DB		1.5	1.7	6.7	14.1	21.1	25.7	26.9	26.2	22.7	15.9	9.7	3.3
		MCWB		0.2	0.3	3.6	8.3	14.4	18.7	20.1	19.8	17.9	12.4	7.2	1.9
Monthly Design Wet Bulb and Mean Coincident Dry Bulb Temperatures	0.4%	WB		8.7	5.9	13.5	16.8	20.6	23.8	25.0	24.2	22.7	18.6	14.5	9.6
		MCDB		9.4	7.8	17.3	22.8	26.4	30.2	30.4	29.3	27.4	22.1	15.8	10.7
	2%	WB		5.2	3.6	7.8	13.5	18.7	22.5	23.6	22.8	21.1	16.1	11.9	6.0
		MCDB		6.1	4.9	10.7	18.1	23.1	28.0	28.2	27.2	25.4	19.7	13.8	7.1
	5%	WB		2.5	1.9	5.6	10.8	17.1	21.2	22.4	21.7	19.8	14.3	9.7	3.8
		MCDB		3.7	3.2	8.3	15.5	21.6	25.7	26.5	25.7	23.6	17.4	11.4	5.0
	10%	WB		0.3	0.5	3.8	8.9	15.5	20.1	21.4	20.8	18.5	12.9	7.4	2.0
		MCDB		1.4	1.7	6.4	13.6	19.7	24.4	25.5	24.7	22.0	15.5	9.4	3.2
Mean Daily Temperature Range		MDBR		6.9	7.1	7.3	8.2	8.8	8.5	8.0	8.1	8.1	6.6	5.8	5.9
	5% DB	MCDBR		8.6	7.6	9.6	12.5	11.5	10.6	9.3	9.4	10.0	9.6	8.8	7.6
		MCWBR		8.6	6.8	7.0	7.8	6.3	5.7	4.9	4.7	5.6	6.1	7.7	7.3
	5% WB	MCDBR		8.6	7.6	9.2	11.6	9.8	9.4	8.3	8.6	9.1	8.7	8.6	7.4
		MCWBR		8.7	7.1	7.6	8.2	6.5	5.8	5.2	5.0	5.6	6.1	7.7	7.3
Clear Sky Solar Irradiance	taub			0.258	0.288	0.331	0.362	0.388	0.439	0.428	0.413	0.373	0.335	0.306	0.292
	taud			2.348	2.256	2.291	2.359	2.345	2.207	2.245	2.282	2.383	2.494	2.489	2.306
	Ebn,noon			861	891	897	897	880	833	837	836	843	834	799	763
	Edn,noon			74	100	113	115	121	140	133	124	103	80	67	71
All-Sky Solar Radiation	RadAvg			1.60	2.74	3.84	4.43	5.09	5.58	5.70	5.06	3.91	2.31	1.41	1.08
	RadStd			0.14	0.28	0.44	0.45	0.46	0.41	0.44	0.27	0.29	0.17	0.20	0.08

Figure D.6.14 Conditions de design pour Montréal, station météorologique de McTavish, tiré de (ASHRAE, 2017).

Table 1A Nomenclature for Tables of Climatic Design Conditions

CDD*n*	Cooling degree-days base n°C, °C-day
CDH*n*	Cooling degree-hours base n°C, °C-hour
DB	Dry-bulb temperature, °C
DBAvg	Average daily dry-bulb temperature, °C
DBSD	Standard deviation of average daily dry-bulb temperature, °C
DP	Dew-point temperature, °C
Ebn,noon	Clear-sky beam normal irradiances at solar noon, W/m^2
Edh,noon	Clear-sky diffuse horizontal irradiance at solar noon, W/m^2
Elev	Elevation, m
Enth	Enthalpy, kJ/kg base 0°C and 101.325 kPa pressure
HDD*n*	Heating degree-days base, n°C, °C-day
HR	Humidity ratio, $g_{moisture}/kg_{dry\ air}$
Lat	Latitude, °N
Long	Longitude, °E
MCDB	Mean coincident dry-bulb temperature, °C
MCDBR	Mean coincident dry-bulb temp. range, °C
MCWB	Mean coincident wet-bulb temperature, °C
MCWBR	Mean coincident wet-bulb temp. range, °C
MCWS	Mean coincident wind speed, m/s
MDBR	Mean dry-bulb temp. range, °C
PCWD	Prevailing coincident wind direction, ° (0 = North; 90 = East)
Period	Years used to calculate the design conditions
PrecAvg	Average precipitation, mm
PrecMax	Maximum precipitation, mm
PrecMin	Minimum precipitation, mm
PrecStd	Standard deviation of precipitation, mm
RadAvg	Monthly mean daily all-sky radiation, $kWh/(m^2 \cdot day)$
RadStd	Standard deviation of monthly mean daily radiation, $kWh/m^2 \cdot day$
StdP	Standard pressure at station elevation, kPa
taub	Clear-sky optical depth for beam irradiance
taud	Clear-sky optical depth for diffuse irradiance
Time Zone	Hours ahead or behind UTC, and time zone code
WB	Wet-bulb temperature, °C
WBAN	Weather Bureau Army Navy number
WMO#	Station identifier from the World Meteorological Organization
WS	Wind speed, m/s
WSAvg	Monthly average wind speed, m/s

Note: Numbers *(1)* to *(45)* and letters *(a)* to *(p)* are row and column references to quickly point to an element in the table. For example, the 5% design wet-bulb temperature for July can be found in row *(31)*, column *(k)*.

Figure D.6.15 Légende pour les conditions de design, tiré de (ASHRAE, 2017).

ANNEXE E PARAMÈTRES LIÉS À L'INFILTRATION POUR L'OUTIL DE CALCUL DÉVELOPPÉ

Terrain Cate-gory	Description	Exponent *a*	Layer Thickness δ, m
1	Large city centers, in which at least 50% of buildings are higher than 25 m, over a distance of at least 0.8 km or 10 times the height of the structure upwind, whichever is greater	0.33	460
2	Urban and suburban areas, wooded areas, or other terrain with numerous closely spaced obstructions having the size of single-family dwellings or larger, over a distance of at least 460 m or 10 times the height of the structure upwind, whichever is greater	0.22	370
3	Open terrain with scattered obstructions having heights generally less than 9 m, including flat open country typical of meteorological station surroundings	0.14	270
4	Flat, unobstructed areas exposed to wind flowing over water for at least 1.6 km, over a distance of 460 m or 10 times the height of the structure inland, whichever is greater	0.10	210

Figure E.6.16 Catégorie de terrain pour la conversion de la vitesse du vent aux conditions locales du calcul de l'infiltration (ASHRAE, 2017).

Table 4 Basic Model Stack Coefficient C_s

	House Height (Stories)		
	One	Two	Three
Stack coefficient	0.000 145	0.000 290	0.000 435

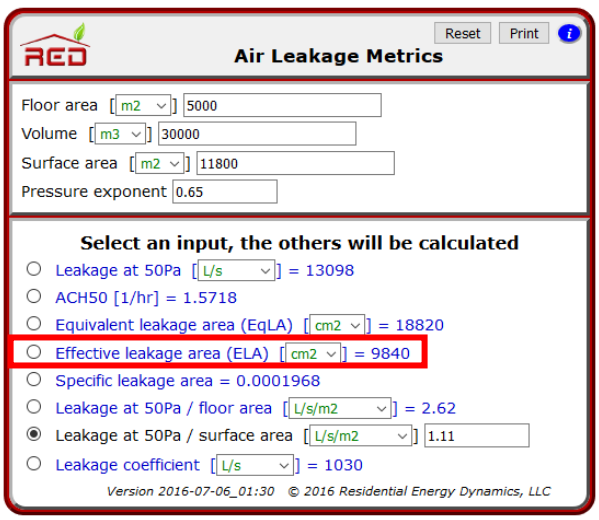
Table 5 Local Shelter Classes

Shelter Class	Description
1	No obstructions or local shielding
2	Typical shelter for an isolated rural house
3	Typical shelter caused by other buildings across street from building under study
4	Typical shelter for urban buildings on larger lots where sheltering obstacles are more than one building height away
5	Typical shelter produced by buildings or other structures immediately adjacent (closer than one house height): e.g., neighboring houses on same side of street, trees, bushes, etc.

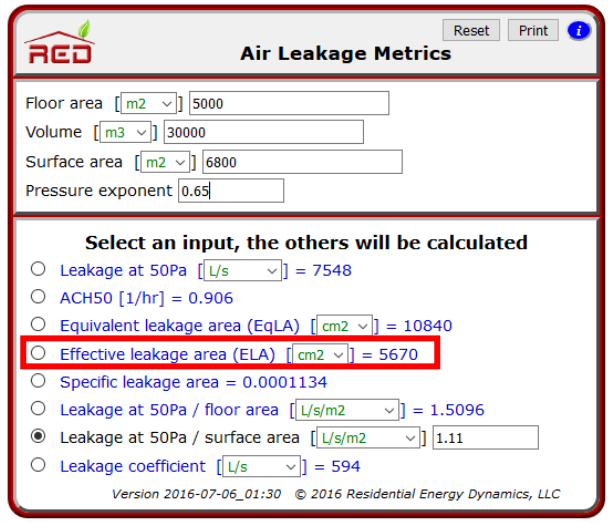
Table 6 Basic Model Wind Coefficient C_w

Shelter Class	House Height (Stories)		
	One	Two	Three
1	0.000 319	0.000 420	0.000 494
2	0.000 246	0.000 325	0.000 382
3	0.000 174	0.000 231	0.000 271
4	0.000 104	0.000 137	0.000 161
5	0.000 032	0.000 042	0.000 049

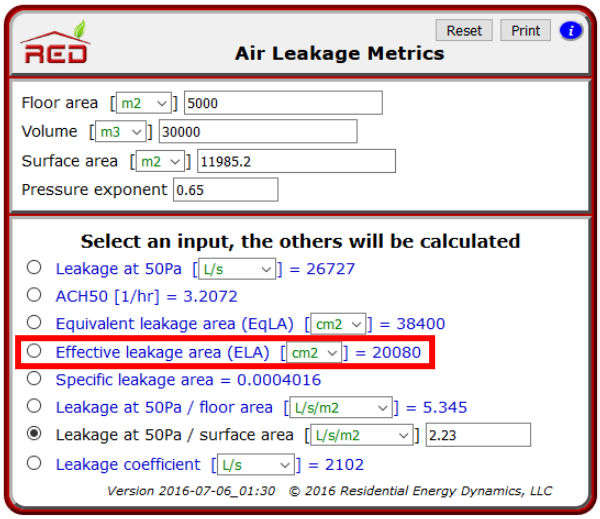
Figure E.6.17 Caractérisation des coefficients C_s et C_w du calcul de l'infiltration (ASHRAE, 2017).



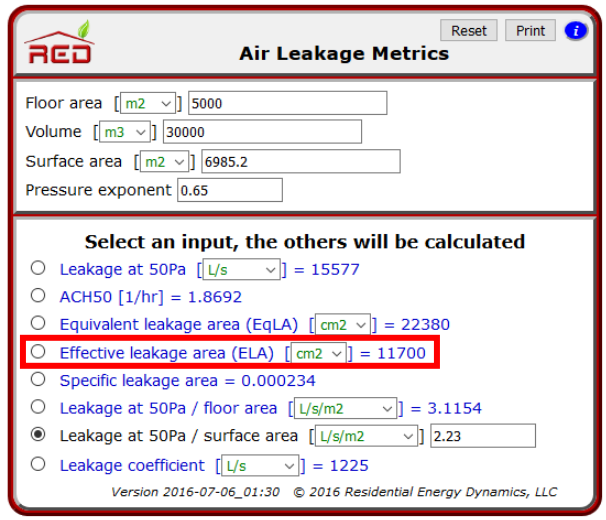
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure E.6.18 Détermination du paramètre ELA_4 par simulation d'essai d'infiltrométrie au moyen du logiciel (Residential Energy Dynamics, 2016) pour : (a) et (b) les cas de bâtiment B1 et B2; et (c) et (d) les cas de serre S1 et S2.