

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVALUATION DES IMPACTS ÉNERGÉTIQUES DE L'INTÉGRATION D'UNE
SERRE URBAINE COMMERCIALE AU TOIT D'UN BÂTIMENT EN CLIMAT
FROID

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
LOUP PHILIPPE LEWIS-GAUTHIER

JUILLET 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

J'aimerais en premier lieu remercier mon directeur de recherche, Éric Duchemin, qui m'a offert la possibilité d'entreprendre ce projet dans le domaine passionnant qu'est l'agriculture urbaine et de m'avoir accompagné tout au long de ce dernier. Les expériences acquises dans les dernières années m'ont permis de grandement me développer dans les sphères académique et personnelle. J'ai aujourd'hui un regard plus critique sur les enjeux sociaux et environnementaux associés au secteur de l'agriculture.

Je tiens aussi à remercier ma co-directrice de recherche, Danielle Monfet. Sa rigueur, sa flexibilité, son efficacité et ses précieux conseils m'ont gardé sur le droit chemin tout au long de mon parcours. Ce projet aurait été beaucoup plus périlleux sans son support.

Je remercie également le Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB) pour son soutien financier qui m'a permis de m'initier au monde de la recherche et de me concentrer sur mes études supérieures.

Finalement, je tiens à saluer mes collègues étudiants et professeurs en sciences de l'environnement. Leur passion et leur volonté de changer le monde ont été une source d'inspiration tout au long de ma maîtrise.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xiii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xvi
RÉSUMÉ	xviii
ABSTRACT.....	xx
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I AGRICULTURE URBAINE COMMERCIALE	7
1.1 Méthodes de production en agriculture urbaine	7
1.1.1 Sur sol (ou indépendante) en environnement non contrôlé	10
1.1.2 Sur sol (ou indépendante) en environnement contrôlé	11
1.1.3 Intégrée au bâtiment en environnement non contrôlé	11
1.1.4 Intégrée au bâtiment en environnement contrôlé	12
1.2 Potentiel de production de l’agriculture urbaine	13
1.2.1 Production à grande échelle.....	13
1.2.2 Potentiel de production pour la ville de Montréal	14
1.3 Viabilité de l’agriculture urbaine commerciale	15
1.3.1 Méthodes et espaces de production propices en agriculture urbaine.....	15
1.3.2 Utilisation optimale de l’espace urbain	17
1.3.3 Impacts environnementaux de l’agriculture urbaine commerciale et mesures de mitigation	18
1.3.4 Principales barrières à la rentabilité financière en agriculture urbaine commerciale.....	19
1.3.5 Potentiel de développement économique de l’agriculture urbaine commerciale au Québec.....	22

1.4 Méthodes répandues d'agriculture urbaine commerciale : potentiel, bénéfices et impacts spécifiques.....	26
1.4.1 Toits végétalisés comestibles.....	26
1.4.2 Agriculture urbaine en environnements contrôlés.....	39
1.4.3 Comparaison entre différentes méthodes d'agriculture urbaine.....	53
1.5 Constats	56
CHAPITRE II CONSIDÉRATIONS ÉNERGÉTIQUES EN SERRICULTURE ET OUTILS DE MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE	59
2.1 Facteurs influençant la consommation énergétique en sericulture	59
2.1.1 Conditions environnementales	59
2.1.2 Caractéristiques du site et de la serre.....	66
2.1.3 Équipements et efficacité énergétique.....	72
2.2 Opportunités de réduction de la consommation énergétique en sericulture par la valorisation de rejets thermiques	78
2.2.1 Récupération de chaleur de l'air évacué et stockage thermique saisonnier en serres fermées	78
2.2.2 Chauffage de serres par cogénération.....	79
2.2.3 Valorisation de rejets thermiques de sources industrielles	80
2.2.4 Récupération de rejets thermiques de sources commerciales : cas particulier des centres de serveurs	85
2.3 Intégration d'espaces de culture et de serres aux bâtiments et outils de modélisation énergétique.....	88
2.4 Constats	93
CHAPITRE III OBJECTIFS ET DÉMARCHE DE RECHERCHE	95
3.1 Problématique et objectifs	95
3.2 Démarche de recherche	96
CHAPITRE IV MÉTHODOLOGIE ET ÉTUDE DE CAS.....	98
4.1 Site à l'étude.....	98
4.2 Échantillonnage et paramètres.....	100
4.3 Modélisation énergétique	101
4.3.1 Description du bâtiment.....	102
4.3.2 Description de la serre	106

4.4 Étude paramétrique comparative: variables et scénarios.....	119
4.5 Analyse de performances des scénarios	121
CHAPITRE V RÉSULTATS ET ANALYSE	124
5.1 Analyse de l'éclairage: impact du matériau de recouvrement sur la lumière reçue et les besoins en éclairage artificiel	124
5.1.1 Impacts des matériaux sur la lumière naturelle reçue.....	124
5.1.2 Impacts des matériaux de recouvrement sur les besoins en éclairage	126
5.1.3 Consommation électrique de l'éclairage artificiel selon le matériau de recouvrement et le type d'appareils d'éclairage	129
5.2 Impacts énergétiques sur la serre.....	131
5.2.1 Consommation énergétique de la serre.....	137
5.2.2 Émissions de GES de la serre	138
5.2.3 Coûts énergétiques de la serre	139
5.2.4 Impacts individuels des paramètres à l'étude sur la serre.....	141
5.3 Impacts énergétiques sur le bâtiment	147
5.3.1 Consommation énergétique du bâtiment	153
5.3.2 Émissions de GES du bâtiment	154
5.3.3 Coûts énergétiques du bâtiment.....	154
5.3.4 Impacts de l'intégration de la serre au bâtiment et du niveau d'isolation du toit du bâtiment.....	155
CHAPITRE VI DISCUSSION	160
6.1 Interprétation des résultats.....	160
6.1.1 Bénéfices et impacts de l'intégration de la serre au toit du bâtiment	160
6.1.2 Choix de conception pour une efficacité énergétique accrue	162
6.1.3 Source d'énergie de chauffage : facteur environnemental décisif.....	164
6.2 Limites de l'étude et potentielles améliorations à la modélisation.....	165
6.3 Perspectives de développement de la serriculture urbaine en climats froids	166
CONCLUSION.....	169
ANNEXE A PARAMÈTRES DE MODÉLISATION DU BÂTIMENT	171
ANNEXE B PARAMÈTRES DE MODÉLISATION DE LA SERRE	174

ANNEXE C TARIFS ÉNERGÉTIQUES	179
ANNEXE D ANALYSE DE LA QUANTITÉ DE LUMIÈRE NATURELLE REÇUE ET DES BESOINS EN ÉCLAIRAGE DE LA SERRE	180
ANNEXE E RÉSULTATS DES SIMULATIONS ÉNERGÉTIQUES – SOMMAIRES GRAPHIQUES DES RÉSULTATS	184
ANNEXE F COMPILATION DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS ÉNERGÉTIQUES – SOMMAIRES ANNUELS DÉTAILLÉS	189
ANNEXE G CLASSEMENTS DES SCÉNARIOS EN FONCTION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE, ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ET COÛTS	194
ANNEXE H COMPARAISON ENTRE LES SCÉNARIOS AVEC SERRE CHAUDE ET AVEC SERRE FROIDE DE CARACTÉRISTIQUES ÉQUIVALENTES	219
ANNEXE I IMPACTS DE LA VARIATION DES PARAMÈTRES (COMPARAISON ENTRE SCÉNARIOS DE CARACTÉRISTIQUES ÉQUIVALENTES)	221
BIBLIOGRAPHIE	236

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 De gauche à droite: jardin urbain dans la ville de Columbus aux États-Unis (Kowal, 2021), toit végétalisé comestible de Brooklyn Grange dans la ville de New York aux États-Unis (Bartlett, 2017), serre dans la ville de New Milton au Royaume-Uni (Faherty, 2010), serre sur toit des Fermes Lufa dans la ville de Laval au Canada (Hage, 2013)	10
1.2 Nomenclature de l'agriculture urbaine adaptée de Goldstein <i>et al.</i> (2016b)	10
1.3 Toit végétalisé comestible du Palais des congrès de Montréal (Palais des congrès de Montréal, 2020)	27
1.4 Serre de Ahuntsic des Fermes Lufa à Montréal, première serre sur toit au monde (Fermes Lufa, 2012)	39
1.5 Répartition mondiale des sites de production maraîchère en serre urbaine au sol (à gauche) et sur toit (à droite) répertoriés dans l'étude de Cohen <i>et al.</i> (2021).....	44
2.1 Températures moyennes mensuelles à proximité des villes de Montréal (Québec), Québec (Québec), Vineland (Ontario), Delta (Colombie-Britannique) et De Bilt (Pays-Bas) (RETSscreen, 2021).....	60
2.2 Rayonnement solaire quotidien moyen reçu sur une surface horizontale à proximité des villes de Montréal (Québec), Québec (Québec), Vineland (Ontario), Delta (Colombie-Britannique) et De Bilt (Pays-Bas) (RETSscreen, 2021)	61
2.3 Courbes de sensibilité relative à la lumière de l'œil humain (rouge) et d'une plante typique (vert) (Shelford et Both, 2020).....	65

2.4	Représentation de diverses géométries typiques de serres commerciales individuelles (en haut) et jumelées (en bas) avec une arche de toit droite (à gauche) ou courbée (à droite)	67
2.5	Transmittance de la lumière en fonction de l'angle d'incidence pour une surface en verre (Topcuoglu et Unal, 2019)	72
2.6	Répartition des rejets thermiques industriels du Québec en 2008 par gammes de températures (Niget, 2010)	82
2.7	Répartition des rejets thermiques industriels du Québec en 2008 par secteurs (Niget, 2010)	82
3.1	Schéma résumant la méthodologie	97
4.1	Vue de haut du site à l'étude (Google Earth, s.d.)	99
4.2	Vue de face du site à l'étude (Google Earth, s.d.)	100
4.3	Étapes de modélisation	102
4.4	Modèle 3D du bâtiment (à gauche) et intégration des bâtiments environnants (à droite)	103
4.5	Zones thermiques du bâtiment	105
4.6	Modèle 3D de la serre (à gauche) et intégration de la serre au bâtiment (à droite)	106
4.7	Zones thermiques de la serre	109
4.8	Température sous la dalle de la serre sur sol et à 0,5 m de profondeur	112
4.9	Matrices des scénarios à l'étude	120
5.1	DLI moyen mensuel pour la serre en polycarbonate et en verre	125

5.2	Nombre de jours par mois n'atteignant pas la valeur optimale visée du DLI sans éclairage artificiel selon les cultures et matériaux de recouvrement à l'étude.....	126
5.3	Nombre de jours par mois n'atteignant pas la valeur optimale visée du DLI avec éclairage artificiel selon les cultures et matériaux de recouvrement à l'étude.....	127
5.4	Comparaison des besoins annuels en éclairage artificiel et de l'impact de l'utilisation de l'éclairage artificiel sur l'atteinte du DLI minimal selon les cultures et matériaux de recouvrement de la serre.....	127
5.5	Consommation électrique mensuelle de l'éclairage de la serre chaude selon le matériau de recouvrement et le type d'éclairage	130
5.6	Consommation électrique mensuelle de l'éclairage de la serre froide selon le matériau de recouvrement et le type d'éclairage	130
5.7	Consommation énergétique annuelle par scénario de la serre chaude	134
5.8	Consommation énergétique annuelle par scénario de la serre froide	134
5.9	Émissions de GES annuelles par scénario de la serre chaude	135
5.10	Émissions de GES annuelles par scénario de la serre froide	135
5.11	Coûts énergétiques annuels par scénario de la serre chaude	136
5.12	Coûts énergétiques annuels par scénario de la serre froide	136
5.13	Gammes de réductions observées de la consommation énergétique, des émissions de GES et des coûts énergétiques de la serre chaude par paramètres.....	142
5.14	Gammes de réductions observées de la consommation énergétique, des émissions de GES et des coûts énergétiques de la serre froide par paramètres.....	142

5.15	Consommation énergétique annuelle par scénario du bâtiment avec une serre chaude au toit	150
5.16	Consommation énergétique annuelle par scénario du bâtiment avec une serre froide au toit.....	150
5.17	Émissions de GES annuelles par scénario du bâtiment avec une serre chaude au toit.....	151
5.18	Émissions de GES annuelles par scénario du bâtiment avec une serre froide au toit	151
5.19	Coûts énergétiques annuels par scénario du bâtiment avec une serre chaude au toit	152
5.20	Coûts énergétiques annuels par scénario du bâtiment avec une serre froide au toit	152
5.21	Gammes des réductions observées pour différents paramètres sur la consommation énergétique, les émissions de GES et les coûts du bâtiment	156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Valeurs suggérées de nombre de changements d'air à l'heure par infiltration par types de constructions de serres (ASHRAE, 2011).....	69
2.2 Valeur suggérées de coefficients de transfert thermique globaux par types de matériaux et assemblages (ASHRAE, 2011).....	70
2.3 Facteurs correctifs suggérés de la valeur U d'une serre pour différents types d'ossatures (ASHRAE, 2011)	70
2.4 Répartition des rejets thermiques industriels au Québec en 2008 par régions administratives (Niget, 2010)	83
4.1 Principales caractéristiques géométriques du bâtiment modélisé.....	103
4.2 Principales propriétés de l'enveloppe du bâtiment modélisé	104
4.3 Principales caractéristiques géométriques de la serre modélisée	107
4.4 Principales propriétés de l'enveloppe de la serre modélisée.....	108
4.5 Températures de culture idéales pour certains légumes de serre.....	110
4.6 Températures de consigne par type de culture utilisées pour la modélisation.....	110
4.7 Définition des périodes utilisées pour la modélisation	110
4.8 Intensités des appareils d'éclairage et photopériodes recommandées pour la culture en serre de la tomate et de la laitue.....	115

4.9	Valeurs optimales du DLI pour la culture en serre de la tomate et de la laitue	115
4.10	Consignes d'éclairage et principaux paramètres des appareils d'éclairage utilisés pour la modélisation par type de culture	117
4.11	Nomenclature utilisée pour la définition des scénarios	120
4.12	Efficacité des appareils de chauffage et facteurs de conversion d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre utilisées pour l'étude.....	123
4.13	Tarifs énergétiques utilisés pour l'étude (avant taxes).....	123
5.1	Performances annuelles de la serre chaude	132
5.2	Performances annuelles de la serre froide	133
5.3	Consommation énergétique des scénarios de référence de la serre pour différentes températures moyennes mensuelles sous la dalle.....	144
5.4	Résumé des performances annuelles du bâtiment avec une serre chaude intégrée au toit	148
5.5	Résumé des performances annuelles du bâtiment avec une serre froide intégrée au toit	149
5.6	Températures moyennes annuelles des zones thermiques du dernier étage du bâtiment	158
5.7	Moyennes d'heures annuelles où la température est égale ou supérieure à 26°C dans les zones thermiques du dernier étage du bâtiment.....	158

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

3D	3 dimensions
ACV	Analyse du cycle de vie
AIE	Agriculture intégrée au bâtiment
ASAE	American Society of Agricultural Engineers
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AU	Agriculture urbaine
AUC	Agriculture urbaine commerciale
AU/LAB	Laboratoire sur l'agriculture urbaine
AV	Agriculture verticale
CAH	Changements d'air à l'heure
CCQ	Commission de la construction du Québec
CNB	Code National du Bâtiment
CNBA	Code National du Bâtiment Agricole
CO ₂	Dioxyde de carbone
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers

CRETAU	Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement de l'air
DEL	Diode électroluminescente
DLI	Daily Light Integral
DTV	Déficit de tension de vapeur
FAO	Food and Agriculture Organization
GES	Gaz à effet de serre
HR	Humidité relative
HPS	High-Pressure Sodium
IMP	Système impérial d'unités
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques du Québec
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec
OMAFRA	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs of Ontario
OS	OpenStudio

PAR	Photosynthetic active radiation
PIB	Produit intérieur brut
PPF	Photosynthetic photon flux
PPFD	Photosynthetic photon flux density
PRI	Période de retour sur l'investissement
RBQ	Régie du bâtiment du Québec
SI	Système international d'unités
SPSQ	Syndicat des Producteurs en Serre du Québec
ST	Serre sur toit
TV	Toit végétalisé
UPA	Union des Producteurs Agricoles du Québec
UN	United Nations
WHO	World Health Organization

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

CO ₂ éq	Dioxyde de carbone équivalent
G	Giga (10 ⁹)
g	Gramme
Ha	Hectare
J	Joule
K	Kelvin
K	Kilo (10 ³)
kg	Kilogramme
kWh	Kilowattheure
L	Litre
lm	Lumen
lux	Lux
M	Méga ou million (10 ⁶)
m	Mètre
m ²	Mètre carré

m ³	Mètre cube
mol	Mole
MWh	Mégawattheure
n	Nano (10 ⁻⁹)
pcm	Pied cube par minute
pi	Pied
pi ²	Pied carré
pi ³	Pied cube
s	Seconde
T	Téra (10 ¹²)
T	Tonne métrique
TWh	Térawattheure
W	Watt
μ	Micro (10 ⁻⁶)
\$ (USD)	Dollars américains
\$ (CAD)	Dollars canadiens
°C	Degré Celsius
°F	Degré Fahrenheit

RÉSUMÉ

L'agriculture urbaine est pratiquée sous diverses formes et offre une multitude de bénéfices sociaux et environnementaux aux villes. La culture en serre est une méthode de production éprouvée et bien adaptée à l'agriculture urbaine effectuée dans une optique commerciale, car elle permet de cultiver de manière intensive des fruits et légumes toute l'année. En climats froids, comme dans la province de Québec, la serriculture est cependant particulièrement énergivore, étant donné les besoins en chauffage et en éclairage accrus. Il existe cependant plusieurs stratégies pouvant améliorer l'efficacité énergétique des serres. Par exemple, certaines expérimentations effectuées en climats tempérés ont montré que leur intégration aux toits de bâtiments peut mener à des impacts favorables, tant pour la serre que pour le bâtiment hôte. Il semble ainsi pertinent de se demander dans quelle mesure de telles dispositions peuvent améliorer les performances énergétiques de serres urbaines en climats froids?

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer, sous forme d'étude paramétrique, les impacts énergétiques de l'intégration d'une serre au toit d'un bâtiment dans un climat froid, ainsi que de certains choix de conception techniques pour différentes pratiques culturales. Pour se faire, un bâtiment commercial existant et une serre hypothétique d'environ 3000 m² ont été modélisés à l'aide des logiciels SketchUp et OpenStudio. La modélisation a permis de simuler les performances énergétiques de différents scénarios, associés à la modification de certains paramètres, afin d'estimer l'influence de l'implantation de la serre au bâtiment pour différents niveaux d'isolation du toit, mais aussi de différents matériaux de recouvrement de la serre, types d'appareils d'éclairage artificiel et sources d'énergie de chauffage. Les simulations ont été effectuées pour des conditions associées à deux types de légumes cultivés, la tomate et la laitue, afin d'établir si différentes conditions de culture peuvent impacter les conclusions. Finalement, les coûts énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre des scénarios ont également été quantifiés et comparés.

Les résultats montrent des différences significatives entre les divers scénarios étudiés. Pour la culture de la tomate, les variations observées par rapport au scénario de référence, respectivement pour la consommation énergétique, les émissions de gaz à effet de serre et les coûts, sont de -31 % à 17 %, -99 % à 45 % et -24 % à 25 %, alors que pour celle de la laitue, elles sont de -29 % à 20 %, -99 % à 28 % et -15 % à 36 %. Dans le contexte étudié, l'implantation d'une serre au toit permet une diminution de sa

consommation énergétique de 6 % à 11 % pour la culture de la tomate et de 7 % à 11 % pour celle de la laitue, lorsque comparée à une serre de caractéristiques équivalentes située au sol. Dans le cas du bâtiment, des réductions de la consommation énergétique de l'ordre de 1 % à 14 % sont observées, les bénéfices étant largement supérieurs lorsque le niveau d'isolation du toit est faible. Les résultats démontrent également que le matériau de recouvrement (verre à simple paroi ou polycarbonate à double paroi), le type d'appareils d'éclairage artificiel utilisé (HPS ou DEL) et la source d'énergie de chauffage (gaz naturel ou électricité) ont des impacts non négligeables sur le profil énergétique de la serre, de même que sur les émissions de gaz à effet de serre et les coûts d'exploitation qui en découlent. Finalement, bien que certaines mesures étudiées permettent de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre d'une serre chauffée au gaz naturel, le chauffage avec de l'électricité de source renouvelable est une solution offrant des performances environnementales grandement supérieures, bien qu'il en résulte une augmentation des coûts d'exploitation.

Bien que limités à l'étude d'un cas spécifique, ces résultats fournissent des indicateurs permettant d'identifier des scénarios particulièrement prometteurs pour Montréal et d'autres villes en climats froids visant à gagner en autosuffisance alimentaire. Ils peuvent servir à mieux orienter décideurs et entrepreneurs quant à la pertinence écologique et financière de certaines mesures d'efficacité énergétique, de même qu'à aider à la création de meilleures politiques encourageant le développement de projets commerciaux d'agriculture urbaine.

Mots clés : agriculture, bâtiments, changements climatiques, énergies renouvelables, gaz à effet de serre, modélisation énergétique, Montréal, serres, symbiose urbaine, toits, transition écologique.

ABSTRACT

Urban agriculture is practiced in various forms and provides many social and environmental benefits to cities. Greenhouse cultivation is an efficient production method that is especially well suited to commercial urban agriculture, as it allows for the intensive cultivation of fruits and vegetables all year round. In cold climates, such as in the province of Quebec, greenhouse cultivation is particularly energy intensive, given the increased heating and lighting requirements. However, there are several strategies that can improve the energy efficiency of greenhouses. For example, some experiments conducted in temperate climates have shown that their integration to the roofs of buildings can result in favorable impacts, both for the greenhouse and the host building. It therefore seems relevant to ask to what extent such measures can improve the performance of urban greenhouses in cold climates?

The objective of this thesis is to assess, in the form of a parametric study, the energy impacts of integrating a greenhouse to the roof of a building in cold climates, as well as certain technical design choices for different agricultural practices. To do so, an existing commercial building and a hypothetical greenhouse of approximately 3000 m² were modeled using numerical tools, in this case SketchUp and OpenStudio softwares. The model simulates the energy performance of different scenarios, associated with the modification of some parameters, to estimate the influence of the integration of the greenhouse on the building for various levels of roof insulation, but also of different greenhouse covering materials, types of artificial lighting and sources of heating energy. Simulations were completed for conditions associated with two types of cultivated vegetables, tomato and lettuce, to establish whether different growing conditions can influence the conclusions. Furthermore, the greenhouse gas emissions and energy costs of the studied scenarios were also quantified and compared.

The results showed significant differences between the various scenarios studied. In the case of tomato cultivation, the variations observed compared to the reference scenario, respectively for energy consumption, greenhouse gas emissions and costs, are from -31 % to 17 %, -99 % to 45 % and -24 % to 25 %, while in the case of lettuce cultivation, the variations are -29 % to 20 %, -99 % to 28 % and -15 % to 36 %. In the context under study, the installation of a greenhouse on the roof leads to a reduction in energy use, when compared to a greenhouse with equivalent characteristics located on the ground, of 6 % to 11 % for the cultivation of tomatoes and 7 % to 11 % for the cultivation of lettuces. For the host building, reduction of energy use of 1 % to 14 %

were observed, the benefits being much greater when the roof insulation level is low. The results also showed that the covering material (single layer glass or double layer polycarbonate), the type of artificial lighting used (HPS or LED) and the source of heating energy (natural gas or electricity) have significant impacts on the energy profile, greenhouse gas emissions and operation costs of the greenhouse. Finally, although some of the measures studied can significantly reduce the greenhouse gas emissions of a greenhouse heated with natural gas, heating with electricity from renewable sources is a solution offering much better environmental performances, although it results in an increase in operation costs.

Although this study is limited to a specific case, its results provide performance indicators that make it possible to identify particularly promising scenarios for Montreal and other cold climates cities aiming to achieve food self-sufficiency. The results can be used to better inform decision-makers and entrepreneurs as to the ecological and financial relevance of certain energy-efficiency measures and help to create better public policies encouraging the development of commercial urban agriculture projects.

Keywords : agriculture, buildings, climate changes, renewable energies, greenhouse gas, energy modeling, Montreal; greenhouses, urban symbiosis, rooftops, ecological transition.

INTRODUCTION

De nos jours, les agglomérations urbaines abritent environ la moitié de la population planétaire, proportion qui devrait dépasser les deux-tiers en 2050. Les villes sont aujourd'hui responsables de 60 % à 80 % de la consommation énergétique mondiale et génèrent approximativement 70 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) (UN-Habitat, 2016). De cette croissance démographique découle une pression grandissante sur la chaîne agroalimentaire mondiale et d'importants impacts environnementaux associés qui ne peuvent être ignorés. En effet, le secteur agroalimentaire est responsable d'environ le quart de ces émissions, en plus d'impacter grandement la biodiversité planétaire, de contribuer à la désertification des terres, de causer diverses formes de pollutions atmosphériques et hydriques et d'utiliser plus de terres émergées et d'eau douce que tout autre secteur d'activités (FAO, 2017; Poore et Nemecek, 2018; Shukla *et al.*, 2019). En outre, l'ensemble de la chaîne agroalimentaire est responsable de plus de 30 % de la demande énergétique mondiale, dont moins du tiers seulement est associée à la production à la ferme (FAO, 2016; Sims *et al.*, 2015). De plus, plusieurs centaines de millions de personnes, soit plus du quart de la population mondiale, n'auraient actuellement pas accès en quantité suffisante à de l'énergie, de la nourriture et/ou de l'eau potable, situation qui devrait empirer au cours des prochaines années avec la croissance démographique et les changements climatiques (Daly et Walton, 2017; FAO *et al.*, 2017; WHO et UNICEF, 2017). Finalement, une baisse des rendements de production dans plusieurs endroits du globe au cours des prochaines décennies, associée aux changements climatiques, accentuera la problématique (FAO *et al.*, 2017). Il y avait d'ailleurs, en 2016, plus de 815 millions

de personnes sous-alimentées à travers le monde, une augmentation de 38 millions de personnes en comparaison à l'année précédente (FAO *et al.*, 2017).

Face à ces constats, plusieurs se questionnent désormais quant à l'efficacité et à la durabilité du système agroalimentaire actuel. Certains producteurs tentent aujourd'hui de se tourner vers des méthodes de production alternatives et plus durables, alors que d'autres proposent de repenser les espaces urbains et périurbains grâce à l'agriculture urbaine (AU). Cette dernière aide depuis longtemps plusieurs villes de pays en développement à répondre à une partie de leur demande alimentaire et est aujourd'hui exercée par plus de 800 millions de personnes à travers le monde, assurant la subsistance de près du quart d'entre eux (Smit *et al.*, 2001). La réapparition de ces pratiques est néanmoins plus récente en Amérique du Nord. En effet, au cours du 20^e siècle, dans la foulée de la révolution verte et de plusieurs mouvements sociaux ou d'urbanisme, l'agriculture a largement quitté le paysage des villes au profit du développement urbain (Lee-Smith *et al.*, 2010). Depuis les années 1970, généralement portée par des mouvements sociaux locaux visant la résilience et la sécurité alimentaire, l'AU s'est tranquillement réintégrée dans le paysage de centaines de villes nord-américaines (Duchemin *et al.*, 2008; Hunold *et al.*, 2017; Lee-Smith *et al.*, 2010).

Plusieurs études suggèrent que certaines pratiques en AU pourraient être pertinentes d'un point de vue environnemental, étant donné les distances de transport de distribution réduites, le fort potentiel symbiotique avec la ville (p. ex. l'optimisation et la valorisation des flux énergétiques et des matières résiduelles, la valorisation des eaux de pluie et eaux grises, etc.) et d'autres bénéfices externes (p. ex. la séquestration de carbone et d'azote, la réduction de l'utilisation des terres et de la déforestation, etc.) (Clinton *et al.*, 2018; Goldstein *et al.*, 2016b; Specht *et al.*, 2014). Bien qu'il semble y avoir consensus dans la communauté scientifique sur les potentiels bénéfices sociaux et écologiques qu'offrent l'AU, il subsiste toutefois plusieurs questionnements quant à

la viabilité environnementale et économique de l'implantation de projets commerciaux, plus particulièrement dans un climat froid, comme celui de Montréal.

Dans un même ordre d'idées, face à l'urgence climatique, plusieurs gouvernements à travers le monde se sont engagés, avec l'Accord de Paris, à réduire drastiquement leurs émissions de GES. Le gouvernement du Canada a pour objectifs de réduire ses émissions sous les niveaux de 2005 de 30 % d'ici 2030 et d'atteindre zéro émission nette d'ici 2050 (Gouvernement du Canada, 2020). Le gouvernement du Québec a, quant à lui, pour objectifs de réduire ses émissions sous les niveaux de 1990 de 37,5 %, d'ici 2030 et de 80 % à 95 % d'ici 2050 (MELCC, 2020b). Plusieurs villes à travers le monde affichent également aujourd'hui le désir de participer aux efforts de lutte aux changements climatiques, notamment la Ville de Montréal, qui s'est récemment fixée pour objectif l'atteinte de la carboneutralité d'ici le milieu du siècle par la mise en place de mesures concrètes encourageant une transition écologique. L'administration municipale actuelle propose, entre autres, l'adoption de règlements et politiques visant un parc immobilier carboneutre d'ici 2050 (Ville de Montréal, 2018), ainsi qu'une meilleure accessibilité pour la population à des aliments frais, sains et produits de manière durable (Ville de Montréal, 2018). Il est à rappeler que les secteurs du bâtiment et de l'industrie agroalimentaire représentent, chacun d'eux, environ 30 % de la consommation énergétique mondiale (FAO, 2016; Fumo, 2014). De plus, en 2017, les secteurs du bâtiment et de l'agriculture étaient respectivement responsables de 12 % et 11 % des émissions de GES au Canada (Gouvernement du Canada, 2019) et de 10,8 % et 9,6 % de celles du Québec (MELCC, 2018).

Par ailleurs, Montréal se démarque déjà par ses nombreuses initiatives en agriculture urbaine (AU). En effet, il y existe depuis les années 1970 une multitude de projets de jardins urbains communautaires et collectifs, regroupant plusieurs dizaines d'organismes et des milliers de participants (Duchemin *et al.*, 2008). Depuis plus récemment, Montréal se fait également remarquer au niveau international par

l'effervescence de projets commerciaux d'AU qui y prennent place, dont certains se démarquent en termes d'envergure et d'originalité. Selon Bernier et Duchemin (2020), plus de 72 projets d'agriculture urbaine commerciale (AUC) étaient recensés en 2019 au Québec, dont environ la moitié prenaient place dans la région métropolitaine de Montréal, alors qu'il y en avait seulement onze en 2010, ce qui témoigne de la croissance exponentielle de cette industrie depuis la dernière décennie. De plus, il est observé que ces exploitations sont très diversifiées en termes de tailles des opérations, de vocations et de méthodes de production. Un des projets qui attire le plus d'attention est celui des Fermes Lufa, qui exploitaient, en 2021, quatre serres commerciales sur des toits de bâtiments dans la région de Montréal (Fermes Lufa, 2020a).

Les récents bouleversements mondiaux liés à la pandémie mondiale de COVID-19 nous ont rappelé l'importance de l'atteinte d'une certaine autosuffisance alimentaire, tant au niveau national que local. Selon le MAPAQ (2020a), bien que le Québec ait la capacité de s'autoapprovisionner pour plusieurs types de denrées alimentaires, comme la viande et les produits laitiers, son volume de production dépassant celui de ses importations, ce n'est pas encore le cas pour les fruits et les légumes. En effet, la province dépend encore fortement de l'importation de fruits et de légumes pendant une partie importante de l'année, étant donné une période de production limitée par des températures hivernales peu propices et ne concordant pas à une demande constante pour ces produits. Par conséquent, en 2018, le Québec a importé l'équivalent de 20 % de son volume de production de légumes, malgré une production de plus de 40 000 tonnes de légumes de serre, témoignant du manque qui est encore à combler pour atteindre une autonomie alimentaire en matière de fruits et de légumes (MAPAQ, 2020a).

Afin de pallier la saisonnalité de l'offre de fruits et de légumes locaux, certaines instances gouvernementales et paragouvernementales se sont d'ailleurs engagées à mettre en place des mesures durables pour favoriser la production locale au Québec,

notamment en encourageant le développement de la filiale serricole par l'entremise de programmes d'appuis financiers (MAPAQ, 2020b) et de tarifications énergétiques plus avantageuses pour les petits producteurs en serre (Hydro-Québec, 2020a), visant à réduire les frais d'exploitation associés à la consommation d'énergie.

Afin de répondre à la demande croissante en aliments sains et locaux, tout en répondant aux objectifs de réduction de GES de la Ville de Montréal et des autres paliers gouvernementaux, il est important d'identifier et de quantifier les diverses opportunités de gains d'efficacité en AU, et ce, dans l'objectif de guider les prises de positions politiques en lien avec l'implantation de projets commerciaux à Montréal et dans les autres villes canadiennes. La présente étude s'intéresse ainsi à diverses opportunités en AUC qui permettraient d'améliorer la rentabilité et les performances énergétiques et environnementales de tels projets. Bien que la revue de littérature se penche sur diverses formes d'AU pratiquées et leurs opportunités d'efficacité énergétique respectives, un cas spécifique d'implantation de serre commerciale sur le toit d'un bâtiment a été étudié, de même que divers paramètres pouvant influencer la consommation énergétique et les émissions de GES d'une telle opération. Les résultats de cette étude peuvent s'avérer être des indicateurs utiles aux potentiels producteurs agricoles urbains, propriétaires et opérateurs de bâtiments et d'industries, de même qu'aux décideurs politiques. Les potentiels producteurs, les propriétaires et opérateurs pourraient se servir des résultats de l'étude pour mieux cerner les diverses possibilités et opportunités relatives à la production agricole en contexte urbain, ainsi que celles en lien avec l'amélioration des performances énergétiques de leurs parcs immobilier et/ou de leurs opérations. Les décideurs pourraient, quant à eux, mieux s'orienter quant au développement de politiques et de programmes de financement relatifs à des objectifs alimentaires et de réduction des émissions de GES.

Le CHAPITRE I de ce mémoire présente une revue de littérature effectuée en lien avec les méthodes de production commerciale les plus couramment pratiquées en AU et

leurs performances environnementales. Le CHAPITRE II traite des différents éléments pouvant influencer la consommation énergétique associée à la production en serre et de l'agriculture intégrée au bâtiment, des diverses opportunités d'efficacité énergétique associées à ces méthodes de production, ainsi que des approches de modélisation énergétique. Le CHAPITRE III présente les objectifs et la démarche de recherche, alors que le CHAPITRE IV présente la méthodologie utilisée pour la modélisation énergétique de différents scénarios intégrant une serre commerciale urbaine. Le CHAPITRE V présente, quant à lui, les résultats obtenus par simulation et le CHAPITRE VI effectue une discussion relative à ces derniers. Finalement, une CONCLUSION est présentée.

CHAPITRE I

AGRICULTURE URBAINE COMMERCIALE

1.1 Méthodes de production en agriculture urbaine

Une étude effectuée par Goldstein *et al.* (2016b) établit que, bien qu'il semble y avoir une multitude d'avantages environnementaux associés à l'AU, plusieurs des bénéfices proposés dans la littérature n'ont été démontrés qu'avec divers degrés de certitude, alors que d'autres ne sont encore qu'à un stade spéculatif. En effet, il existe plusieurs études traitant de cas expérimentaux, ou encore de cas théoriques basés sur des modélisations, mais la plupart des bénéfices et impacts émanant des conclusions de ces dernières nécessitent encore d'être mis en évidence à plus grande échelle, particulièrement à celle de la ville, dans une perspective holistique. Toujours selon Goldstein *et al.* (2016b), il semble toutefois évident que les performances (p. ex. les impacts environnementaux, les rendements de production, la consommation énergétique, la rentabilité économique, etc.) varient grandement en fonction des méthodes de production et du contexte. Les auteurs y proposent ainsi une catégorisation des diverses pratiques en AU basée sur deux des principaux facteurs affectant la consommation d'énergie et l'utilisation de ressources, soit le niveau d'intégration au bâtiment et le niveau de contrôle de l'environnement de production.

Toujours selon Goldstein *et al.* (2016b), le premier principe organisationnel, l'intégration au bâtiment, offre des opportunités supplémentaires quant à l'intégration

de flux résiduels, particulièrement en ce qui concerne la réduction de la consommation énergétique. Il y est ainsi suggéré qu'il serait avantageux de cultiver sur un bâtiment, puisque cela permettrait non seulement de réduire les pertes de chaleur par le toit de ce dernier, mais aussi de valoriser certains de ses rejets thermiques, autrement inutilisés, pour chauffer l'espace de culture. En ce qui concerne la récupération de nutriments, c'est la méthode de culture plutôt que l'emplacement qui détermine la potentielle synergie avec la ville. En effet, la culture en sol permet généralement de valoriser plus facilement la matière organique résiduelle de la ville, par sa transformation en compost, que la culture hors sol (p. ex. l'hydroponie), bien que certaines méthodes plus complexes permettent de produire des fertilisants liquides de sources organiques. Dans un même ordre d'idées, la collecte d'eau de pluie n'est également que très peu dépendante du niveau d'intégration au bâtiment. Le second principe organisationnel, le contrôle de l'environnement de production, offre une plus grande efficacité en ce qui a trait à l'utilisation des ressources et minimise le risque de contamination par les polluants urbains par rapport à la culture en plein air, qui fait face aux intempéries, ravageurs et autres aléas externes. En contrepartie, le contrôle de l'environnement occasionne des investissements initiaux et des coûts de production plus élevés, nécessitant généralement des infrastructures plus complexes, de même que des équipements mécaniques. De plus, un environnement contrôlé engendre une consommation énergétique accrue, associée notamment au chauffage et à l'éclairage artificiel, ce qui peut affecter grandement les performances environnementales de l'opération.

Pour donner suite à cette analyse, Goldstein *et al.* (2016b) suggère une catégorisation des principales méthodes d'AU afin de faciliter l'analyse et la compréhension des caractéristiques d'opération (p. ex. l'efficacité, les intrants énergétiques externes, la capacité et les rendements de production, etc.), des investissements en capital requis pour les infrastructures et les équipements, du potentiel de synergie urbaine associés

aux flux énergétiques et de matière et d'autres traits généraux, tels que les aspects financiers et les motivateurs sociaux. Les catégories proposées sont :

- l'agriculture urbaine sur sol (ou indépendante) en environnement non contrôlé (p. ex. un jardin urbain en sol ou hors sol);
- l'agriculture urbaine sur sol (ou indépendante) en environnement contrôlé (p. ex. une serre urbaine sur sol);
- l'agriculture urbaine intégrée au bâtiment en environnement non contrôlé (p. ex. un toit végétalisé comestible);
- l'agriculture urbaine intégrée au bâtiment en environnement contrôlé (p. ex. une serre sur toit).

Les auteurs proposent également une subdivision supplémentaire pour les environnements contrôlés, soit ceux contrôlés de manière passive, c'est-à-dire que l'éclairage et le chauffage proviennent uniquement de l'énergie solaire, et ceux contrôlés de manière active, c'est-à-dire que l'éclairage et le chauffage proviennent de l'électricité et/ou d'autres sources externes d'énergie thermique. Il est à noter que certaines méthodes de production seraient ainsi hybrides (p. ex. une serre chauffée qui utilise un éclairage artificiel d'appoint). Les coûts et intrants associés aux méthodes passives sont plutôt associés aux infrastructures, alors que ceux associés aux méthodes actives sont plutôt associés à la consommation énergétique. Selon les auteurs, il n'existerait que peu d'études comparant toutefois la viabilité environnementale et financière de ces deux sous-catégories. La figure 1.1 montre des exemples associés aux diverses catégories d'AU précédemment discutées. La figure 1.2, quant à elle, illustre les différentes formes d'agriculture urbaine s'inspirant de la nomenclature proposée par Goldstein *et al.* (2016b). Ces catégories sont présentées plus en détail dans les sections 1.1.1 à 1.1.4.



Figure 1.1 – De gauche à droite: jardin urbain dans la ville de Columbus aux États-Unis (Kowal, 2021), toit végétalisé comestible de Brooklyn Grange dans la ville de New York aux États-Unis (Bartlett, 2017), serre dans la ville de New Milton au Royaume-Uni (Faherty, 2010), serre sur toit des Fermes Lufa dans la ville de Laval au Canada (Hage, 2013)

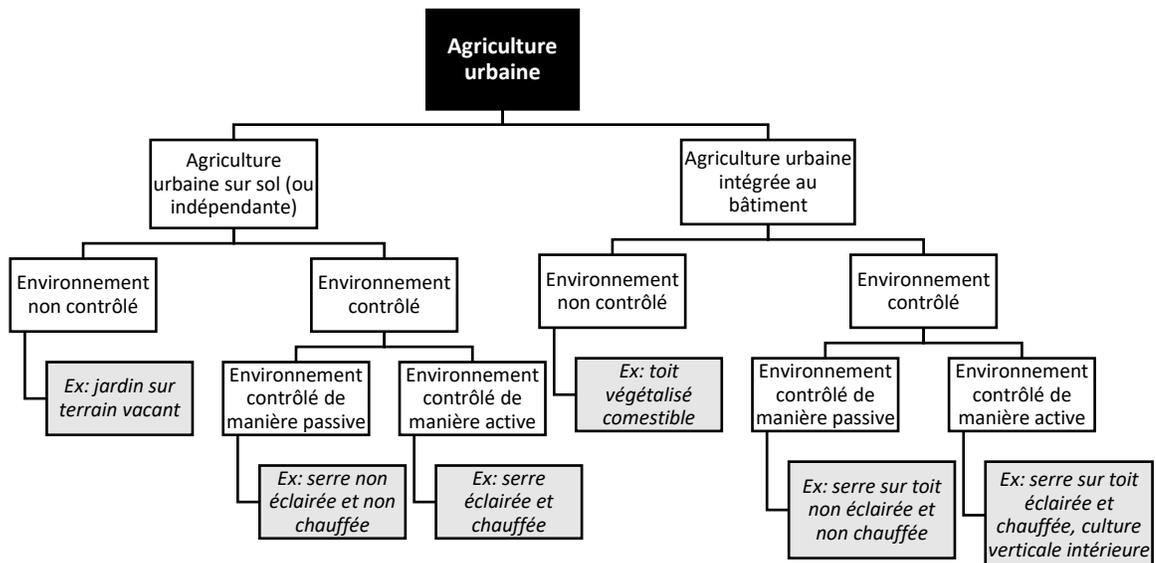


Figure 1.2 – Nomenclature de l'agriculture urbaine adaptée de Goldstein *et al.* (2016b)

1.1.1 Sur sol (ou indépendante) en environnement non contrôlé

Selon Goldstein *et al.* (2016b), l'AU sur sol en environnement non contrôlé se démarque par une utilisation inefficace des ressources, des rendements de production réduits et une courte saison de production. Ces inconvénients sont toutefois contrebalancés par une réduction de la consommation énergétique, de l'empreinte carbone et des investissements en capital, en comparaison à certaines méthodes plus

intensives. Cette catégorie aurait un potentiel de symbiose urbaine relativement limité, bien qu'elle permette d'utiliser de la matière organique urbaine (p. ex. du compost produit à partir de déchets organiques de la ville), ainsi que de réduire la quantité d'eau de ruissellement urbaine. Ce type de pratiques, étant donné un faible potentiel de rendements et de profits, mais des investissements réduits en capital, serait plus adapté à des activités à but non lucratif, communautaires et/ou éducatives.

1.1.2 Sur sol (ou indépendante) en environnement contrôlé

Selon Goldstein et al. (2016b), l'AU sur sol en environnement contrôlé s'opposerait à plusieurs égards avec la catégorie précédente. Elle offrirait une haute efficacité de l'utilisation des ressources et des intrants, comme l'énergie, l'eau et les nutriments nécessaires, ainsi qu'une réduction du potentiel de pertes de récoltes. La complexité des infrastructures et les équipements nécessaires à de telles opérations mènent toutefois à des investissements nettement supérieurs à la catégorie précédente, réduisant par le fait même son accessibilité aux petits producteurs et entrepreneurs. Une haute efficacité de l'utilisation des ressources et des rendements augmentés, combinés à une consommation énergétique et des investissements supérieurs, compliquent ainsi l'analyse, les contraintes étant fortement conflictuelles avec les bénéfices. Le potentiel de symbiose urbaine serait faible en comparaison aux autres catégories, l'hydroponie étant souvent utilisée au sein de ces opérations, réduisant le potentiel de recyclage des déchets organiques. De plus, le potentiel d'interactions avec un bâtiment est réduit, la production n'y étant pas rattachée. Finalement, étant donné des investissements en capital typiquement élevés, cette méthode de production serait, de manière générale, plus adaptée à des activités commerciales.

1.1.3 Intégrée au bâtiment en environnement non contrôlé

Selon Goldstein et al. (2016b), l'AU intégrée au bâtiment en environnement non contrôlé, tout comme l'AU sur sol en environnement non contrôlé, mène à une

efficacité réduite de l'utilisation de l'eau et des nutriments par rapport à un environnement contrôlé. De plus, il est dénoté qu'une érosion des sols accentuée semble y être un problème pour bien des producteurs, les opérations en altitude étant souvent privées de protection naturelle ou artificielle contre les vents. Il y a toutefois un fort potentiel de synergie avec le bâtiment et la ville. Par exemple, il est possible de récupérer la matière organique de la ville pour en faire du compost, valoriser l'énergie résiduelle du bâtiment pour prolonger la saison de culture en sol et récupérer l'eau de pluie et les eaux grises pour l'irrigation des plantes. De plus, dans certains cas, l'implantation de telles pratiques sur le toit d'un bâtiment peut mener à certains bénéfices (p. ex. une augmentation du niveau d'isolation du toit ou un effet refroidissant) entraînant une réduction des besoins en chauffage et/ou en climatisation de l'immeuble. Ces bénéfices seraient typiquement augmentés avec l'intensité de culture. Cependant, la culture intensive sur toit, typiquement favorisée par les opérations commerciales, mène généralement à des investissements initiaux nécessaires plus élevés.

1.1.4 Intégrée au bâtiment en environnement contrôlé

Finalement, toujours selon Goldstein et al. (2016b), l'AU intégrée au bâtiment en environnement contrôlé est très similaire à l'AU sur sol en environnement contrôlé. Les aspects opérationnels sont quasi identiques, et les coûts d'investissements en capital demeurent élevés. Il est à noter que d'importants coûts supplémentaires et des complications techniques peuvent également y être associés, en lien avec le renforcement de la structure de toit, la gestion et le stockage de l'eau de pluie, le respect de codes de la construction plus sévères et d'autres particularités spécifiques à l'intégration de telles opérations à un bâtiment. Le potentiel de symbiose urbaine est cependant élevé, étant donné la possible synergie avec les flux énergétiques et d'eau du bâtiment, mais en demeure moindre que l'AU intégrée au bâtiment en environnement non contrôlé, étant donné les limitations typiquement associées à la

culture hydroponique. Encore une fois, ces opérations sont souvent de nature commerciale, les investissements en capital nécessaires étant élevés.

1.2 Potentiel de production de l'agriculture urbaine

L'AU, en plus d'offrir plusieurs bénéfices sociaux, économiques et environnementaux, a également le potentiel de produire une quantité non négligeable de fruits et de légumes pour les habitants des villes. La section suivante effectue un survol d'études évaluant le potentiel de production de l'AU dans différents contextes.

1.2.1 Production à grande échelle

Plusieurs études ont tenté d'évaluer le rôle que pourrait jouer l'AU quant à la demande grandissante de nourriture des villes du monde. Une étude de Clinton *et al.* (2018) estime qu'une AU intensive et implantée à l'échelle planétaire permettrait non seulement d'augmenter la production alimentaire de 100 à 180 millions de tonnes, mais aussi d'effectuer des économies énergétiques de 14 à 15 milliards de kilowattheures, de séquestrer de 100 000 à 170 000 tonnes d'azote et de réduire de 45 à 57 milliards de mètres cubes la quantité d'eau de ruissellement urbaine (Clinton *et al.*, 2018). Il est ainsi possible de constater que l'AU pourrait potentiellement jouer un rôle prépondérant dans la production alimentaire planétaire, sachant qu'environ 300 millions de tonnes de légumes ont été produites mondialement en 2018 (FAO, 2020).

Selon Martellozzo *et al.* (2014), en moyenne, seulement un tiers de l'espace des agglomérations urbaines du monde serait suffisant pour répondre à la demande en légumes des villes de la planète. Les auteurs reconnaissent toutefois qu'il existe une grande variabilité de capacité de production d'une ville à l'autre, étant donné la grande diversité de contextes sociaux, économiques, démographiques et géographiques. Les zones urbaines de plus petites dimensions ou les zones périurbaines seraient quant à elles avantagées par leur densité de population inférieure aux grands centres, menant

ainsi à plus d'espaces propices à la production alimentaire et à un meilleur potentiel de production par habitant. Selon cette même étude, seulement 10 % à 25 % de la superficie urbaine du Canada serait suffisante pour répondre à la demande en légumes des habitants des villes du pays. Farfan *et al.* (2019) ont, quant à eux, évalué qu'il serait possible de répondre à près de 25 % des besoins mondiaux en légumes d'ici la moitié du siècle avec l'intensification de l'AU. Selon les auteurs, pas plus de 5 % de l'électricité produite globalement dans le monde serait nécessaire pour arriver à cet objectif. De manière plus concrète, ce niveau d'intensification représenterait l'équivalent de 55,4 millions d'unités de production agricoles en conteneurs.

Certains, comme Goldstein *et al.* (2016a), rappellent cependant qu'il est important d'interpréter ce genre de résultats avec précaution, étant donné la grande variabilité contextuelle des villes et des méthodologies utilisées par les auteurs. Il est donné en exemple que, selon des études locales, l'AU pourrait répondre à 77 % de la demande en fruits et légumes à Bologne, en Italie (Orsini *et al.*, 2014), mais à seulement 1 % de la demande en légume de la ville d'Oakland, aux États-Unis (McClintock *et al.*, 2013).

1.2.2 Potentiel de production pour la ville de Montréal

À un niveau plus local, une étude de Haberman *et al.* (2014) s'est spécifiquement penchée sur le potentiel de production de l'AU pour la ville de Montréal. Les auteurs ont déterminé qu'il serait tout à fait possible de répondre à la demande annuelle en légumes de ses habitants. À la suite de l'étude de divers scénarios, il est conclu que l'AU, pratiquée de manière extensive, pourrait répondre à 44,8 % de la demande par l'utilisation de tous les espaces vacants et à 91,7 % de la demande par l'utilisation de tous les jardins résidentiels. Toutefois, si elle était pratiquée de manière intensive pour ces mêmes espaces, elle pourrait répondre à 75,5 % et 128,4 % de la demande respectivement. Le cas particulier de la culture sur les toits de bâtiments industriels a aussi été analysé par les auteurs. Si l'ensemble de la superficie des toits des bâtiments industriels servait à produire de manière intensive, comme avec la culture

hydroponique, il serait possible de répondre globalement à environ 277 % de la demande montréalaise en légumes. Il est cependant à noter que, lorsque les arrondissements de la ville sont évalués indépendamment les uns des autres après y avoir maximisé l'utilisation des espaces de jardins vacants et résidentiels pour la production de légumes, les auteurs observent une certaine variabilité quant à la capacité de ces derniers à répondre à la demande de légumes de leurs habitants respectifs. En effet, de manière générale, les arrondissements plus centraux et densément peuplés nécessitent une plus grande proportion de culture hydroponique, pratiquée sur sol ou sur les toits de bâtiments industriels, pour répondre à la totalité ou à une portion significative de la demande locale de légumes. Cependant, les arrondissements plus excentrés et moins densément peuplés ne nécessitent, en théorie, que peu ou pas de culture hydroponique sur sol ou sur les toits de bâtiments industriels pour répondre à la demande locale. Bien qu'il soit en pratique peu probable que l'ensemble des espaces étudiés servent éventuellement à des pratiques agricoles et que certaines des solutions précédemment proposées comportent leur lot de contraintes techniques et économiques, ces résultats démontrent tout de même le fort potentiel de production associé à diverses pratiques d'AU pour une ville comme Montréal.

1.3 Viabilité de l'agriculture urbaine commerciale

1.3.1 Méthodes et espaces de production propices en agriculture urbaine

Il subsiste encore plusieurs questionnements quant à la viabilité environnementale et économique de l'implantation de projets commerciaux d'AU dans les villes. Certains espaces de production et méthodes semblent toutefois plus favorables aux projets commerciaux. Peu d'études se concentrent sur de larges opérations d'AUC, mais il y aurait indéniablement un fort potentiel de production inexploité. Cela est particulièrement vrai pour les toits de bâtiments en ville sur lesquels l'AUC s'y effectue généralement en serres hydroponiques, où sont typiquement cultivées légumes, herbes,

tomates et autres cultures à haute valeur ajoutée, ou encore en plein air, où une plus large variété de légumes peut être cultivée (Devi et Ranka, 2016).

Plusieurs études suggèrent que l'utilisation de méthodes à haut rendement, comme l'hydroponie, offrirait de plus intéressants potentiels de production et de rentabilité lorsque l'espace de production est restreint et/ou limitatif, notamment sur les toits de bâtiments, espaces urbains largement sous-utilisés (Devi et Ranka, 2016). L'AUC sur toit ou intégrée aux bâtiments permettrait également de profiter de potentielles synergies, avantageuses tant pour l'opérateur du bâtiment que pour celui de la ferme (Specht *et al.*, 2014). Une étude de Sanyé-Mengual *et al.* (2015) démontre d'ailleurs le grand potentiel de l'AUC effectuée sur les toits pour un parc industriel de Barcelone, en Espagne. D'après les auteurs, les parcs industriels, étant donné leurs caractéristiques particulièrement favorables, offrent généralement un fort potentiel d'implantation de projets d'AUC sur les toits. Ils établissent d'ailleurs, avec l'étude de cas, qu'il est possible de produire une quantité considérable de tomates avec une faible proportion de la superficie totale des toits du quartier, menant à une réduction substantielle d'émissions de GES associées au transport et à la distribution des produits alimentaires. Les auteurs estiment qu'il serait théoriquement possible d'y produire annuellement plus de 2 000 tonnes de tomates, soit l'équivalent de la demande de 150 000 personnes, et ce, par l'installation de serres sur certains toits de bâtiments industriels propices à une implantation rapide et économique. Plusieurs facteurs à considérer, qui peuvent influencer la faisabilité de tels projets et qui varient grandement d'un secteur à l'autre, y sont toutefois identifiés, en particulier les caractéristiques et propriétés relatives aux toits des bâtiments (p. ex. les matériaux, la capacité portante, la pente, etc.) et l'ombrage occasionné par l'architecture environnante (Sanyé-Mengual *et al.*, 2015; Sanyé-Mengual *et al.*, 2018).

L'intéressant potentiel d'implantation de serres commerciales sur les toits ne se limite pas uniquement aux quartiers industriels, comme démontré par une autre étude

effectuée par Sanyé-Mengual *et al.* (2018). Cette dernière évalue l'implantation de serres sur les toits de bâtiments dans des secteurs commerciaux de l'Europe et de l'Amérique du Sud et des conclusions similaires à l'étude précédente en sont tirées en ce qui a trait aux rendements et à la réduction des distances de transport, entraînant une baisse des émissions de GES en comparaison avec une chaîne d'approvisionnement conventionnelle. Les auteurs rapportent que la synergie avec les bâtiments, associée aux échanges thermiques et gazeux, permettrait théoriquement d'augmenter considérablement la production et les bénéfices environnementaux d'une production locale. Il y est également conclu que la faisabilité technique et la rentabilité économique seraient, de manière générale, supérieures pour des projets d'intégration de serres sur les toits de bâtiments commerciaux que de bâtiments industriels. L'étude de Nadal *et al.* (2018) réitère en ce sens, suggérant que les établissements scolaires et universitaires seraient également des endroits propices à l'implantation de projets d'AUC sur les toits, étant donné les potentiels bénéfiques, non seulement environnementaux, mais aussi sociaux et éducatifs.

1.3.2 Utilisation optimale de l'espace urbain

Certains se questionnent par ailleurs sur l'utilisation optimale des espaces urbains vacants. Selon Benis *et al.* (2018), dans le cas du Portugal, la production d'aliments sur les toits de bâtiments, en serres ou en plein air, aurait généralement davantage de bénéfices sociaux et économiques que l'installation de panneaux photovoltaïques sur ces derniers. Une étude de Goldstein *et al.* (2016a) n'arrive cependant pas à ces mêmes conclusions. Il y est démontré que, pour les villes de Boston et de New York, l'installation de panneaux photovoltaïques présenterait plus de bénéfices environnementaux. Les auteurs proposent ainsi que l'AU ne serait pas nécessairement l'utilisation des espaces vacants et des toits la plus optimale sur le plan environnemental en climats froids, mais n'excluent toutefois pas que des solutions

hybrides, intégrant de l'agriculture et de la production d'énergie, pourraient s'avérer globalement les plus performantes.

1.3.3 Impacts environnementaux de l'agriculture urbaine commerciale et mesures de mitigation

Plusieurs études suggèrent que l'AUC pourrait être intéressante d'un point de vue environnemental, étant donné les distances de transport réduites des circuits de distribution, le fort potentiel symbiotique en lien avec les flux énergétiques, de matières résiduelles et d'eaux, en plus d'une multitude d'autres services écosystémiques et bénéfiques externes (Clinton *et al.*, 2018; Goldstein *et al.*, 2016b; Specht *et al.*, 2014). L'agriculture effectuée en contexte urbain ou périurbain semble particulièrement intéressante sur le plan environnemental lorsqu'elle est effectuée en climat tempéré ou doux (Benis *et al.*, 2017; Benis *et al.*, 2018; Rothwell *et al.*, 2016; Sanyé-Mengual *et al.*, 2015). En climats froids, les résultats sont toutefois plus mitigés, la production à longueur d'année en AUC y nécessitant généralement un environnement contrôlé. Ces espaces de production sont typiquement associés à des investissements initiaux et des coûts de production élevés, une grande consommation énergétique et des méthodes de production qui ne sont pas nécessairement les plus durables, comme l'hydroponie, impliquant de potentiels lourds impacts environnementaux, notamment lorsque l'énergie consommée provient de sources fossiles et/ou qu'il y a utilisation d'intrants chimiques de synthèse (Devi et Ranka, 2016; Goldstein *et al.*, 2016a). En contrepartie, selon Goldstein *et al.* (2016a), la production saisonnière extérieure (p. ex. sur des lots vacants ou des toits végétalisés intensifs), quant à elle, nécessite des investissements initiaux et des coûts de production typiquement supérieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle, et ce, pour des rendements similaires, voire inférieurs, tout en faisant face à des saisons de culture écourtées et une multitude de contraintes techniques et financières associées au contexte urbain.

Il semble ainsi y avoir encore des lacunes à combler en AUC. Il existerait cependant plusieurs solutions permettant d'en réduire les impacts environnementaux et d'en améliorer les performances et la rentabilité, comme favoriser une production sans produits chimiques de synthèse (pesticides et fertilisants), implémenter des mesures d'efficacité énergétique, utiliser de l'énergie provenant de sources renouvelables, valoriser les rejets thermiques des bâtiments et des industries, utiliser des systèmes de culture en boucle fermée pour favoriser la réutilisation de l'eau et la récupération des nutriments, récupérer les eaux grises et de pluie et encourager les échanges gazeux (CO₂ et O₂) avec les bâtiments (Devi et Ranka, 2016; O'Sullivan *et al.*, 2019).

1.3.4 Principales barrières à la rentabilité financière en agriculture urbaine commerciale

Pour que l'AU gagne en importance et joue un plus grand rôle en matière d'alimentation des citoyens, il est nécessaire que la filiale commerciale de ce secteur se développe et soit encouragée par la population et les instances gouvernementales. Un grand nombre de projets d'AUC sont apparus au cours des dernières années, notamment en Amérique du Nord. Dans plusieurs cas, ces derniers ont démontré qu'une utilisation efficace d'espaces urbains vacants, qui seraient autrement non valorisés, pouvait s'avérer bénéfique pour les communautés locales (Hunold *et al.*, 2017). Il subsiste cependant encore plusieurs questionnements quant à la rentabilité financière de tels projets. Dans plusieurs villes américaines, certains suggèrent d'ailleurs que l'AUC n'aurait pas encore atteint un stade de maturité satisfaisant aux yeux des institutions bancaires, compliquant souvent l'accès au financement pour les entrepreneurs (Cabannes, 2012; Hunold *et al.*, 2017).

Selon Hunold *et al.* (2017), aux États-Unis, l'AUC serait encore aujourd'hui considérée par plusieurs investisseurs comme une activité plutôt sociale et non rentable. Leur étude, qui se penche sur de petites fermes urbaines et périurbaines de la région de Philadelphie, conclut que la rentabilité en AU s'avère typiquement difficile à atteindre sans

l'obtention d'aides financières externes. En effet, la plupart des entreprises étudiées n'atteignaient pas de profits permettant le remboursement des investissements et ne pouvaient offrir des salaires intéressants à leurs employés. Les auteurs rappellent aussi que les coûts de main-d'œuvre combinés à d'autres facteurs associés à la réalité urbaine (p. ex. une productivité variable des sols, la nécessité de décontaminer certains terrains urbains ou d'y effectuer une culture hors sol, l'utilisation de techniques et équipements spécialisés pour prolonger la saison de culture, l'accès limité à de l'eau pour l'irrigation, etc.) viennent souvent réduire d'autant plus la rentabilité potentielle des petites entreprises visant une production intensive. Selon les auteurs, pour espérer atteindre une rentabilité intéressante, le support des gouvernements serait dans bien des cas d'une importance capitale, tant sur le plan réglementaire que financier. De plus, les petites entreprises auraient tout avantage à répliquer des modèles éprouvés, à opérer des fermes cultivant des produits de niche particulièrement lucratifs et à réduire au maximum les coûts d'investissements initiaux.

Dans un même ordre d'idées, l'étude de Corey *et al.* (2015) se penche sur la viabilité économique de l'AUC, cette fois dans le contexte de la ville de Boston (États-Unis), et concentre son analyse sur les terrains publics, essentiellement des lots vacants, les coûts des terrains privés dans la zone urbaine étant jugés exorbitants et un frein majeur à la rentabilité des entreprises œuvrant en AUC. Les auteurs tentent d'y identifier certains paramètres permettant l'atteinte du seuil de rentabilité pour les entreprises de cette industrie très diversifiée et effectuent plusieurs recommandations. Il y est notamment dénoté que toute entreprise d'AUC en phase de démarrage devrait, en premier lieu, et selon sa situation unique, déterminer le modèle d'affaires à privilégier (à but lucratif ou non lucratif) et la structure d'entreprise légale optimale, trouver un espace de culture assurant idéalement la pérennité des opérations et réduire au maximum les coûts de démarrage. Ces mêmes entreprises devraient également miser sur des cultures lucratives, à haut rendement, qui peuvent être cultivées de manière intensive et qui sont adaptées aux conditions climatiques locales. De plus, pour maximiser les profits, il est

jugé important de favoriser une structure de vente directe aux consommateurs et de viser une clientèle prête à payer un surcoût pour des produits locaux de qualité supérieure, par exemple, des restaurateurs. Les auteurs encouragent aussi les autorités municipales à développer des politiques d'AU visant à favoriser le développement de cette industrie au sein de leur ville, notamment en mettant en place des plans d'aménagement urbain facilitant l'accès à des terrains vacants ou sous-utilisés aux agriculteurs, de même qu'en instaurant des mesures de soutien, par exemple, des incitatifs financiers, une réduction de taxes, la mise en place d'un département ou de personnes-ressources en AU dans l'administration municipale ou la création de programmes éducatifs pour la population. Il y est aussi rappelé la pertinence de développer de meilleurs outils de collectes de données visant à mieux déterminer, sur le terrain, les réels impacts des fermes urbaines sur les différentes communautés.

L'étude de Rangarajan et Riordan (2019) arrive à des conclusions similaires aux précédentes. Les auteurs y analysent un échantillon de 14 fermes urbaines, réparties dans 13 différentes villes américaines. Ces dernières atteignent toutes des revenus annuels supérieurs à 10 000 \$ (US), mais sont diversifiées en ce qui a trait à leur structure légale (à but lucratif, non lucratif ou hybride), leurs types de cultures effectuées (légumes, fleurs ou champignons) et leurs méthodes de culture utilisées (au sol ou sur toit, à l'extérieur ou en environnement contrôlé). Encore une fois, il est rappelé qu'il subsiste d'importantes barrières pour les aspirants agriculteurs en zones urbaines, notamment en ce qui concerne la difficulté d'accès aux terrains, et que ces fermes doivent généralement miser sur des stratégies de vente directe et de proximité, voire sur certains services complémentaires, comme l'agrotourisme et l'organisation d'activités éducatives ou d'événements, pour espérer atteindre une certaine rentabilité. Il y est également suggéré que plusieurs entrepreneurs en AUC sont fortement motivés par une panoplie de raisons, qui peuvent parfois s'avérer incompatibles avec l'atteinte de profitabilité, mais qu'ils devraient avant tout se concentrer sur leurs objectifs financiers pour atteindre la pérennité. Selon les auteurs, certains moyens innovants

permettraient néanmoins de concilier la rentabilité aux motivations sociales et écologiques des entreprises, comme en développant des partenariats stratégiques avec la communauté, en encourageant le bénévolat, de même qu'en misant sur des structures d'entreprise légales plus hybrides, ne visant pas uniquement la lucrativité.

Bien que ces études se soient concentrées sur diverses villes nord-américaines, il semble réaliste d'affirmer que plusieurs des conclusions tirées peuvent probablement être généralisées et appliquées à des villes présentant des particularités sociodémographiques similaires, comme Montréal. Il est aussi important de rappeler que plusieurs bénéfiques associés aux pratiques commerciales d'AU sortent souvent du cadre purement financier et ne sont pas toujours considérés à leur juste valeur (Ikerd, 2017). En effet, comme mentionné précédemment, plusieurs pratiquants et entrepreneurs de l'AUC visent à répondre à diverses missions, telles que la production d'aliments frais et de proximité, la résilience des communautés locales, la lutte à l'insécurité alimentaire et le développement de méthodes de production alternatives plus respectueuses de l'environnement que les pratiques conventionnelles du système agroalimentaire moderne (Hunold *et al.*, 2017; Matthews et Akhtar-Khavari, 2018). Ainsi, bien que la rentabilité économique de l'AUC resterait encore à être démontrée dans certains contextes (Cabannes, 2012; Hunold *et al.*, 2017), il semble tout de même qu'elle offrirait d'intéressantes opportunités associées à un gain en efficacité de l'utilisation des espaces des villes, en plus de proposer une multitude de services sociaux, économiques et environnementaux à l'échelle locale.

1.3.5 Potentiel de développement économique de l'agriculture urbaine commerciale au Québec

Malgré les diverses barrières présentées précédemment, l'atteinte de la rentabilité financière n'est pas nécessairement impossible en AUC, comme le témoigne l'incessante augmentation d'entreprises dans cette industrie, tant au Québec qu'ailleurs dans le monde. Il est d'ailleurs possible de se pencher plus spécifiquement sur quelques

projets ayant fait preuve de succès, comme l'entreprise Brooklyn Grange, établie à New York (États-Unis). En 2019, cette dernière engageait près de 80 employés et produisait environ 36 000 kg de fruits, légumes, micropousses et fleurs sur des toits de bâtiments et en serres, tout en affirmant avoir atteint le seuil de rentabilité dès sa première année d'opération, être devenue profitable en seulement trois ans et avoir vu ses revenus multipliés par trois au cours des cinq dernières années (Duchemin et Huot, 2019). Cette entreprise pionnière en AUC mise non seulement sur la vente directe des divers produits qu'elle cultive, mais aussi sur d'autres activités, comme l'offre de services-conseils en AU et l'organisation d'événements et d'ateliers. Un autre exemple, plus proche d'ici, est celui de l'entreprise montréalaise Ôplant, qui effectue la culture de micropousses sur une superficie totale d'environ 305 m². Cette petite entreprise, qui a été fondée en 2015 et qui a commencé à commercialiser ses produits en 2017, affirme avoir atteint le seuil de rentabilité en 2019, et ce, seulement avec ses activités de production (Duchemin *et al.*, 2020). Toujours dans la région de Montréal, il est également pertinent de mentionner la réussite du projet d'envergure mené par les Fermes Lufa. Cette entreprise, qui se veut une alternative aux détaillants alimentaires traditionnels en offrant à ses abonnés la livraison d'aliments produits le plus localement possible, que ce soit dans ses fermes urbaines ou chez des producteurs partenaires, a connu une croissance rapide depuis sa création. En effet, après avoir construit la première serre sur toit au monde en 2011, dans le quartier Ahuntsic, elle a progressivement développé ses infrastructures, son réseau de partenaires et sa clientèle. En 2021, l'entreprise exploitait une superficie de plus de 300 000 pieds carrés de serres commerciales *high-tech* installées sur les toits de quatre bâtiments dans la région de Montréal, dont la plus grande serre sur toit au monde (1,5 hectares), produisait une grande variété de légumes, légumes et fines herbes et livrait plus de 20 000 paniers à près de 100 000 abonnés par l'entremise d'un large réseau de distribution (Fermes Lufa, 2020a, 2020b). Finalement, une perspective plus globale est offerte par une étude de Autogrow et Agritecture Consulting (2020), portant sur des entreprises qui effectuent de l'agriculture en environnements contrôlés dans près d'une soixantaine de pays à

travers le monde. Selon l'étude, au moins 69 % des entreprises interrogées affirmaient avoir atteint (22 %) ou dépassé (47 %) le seuil de rentabilité en 2020, soit une hausse significative des performances comparativement à des études antérieures similaires effectuées entre 2017 et 2019 (Cohen et Duchemin, 2021).

L'AUC s'avère même en voie de devenir un moteur économique non négligeable dans certaines villes du monde, dont Montréal. Selon l'étude de Kasmi *et al.* (2020), en 2019, au Québec, il y avait 721 entreprises agricoles établies en périmètre urbain, hors de la zone agricole, dont environ 45 % dans la région montréalaise. Ces dernières génèrent des revenus annuels d'environ 260 millions de dollars (CAD) et plus de 1431 emplois directs et indirects. De plus, toujours en 2019, 72 entreprises additionnelles œuvraient dans des secteurs de l'AU dits émergents (p. ex. les cultures de micropousses et de champignons, le maraîchage sur les toits de bâtiments ou en environnements contrôlés intérieurs, l'apiculture, l'aquaculture et l'élevage d'insectes, etc.). Ces dernières génèrent des revenus annuels de plus de 17 millions de dollars, soit 7 % des revenus totaux des entreprises du secteur de l'AU du Québec, en plus de générer 618 emplois directs et indirects. Les auteurs de cette même étude relatent également de la forte augmentation de la quantité d'entreprises d'AU de secteurs en émergence, observant un taux de croissance annuel moyen de 30 % depuis une vingtaine d'années, et estiment que les revenus de ces entreprises pourraient atteindre entre 277 et 411 millions de dollars et créer de 3 728 à 14 578 emplois d'ici 2025.

L'étude de Kasmi *et al.* (2020) s'est également penchée plus en détail sur les emplois et les revenus générés de 35 entreprises québécoises œuvrant dans différents secteurs émergents en AU, soit la culture de légumes, de micropousses et de champignons (27 entreprises), ainsi que l'élevage d'insectes (4 entreprises), l'apiculture (2 entreprises et l'aquaculture (2 entreprises). À elles seules, ces entreprises employaient 302 personnes, dont 165 (55%) à temps plein, et génèrent plus de 8,6 millions de dollars de chiffre d'affaires. Il y est observé que, bien qu'il y ait une grande disparité quant aux gammes

de revenus des 35 entreprises faisant l'objet de l'enquête, pouvant s'étendre de 5 000 \$ à plus de 1 500 000 \$ par année, plus de la moitié d'entre elles généraient des revenus relativement importants, soit d'au moins 100 000 \$. Plus précisément, 46 % des entreprises avaient des revenus entre 100 000 \$ à 499 999 \$ et 14 % des entreprises avaient des revenus supérieurs à 500 000 \$. De plus, 11 % des entreprises avaient des revenus entre 25 000 \$ et 99 999 \$, alors que les entreprises restantes (28%) avaient des revenus de moins de 25 000 \$, la plupart de ces dernières étant de nouvelles opérations en phase de démarrage. Les auteurs de l'étude comparent ensuite les résultats issus de l'analyse de l'échantillon aux performances de l'ensemble des entreprises agricoles québécoises et y observent une répartition globale des tranches de revenus relativement similaire, à l'exception des tranches de 25 000 \$ à 99 000 \$ et de 100 000 \$ à 499 999 \$, dont les proportions sont de respectivement 24 % et de 30 %, plutôt que de 11 % et de 46 %.

Toujours selon l'enquête de Kasmi *et al.* (2020), il est également intéressant de constater que, parmi les entreprises analysées, la majorité (69 %) avait comme sources primaires de revenus leurs activités de production, alors que d'autres (14 %) bénéficiaient également de revenus d'appoint sous diverses formes, par exemple, l'offre de services-conseils ou l'organisation d'événements. L'ensemble des entreprises étudiées affirmaient favoriser la vente de proximité, directe ou en ligne, afin de maximiser les bénéfices, tout en minimisant les coûts d'entreposage, de transport et de distribution. Finalement, en moyenne, plus du tiers des dépenses totales (37 %) des entreprises qui faisaient l'objet de l'enquête était associé à la masse salariale des employés, alors que près du quart (23 %) des dépenses était lié à la location des espaces de production. Les autres dépenses étaient, quant à elles, typiquement associées aux équipements (22 %), aux matières premières (17 %), au marketing (8 %) et à d'autres dépenses générales (10 %). Ces chiffres démontrent clairement les enjeux financiers associés à la main d'œuvre et à l'accessibilité d'espaces de culture en contexte urbain, comme discuté dans la section précédente.

1.4 Méthodes répandues d'agriculture urbaine commerciale : potentiel, bénéfices et impacts spécifiques

1.4.1 Toits végétalisés comestibles

Une des solutions d'AUC les plus communément proposées est l'installation de toits végétalisés comestibles, ou toits verts (TV). Plusieurs projets de ce type sont apparus dans les dernières années dans différentes villes du monde. À Montréal, il y a notamment le jardin sur toit du supermarché IGA Duchemin Extra, dont les récoltes sont vendues directement aux clients. Inauguré en 2017, ce dernier, d'une superficie d'environ 2 300 mètres carrés, est le plus grand potager biologique sur toit au Canada (IGA, 2017). Il est également pertinent de mentionner le cas particulier du toit du Palais des congrès de Montréal qui est aujourd'hui l'une des principales vitrines technologiques d'AU au Québec (voir la figure 1.3), accueillant, depuis 2016, plusieurs projets-pilotes supervisés par le Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). Les différentes initiatives, réparties sur plus de 600 mètres carrés, visent l'expérimentation et la démonstration de diverses méthodes d'AU sur toit (p.ex. des structures autoportantes verticales, des bacs potagers hors sol et des ruches d'abeilles) et permettent d'y récolter divers produits, dont des fines herbes, des légumes à feuilles, des fraises, des tomates, des fleurs comestibles, des vignes, du houblon et du miel, qui sont, notamment, utilisés par des entreprises alimentaires et organismes locaux (AU/LAB, 2018).

Les TV comestibles s'avèrent typiquement moins onéreux que d'autres alternatives plus *high-tech* et sont bénéfiques à plusieurs égards d'un point de vue écologique. En effet, les TV s'avèrent une des méthodes de production en AU qui offrirait globalement le plus de services écosystémiques aux villes. Ils permettent dans plusieurs cas, en plus de nécessiter généralement des coûts d'investissements et de production inférieurs à ceux des environnements contrôlés, de réduire les coûts associés à la consommation énergétique des bâtiments, combattre les îlots de chaleur urbains, réduire la pollution

atmosphérique et hydrique, favoriser la biodiversité au sein de la ville (notamment celle des insectes pollinisateurs), réduire la pression sur les systèmes de gestion d'eaux grises et pluviales, et ce, tout en répondant à une partie de la demande alimentaire des villes (Berardi *et al.*, 2014; Cascone *et al.*, 2018; Erlend *et al.*, 2018; Korol et Shushunova, 2016; Li et Yeung, 2014; Nurmi *et al.*, 2016; Shafique *et al.*, 2018). De plus, selon Hawken (2017), étant donné qu'un TV peut réduire jusqu'à 50 % des besoins en climatisation de l'étage sous-jacent du bâtiment sur lequel il est installé, il est estimé que l'intégration de TV et de toits blancs, respectivement sur 30 % et 60 % de la surface des toits du parc immobilier mondial, permettrait de réduire jusqu'à près de 0,8 Gt d'émissions équivalentes de CO₂ d'ici 2050.



Figure 1.3 – Toit végétalisé comestible du Palais des congrès de Montréal (Palais des congrès de Montréal, 2020)

Ces bénéfices dépendraient toutefois fortement du type de TV installé et du contexte. En effet, un TV peut être catégorisé comme extensif ou intensif, selon l'épaisseur du substrat, ainsi que l'intensité de la culture qui y est effectuée. Les toits verts extensifs sont généralement ceux présents en plus grand nombre dans les villes, car ils ne requièrent typiquement pas d'augmenter la capacité portante des toits, modifications

majeures et souvent coûteuses à apporter à la structure des bâtiments. Ils sont donc souvent favorisés pour les bâtiments existants. Les toits verts intensifs, quant à eux, sont plus adaptés à la production commerciale, étant donné leurs rendements supérieurs, et sont plus faciles à intégrer à de nouvelles constructions lorsqu'ils sont prévus en phase de conception (Cascone *et al.*, 2018; Erlend *et al.*, 2018; Jaffal *et al.*, 2012). Il est à noter que les toits végétalisés comestibles (TVC) offrent un potentiel de production limité, la culture y étant généralement effectuée en sol, la saison de culture étant écourtée et les récoltes étant dépendantes de la température extérieure (Goldstein *et al.*, 2016a). Ces derniers peuvent également nécessiter des investissements substantiels et impliquer des modifications majeures à la structure du toit du bâtiment (Cascone *et al.*, 2018; Erlend *et al.*, 2018; Jaffal *et al.*, 2012). Ils offrent toutefois un potentiel de symbiose urbaine fort intéressant (Goldstein *et al.*, 2016b) et la possibilité de cultiver une grande variété de légumes sur des espaces autrement inutilisés.

1.4.1.1 Bénéfices généraux et faisabilité économique

Selon Shafique *et al.* (2018), les TV offrent une large gamme de bénéfices environnementaux, sociaux et économiques et peuvent s'avérer des outils efficaces pour rendre les villes plus durables et résilientes, notamment face aux changements climatiques. Leurs principaux bénéfices environnementaux en zones urbaines sont généralement associés à la rétention des eaux de pluie, la diminution et l'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement urbain, la réduction de la température ambiante de l'air et des phénomènes d'îlots de chaleur, la réduction des coûts de consommation énergétique des bâtiments, l'amélioration de la qualité de l'air, la réduction de la pollution sonore et l'amélioration de la biodiversité. Selon ces mêmes études, les TV procureraient également certains bénéfices sociaux (p. ex. le verdissement urbain, l'amélioration de l'esthétisme des villes, des opportunités de jardinage pour les citoyens, etc.), ainsi que des bénéfices économiques (p. ex. l'augmentation de la durée de vie de la membrane de toit, la réduction de la facture énergétique du bâtiment, etc.). De plus,

selon l'étude, ces derniers seraient typiquement des investissements peu risqués et économiquement viables, bien qu'ils requièrent des coûts initiaux plus élevés qu'un toit conventionnel. Il y est toutefois précisé qu'il existe encore plusieurs contraintes pouvant freiner l'implantation de TV, soit sur le plan financier (p. ex. des coûts élevés d'investissements et de maintenance, un manque de politiques favorables et d'appuis financiers gouvernementaux), soit sur le plan technique (p. ex. des problèmes de fuites d'eau du toit).

L'analyse coût-avantage effectuée par Nurmi *et al.* (2016) dans un climat froid, soit à Helsinki (Finlande), suggère des bénéfices similaires, mais établit que ceux-ci dépendraient toutefois largement du type de TV. Les auteurs concluent que les bénéfices économiques, au niveau privé, ne seraient généralement pas suffisants pour justifier leur implantation dans le contexte particulier de la ville d'Helsinki. La réduction des coûts associés à la consommation énergétique peut cependant s'avérer légèrement avantageuse dans certains cas. En effet, le ratio entre les bénéfices et les coûts augmenterait avec l'élévation des coûts de construction régionaux de toits conventionnels, des températures extérieures plus élevées (climats plus chauds), des coûts de l'énergie plus élevés (électricité et gaz naturel) et des codes de construction moins strictes (niveaux d'isolation des bâtiments moins élevés). Selon les auteurs, au niveau public, les bénéfices surpasseraient toutefois les coûts, bien qu'ils soient parfois difficiles à quantifier (p. ex. la réduction des eaux de ruissellement urbaines et des concentrations atmosphériques de particules fines, l'esthétisme des villes, l'augmentation de la valeur des propriétés environnantes, etc.). L'étude financière de Teotónio *et al.* (2018), effectuée pour la ville de Lisbonne (Portugal), arrive à des conclusions similaires. Bien qu'il y ait de multiples avantages sociaux et environnementaux associés à l'implantation de TV, similaires à ceux des études précédentes, leur valeur actualisée nette ne justifierait souvent pas leur implantation pour le propriétaire d'un bâtiment. Il y est toutefois suggéré que de meilleures politiques et aides financières des gouvernements pourraient encourager la construction

d'une plus grande quantité de TV, rendant ces derniers plus accessibles sur le plan financier au niveau privé.

1.4.1.2 Bénéfices énergétiques potentiels

1.4.1.2.1 Cas particuliers en climats chauds et en climats tempérés

En climats chauds, les TV s'avèrent souvent offrir d'intéressants gains de performances énergétiques à leur bâtiment hôte. Cascone *et al.* (2018) ont montré que, pour la ville de Catania (Espagne), l'implantation de TV sur des complexes de logements résidentiels pouvait en réduire de 31 % à 35 % la demande en climatisation et de 2 % à 10 % celle en chauffage. La période de retour sur investissement se situerait entre 13 ans et 18 ans pour les cas applicables, selon les types de substrat et de végétation utilisés. Il est toutefois noté que les TV extensifs sont plus propices aux bâtiments existants, étant donné la capacité structurelle de leur toit parfois limitée. L'étude expérimentale de Theodosiou *et al.* (2014), effectuée à Thessaloniki (Grèce), arrive à des conclusions semblables en comparant deux bâtiments identiques, le premier comportant une TV semi-intensif et le second un toit conventionnel de faible niveau d'isolation. Encore une fois, les bénéfices énergétiques seraient intéressants en périodes estivales et chaudes, étant donné l'ombrage créé par la végétation et l'effet rafraichissant associé à l'évapotranspiration des plantes, mais seraient négligeables en périodes froides, n'ayant pas un impact significatif sur le niveau d'isolation du toit.

Une autre étude comparative, effectuée par Niachou *et al.* (2001), se concentrent quant à elle sur le cas d'un TV installé sur un hôtel à proximité d'Athènes, en Grèce. Il y est proposé que les bénéfices énergétiques se font essentiellement ressentir au dernier étage d'un immeuble, étant celui en contact avec le TV, et observent qu'une couverture végétale augmentée réduirait davantage les flux thermiques vers le toit. La réduction de la consommation énergétique, en lien avec l'installation d'un TV, semblerait cependant largement associée au niveau d'isolation du bâtiment. En effet, pour le cas

étudié, il est calculé que les économies d'énergie associées à la réduction de la demande en chauffage et en climatisation passeraient de 37 % à 48 % dans le cas d'un bâtiment non isolé, à 4 % à 7 % pour un bâtiment moyennement isolé et à moins de 2 % pour un bâtiment bien isolé. Des conclusions similaires sont tirées de l'étude d'Eumorfopoulou et Aravantinos (1998), une fois de plus faite en Grèce. Il y est déterminé que, dans le cas où il n'y a pas d'isolation de toit, les TV peuvent aider à réduire les flux thermiques entre l'extérieur et le toit, mais ces derniers ne performant pas aussi bien que les matériaux isolants conventionnels. Selon les résultats de l'étude, il n'y aurait d'ailleurs aucune différence majeure, en ce qui concerne les performances énergétiques, entre un toit bien isolé avec une membrane de toit conventionnel et un toit bien isolé avec un couvert végétal. Selon les auteurs, un meilleur niveau d'isolation du toit serait donc à favoriser, même si les TV peuvent s'avérer une alternative écologiquement acceptable.

Finalement, il semble que certaines conclusions des études menées en climat méditerranéen seraient aussi applicables en climat tropical. En effet, l'étude de Wong *et al.* (2003), effectuée à Singapour, se penche sur l'impact énergétique de l'implantation d'un TV sur un bâtiment commercial de faible hauteur. Les auteurs y dénotent également une réduction de la température de surface de toit (jusqu'à 30°C), qui s'expliquerait en grande partie par l'ombrage occasionné par les plantes. Des réductions de températures de surface plus importantes y sont observées lorsque l'indice de surface foliaire est plus élevé.

Castleton *et al.* (2010) se sont, eux, intéressés aux TV dans le contexte particulier du Royaume-Uni. Les auteurs rappellent que bien que les TV puissent permettre d'effectuer des gains énergétiques parfois significatifs, tant en chauffage qu'en climatisation, ces derniers dépendent fortement du climat et du niveau d'isolation du toit. Ils dénotent d'ailleurs que les bâtiments de construction plus récente ont des standards de construction plus sévères, et par conséquent des niveaux d'isolation de toit supérieurs, rendant les potentiels gains énergétiques associés à l'implantation de

TV minimales. Il est aussi observé que le niveau d'isolation que les TV procurent augmente non seulement avec l'épaisseur du substrat, mais aussi avec la réduction de la densité de celui-ci, plus de poches d'air isolantes étant présentes. De plus, la teneur en humidité du substrat peut également affecter les performances thermiques d'un TV. En effet, la conductivité thermique augmentant avec la teneur en eau, les substrats plus secs seraient de meilleurs isolants thermiques dans le contexte étudié. Encore une fois, il est suggéré que, dans une optique de gains de performances énergétiques et de réduction des GES, l'implantation de TV devrait prioritairement être faite sur de vieux bâtiments, ayant un toit de faible niveau d'isolation et une intéressante capacité structurelle résiduelle inutilisée.

D'autres études se sont intéressées aux performances des TV dans le nord de l'Italie. D'orazio *et al.* (2012) observent, dans le contexte géographique à l'étude, qu'un TV n'offre que peu de bénéfices en saison hivernale. Cependant, en été, il permet de réduire la température de surface du toit et l'amplitude des fluctuations. L'effet refroidissant, dû à l'effet combiné d'une réduction de l'albédo, d'une isolation supplémentaire associée au substrat, ainsi qu'à l'évapotranspiration et à l'ombrage du couvert végétal, ne permettrait tout de même pas une réduction supérieure des déperditions thermiques du toit par rapport à un toit conventionnel hautement isolé. Les auteurs concluent, qu'à l'instar de la précédente étude, les toits végétalisés devraient être implantés prioritairement sur les bâtiments existants ayant de faibles niveaux d'isolation de toit s'ils sont considérés dans une optique énergétique. Les résultats de l'étude de Barozzi *et al.* (2016) viennent supporter les conclusions de la dernière étude, suggérant de potentielles réductions de la consommation énergétique intéressantes en été, mais négligeables en hiver. Il y est aussi observé que l'espèce végétale cultivée sur un TV peut exercer une influence non négligeable sur la température de la surface du toit du bâtiment et, par le fait même, avoir un impact sur les phénomènes d'îlots de chaleur urbains.

Finalement, une étude de Jaffal *et al.* (2012) effectuée en France, montre que des conclusions similaires aux précédentes études peuvent être faites pour une maison unifamiliale. Le cas étudié démontre que l'utilisation d'un TV plutôt qu'un toit conventionnel induit un effet rafraichissant jusqu'à trois fois supérieur et permet une réduction maximale de 30°C de l'amplitude des fluctuations de la température de la surface du toit en été, ce qui aurait pour effet de réduire la température moyenne de l'air à l'intérieur de la maison de 2 °C et la demande énergétique annuelle de 6 %.

1.4.1.2.2 Cas particuliers en climats froids

Une étude faite par Pierre *et al.* (2010) a analysé les bénéfices de TV extensifs en contexte hivernal au Canada. Il y est premièrement observé, grâce à des mesures expérimentales prises lors de températures extérieures variant entre 0 °C et -25 °C, que le coefficient de résistance thermique d'un TV serait environ 37,5 % supérieur à celui d'un toit conventionnel de référence. Il y est également dénoté que l'épaisseur du substrat n'aurait, elle, qu'un impact marginal sur le niveau d'isolation du TV. En effet, presque aucune différence de performances énergétique n'est observée entre une couche de 100 mm et de 150 mm de substrat. Les résultats expérimentaux obtenus sont ensuite projetés à une étude de cas, soit un bâtiment commercial d'un étage qui occupe une superficie de 3 159 m² et est situé à Kingston, en Ontario. Il y est calculé que la réduction de la consommation énergétique du bâtiment, par l'ajout d'un TV extensif, serait de l'ordre de 3 %. Il est cependant proposé que les gains énergétiques pourraient être supérieurs en été, par la réduction de la demande de climatisation. Malgré les gains de performances énergétiques associés aux TV, ainsi que leur effet protecteur sur la membrane de toit, les auteurs rappellent qu'une analyse coût-avantage est importante pour ce type de projets, les coûts d'installation étant largement plus élevés pour un TV que pour un toit conventionnel, soit environ 2,5 fois supérieurs. Clark *et al.* (2008) montrent d'ailleurs, par l'entremise d'une étude de cas théorique visant plusieurs toits de bâtiments d'un campus au Michigan (États-Unis), que la valeur actualisée nette des

TV, après une période de vie utile estimée à 40 ans, serait typiquement de l'ordre de 20 % à 25 % inférieure à celle de toits conventionnels, c'est-à-dire que les investissements supérieurs nécessaires ne sont pas compensés par les bénéfices financiers encourus sur la durée de vie du projet.

Une étude expérimentale similaire de Teemusk et Mander (2009), effectuée cette fois en Estonie, démontre l'effet refroidissant que procure les TV dans un climat froid. Il y est observé, en été, une forte réduction de la fluctuation de températures de surface de toit pour un TV extensif, en comparaison à une membrane de toit en bitume. En automne et au printemps, le TV a également l'effet bénéfique de protéger la membrane de toit des fréquents cycles de gel et dégel. En hiver, le toit végétalisé y procure un effet isolant supérieur à la membrane de bitume, et ce, malgré une accumulation de neige. Une autre étude expérimentale similaire, effectuée par Arkar *et al.* (2015) à Ljubljana (Slovénie), démontre que les pertes thermiques d'un TV seraient également inférieures en hiver par rapport à un toit conventionnel ayant une valeur de coefficient de déperdition thermique équivalente. Selon les auteurs, cela s'explique par l'emmagasinage d'énergie latente, associée au changement de phases de l'eau accumulée dans le substrat du TV lors de cycles de gel et dégel, ainsi que la légèreté de construction du toit conventionnel considéré. Le TV réduit ainsi les écarts de températures des surfaces et les pics de demande en chauffage de l'installation expérimentale, particulièrement en période froide et pendant la nuit. Plus précisément, les auteurs observent une réduction maximale des déperditions thermiques de 40 % sur une base journalière et de 8 % à 14 % sur une base mensuelle pendant les périodes les plus froides.

L'étude de Tang et Qu (2016), qui s'intéresse à un TV existant en Indiana (États-Unis), tend à confirmer les résultats expérimentaux obtenus dans les études précédentes. Il y est observé, en comparaison à un toit conventionnel, des réductions de pertes thermiques du toit de 18 % pour la saison hivernale et de 15 % à 17 % pour l'ensemble

de l'année. Les auteurs suggèrent également qu'un changement de phase fréquent de l'eau contenue dans le substrat, par gel et dégel, pourrait être légèrement bénéfique aux performances énergétiques d'un TV. Une étude de Collins *et al.* (2017), effectuée en Finlande, démontre d'ailleurs que le gel aurait un impact positif sur la résistance thermique des TV. Il est toutefois observé que pendant les périodes où il y a accumulation de neige, les gains de performances énergétiques des TV sont grandement atténués et leur avantage sur les toits conventionnels ainsi réduit. Une étude expérimentale de Zhao *et al.* (2015), vient appuyer ces observations. Il y est spécifiquement analysé l'impact de l'accumulation de neige sur les performances énergétiques d'un TV en Pennsylvanie (États-Unis). La réduction des déperditions thermiques d'un TV en comparaison à un toit conventionnel passerait de 23 %, dans le cas où il n'y a pas d'accumulation de neige, à 5 %, dans le cas où il y a accumulation de neige. En résumé, les bénéfices sur le plan énergétique des TV s'en trouvent ainsi grandement réduits lorsqu'il y a accumulation de neige, cette dernière procurant un effet isolant supplémentaire.

À un niveau plus global, l'étude de Cubi *et al.* (2016) effectuée, quant à elle, une analyse de cycle de vie comparant l'installation de différentes technologies pouvant être implantées sur les toits, soit les TV, les toits blancs et les panneaux photovoltaïques, et ce, pour diverses villes canadiennes (Vancouver, Calgary, Toronto). L'étude démontre que, bien que l'installation de panneaux photovoltaïques serait une option à prioriser sur le plan environnemental pour l'ensemble des villes à l'étude, les TV offriraient tout de même, mais dans une moindre mesure, des bénéfices pour les bâtiments hôtes, en réduisant la consommation énergétique associée au chauffage et à la climatisation, alors que les toits blancs, eux, seraient à éviter dans les climats froids, étant associés à une augmentation des besoins en chauffage des bâtiments. Il est également à noter que les TV peuvent aider à réduire les phénomènes d'îlots de chaleur urbains en période estivale, et ce, même dans les villes avec un climat froid, comme le suggère l'étude de Bass et Baskaran (2003), menée dans la ville de Toronto (Canada). En effet, ces

derniers ont la capacité de réduire la température de l'air au niveau local par rapport à une surface minéralisée. Une adoption à grande échelle pour une certaine zone urbaine pourrait ainsi aider à réduire les besoins de climatisation de bâtiments contenus dans cette dernière. Les bénéfices énergétiques spécifiques associés seraient toutefois difficiles à évaluer.

Finalement, une méta-analyse effectuée par Erlend *et al.* (2018), qui effectue une revue de littérature d'études portant sur les performances énergétiques des TV en climats froids, vient rappeler plusieurs des observations précédemment décrites. Il y est noté que, de manière générale, l'effet isolant des TV est difficile à déterminer de manière exacte, étant fortement dépendant d'une multitude de paramètres physiques variables dans le temps (p. ex. les conditions météorologiques, le type de substrat, le type de végétation, le taux d'humidité du substrat, le niveau de couverture végétale, l'accumulation de neige de la toiture, les conditions de gel, etc.). La littérature semble généralement établir que, bien que les TV réduisent les flux thermiques avec la structure du toit, ces bénéfices seraient faibles pour les bâtiments bien isolés. Il y est conclu que les gains potentiels d'énergie seraient quasi négligeables en contexte nordique, considérant les hauts standards de construction et niveaux d'isolation des bâtiments, et que leur construction devrait être considérée principalement pour d'autres raisons, par exemple, pour une meilleure gestion des eaux pluviales urbaines.

1.4.1.3 Impacts énergétiques du type de substrat

Comme indiqué précédemment, les caractéristiques du substrat d'un TV peuvent exercer une influence sur les performances énergétiques de ce dernier. Une étude de Benedetta *et al.* (2017) effectue d'ailleurs une analyse de plusieurs types de substrats de TV. Il y est dénoté que la conductivité thermique d'un TV peut grandement varier selon le type de matériau, la composition, l'épaisseur, le taux d'humidité et la densité du substrat. Il y est observé que, de manière générale, les substrats typiquement utilisés sur les TV seraient plus performants sur le plan énergétique qu'un sol naturel. L'étude

de Coma *et al.* (2017) apportent aussi des conclusions similaires. Les auteurs, qui effectuent une étude visant à déterminer l'effet isolant de différents types de matériaux utilisés comme couche de drainage d'un toit végétalisé en climat méditerranéen, observent que la conductivité thermique serait fortement liée à la masse des matériaux. Les substrats ayant un contenu de matière organique plus faible auraient une meilleure capacité de stockage thermique, augmentant ainsi les délais de transferts thermiques vers le toit du bâtiment. Il est finalement conclu que chaque matériau possède des propriétés thermiques spécifiques qui peuvent influencer les performances globales d'un TV et que ces mêmes propriétés peuvent également varier en fonction des climats et de leur taux d'humidité. Ces études suggèrent ainsi que les impacts énergétiques des TV comestibles sur les bâtiments pourraient varier en fonction de leur type (extensif ou intensif) et de leur substrat.

1.4.1.4 Comparaison des performances énergétiques entre différents climats

Comme le démontrent les précédentes études, les bénéfices énergétiques associés aux TV seraient variables d'un climat à l'autre. Une étude effectuée par Moody et Sailor (2013) évalue d'ailleurs, à l'aide de simulations énergétiques, les impacts de l'implantation d'un TV à un nouvel immeuble de bureaux, et ce, pour plusieurs villes aux États-Unis, catégorisées en différentes zones climatiques ASHRAE, à savoir Portland (4C – climat océanique), Chicago (5A – climat froid et humide), Atlanta (3A – climat chaud et humide) et Houston (2A – climat chaud et humide). Les résultats obtenus suggèrent que des économies d'énergie nettes seraient obtenues, par rapport à un toit conventionnel, pour les villes situées en climats chauds d'Atlanta et de Houston. Des économies énergétiques inférieures sont observées pour Chicago, qui a des hivers froids et rigoureux et des températures moins élevées que les villes précédentes durant le printemps, l'été et l'automne. Finalement, dans un climat tempéré et humide comme celui de Portland, des économies nettes négatives sont observées par rapport à un toit conventionnel, étant donné l'effet refroidissant, causé par l'évapotranspiration des

plantes, augmentant la demande en chauffage en saisons intermédiaires (printemps et automne). Une autre étude, effectuée par Ascione *et al.* (2013), effectue quant à elle une analyse de faisabilité économique des TV sur des édifices à bureaux, et ce, pour différents types de végétation, revêtements externes et climats. Encore une fois, il est montré que le potentiel de rentabilité économique est marginal pour les bâtiments bien isolés, étant donné des investissements initiaux importants et de faibles gains de performances énergétiques. De plus, il y est observé que, même dans un climat froid, les TV apportent davantage de bénéfices en climatisation qu'en chauffage. Une réduction de la demande énergétique annuelle moyenne de l'ordre de 1 % à 6 % y est proposée pour la ville d'Oslo (Norvège).

En résumé, il semble que les principaux bénéfices des TV, concernant les performances énergétiques des bâtiments et le confort de leurs occupants, semblent essentiellement associés à la réduction de la demande de climatisation et/ou de la température intérieure. Cette réduction de la demande en climatisation serait particulièrement efficace dans le cas de bâtiments mal isolés et situés en climats chauds. L'effet refroidissant d'un TV, associé à l'ombrage occasionné par le couvert végétal, l'évapotranspiration de la végétation et, dans une moindre mesure, l'augmentation du niveau d'isolation du toit. En climats froids, les TV sembleraient avoir des impacts encore moindres quant aux performances énergétiques des bâtiments, étant donné le niveau d'isolation typiquement supérieur de ces derniers. L'effet rafraichissant des TV pourrait même nuire au bilan énergétique net de ces derniers dans certains contextes. De manière générale, les gains énergétiques du bâtiment hôte ne semblent pas justifier en soi les investissements initiaux et les coûts de maintenance nécessaires pour le propriétaire d'un bâtiment, mais peuvent tout de même s'avérer une intéressante alternative écologique aux toits conventionnels, étant donné la multitude d'autres bénéfices sociaux et environnementaux associés.

1.4.2 Agriculture urbaine en environnements contrôlés

L'agriculture effectuée en environnement contrôlé offre une multitude d'avantages en contexte urbain, notamment la possibilité d'atteindre des rendements de production élevés sur de petites surfaces. Les diverses techniques existantes ont toutefois également leurs désavantages et limitations. Ces différents éléments sont discutés de manière plus détaillée dans la présente section.

1.4.2.1 Serres

Les serres urbaines, comme celles des fermes Lufa, à Montréal (voir la figure 1.4), ou des fermes Gotham Greens, à New York, sont une autre des solutions communément proposées en AUC. L'hydroponie, méthode de culture typiquement utilisée dans ce type de projets, est souvent perçue comme la technologie ayant le meilleur potentiel de développement en AU (Devi et Ranka, 2016). Selon certains, une serre sur toit (ST) pourrait également offrir plusieurs avantages en comparaison à une serre conventionnelle installée au sol.

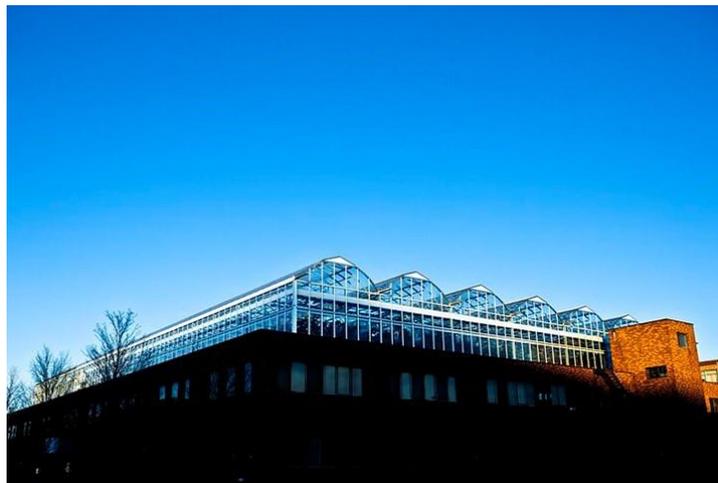


Figure 1.4 – Serre de Ahuntsic des Fermes Lufa à Montréal, première serre sur toit au monde (Fermes Lufa, 2012)

1.4.2.1.1 Aperçu de l'industrie de la serriculture au Québec et au Canada

Selon Agriculture et Agroalimentaire Canada (2019), le secteur de la serriculture est celui connaissant la croissance la plus importante de tous les secteurs horticoles au Canada. En 2018, 660 535 tonnes métriques légumes de serre ont été commercialement produites par 866 serres réparties sur environ 17,5 millions de mètres carrés. Les ventes associées à ces produits représentaient 1,5 milliard de dollars. La majorité de la production provenait de la province de l'Ontario (69 %), de la Colombie-Britannique (18 %), du Québec (6 %) et de l'Alberta (6 %). Il s'agirait également, dans le créneau des fruits et légumes frais, du secteur ayant les plus hautes valeurs d'exportation, dépassant le milliard de dollars. Les légumes les plus cultivés dans les serres du pays, en ce qui a trait à la superficie de production, étaient la tomate (38 %), le poivron (32 %) et le concombre (26 %), alors que le reste des productions plus marginales représentaient 4 % de la superficie cultivée.

Au Québec, en 2018, il y avait 238 exploitations de fruits et légumes de serre réparties sur une superficie supérieure à 1,2 million de mètres carrés, soit 7 % de la superficie récoltée en serre au Canada, dont la production représentait plus de 142 millions de dollars (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2019). Le secteur de la serriculture au Québec est caractérisé par une certaine diversité, tant en ce qui concerne les produits offerts que les tailles d'opération des entreprises. En effet, selon le MAPAQ (2018), en 2015, des 447 exploitations serricoles répertoriées au Québec, plus de 60 % avaient une superficie de moins de 1 000 m², alors qu'environ 7 % d'entre elles avaient une superficie supérieure à 10 000 m² (1 hectare), mais occupaient près de 75 % des surfaces exploitées en serre au Québec. La superficie moyenne des opérations spécialisées en serriculture au Québec était de 3 100 m². Tout comme dans le reste du pays, la tomate y était le légume cultivé sur la plus grande superficie (61 hectares), suivi par la laitue (12,2 hectares), le concombre (11,4 hectares) et le poivron (4,2 hectares), faisant du Québec le principal producteur de laitues de serre au Canada.

Toujours en 2015, selon les Producteurs en serre du Québec (2020a), des 685 producteurs enregistrés, 345 entreprises étaient spécialisées en cultures ornementales (50 % de la superficie cultivée), 190 entreprises étaient spécialisées en production de fruits et légumes (28 % de la superficie cultivée), alors que 150 entreprises avaient une production mixte (22 % de la superficie cultivée).

Selon l'UPA (2017), il y aurait encore un important potentiel de développement du secteur de la serriculture au Québec au cours des prochaines années, notamment grâce à d'excellentes perspectives de marchés à développer, un engouement grandissant pour l'agriculture urbaine, biologique et/ou de proximité, ainsi qu'à d'autres facteurs socioéconomiques favorables, notamment l'accès à une énergie électrique abordable et propre. Les Producteurs en serre du Québec (2020b), dans leur Plan d'action 2019-2020, ont d'ailleurs annoncé leurs intentions de doubler les ventes du secteur serricole d'ici 2025, pour atteindre approximativement 600 millions de dollars. Pour y arriver, ils misent sur un meilleur accès au financement et sur de meilleurs appuis financiers gouvernementaux, ainsi qu'à une augmentation de la part de l'électricité dans le mix énergétique de l'industrie par l'accès à une tarification plus avantageuse et par l'encouragement de diverses mesures d'innovations technologiques, notamment en ce qui concerne l'éclairage et le chauffage, afin de rendre plus compétitives les entreprises.

Selon le MAPAQ (2020c), ce plan d'action s'aligne d'ailleurs avec les intentions du gouvernement provincial visant, non seulement une relance économique, mais aussi une grande autonomie alimentaire. En effet, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) et le ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) ont récemment conjointement dévoilé la Stratégie de croissance des serres au Québec 2020-2025. Cette dernière vise, par l'entremise d'importants investissements, à doubler la superficie de serres commerciales au Québec d'ici 2025, mais aussi à favoriser la création ou l'expansion d'entreprises rentables de toutes tailles, à moderniser les infrastructures existantes et à stimuler la production biologique et la

recherche et développement dans cette industrie. Toujours selon le MAPAQ (2020c), les mesures incitatives prévues devraient contribuer à atteindre certaines des cibles de la Politique bioalimentaire 2018-2025 du Québec, entre autres, augmenter l'offre de fruits et légumes de provenance locale dans les marchés et augmenter de 10 milliards de dollars les ventes de denrées alimentaires produites et achetées au sein de la province. Pour atteindre ces objectifs, plusieurs programmes d'aides financières et de soutien seront ainsi progressivement mis en place à partir de 2020-2021. Un de ces programmes vise, plus spécifiquement, à apporter du soutien aux producteurs nécessitant une extension du réseau de distribution électrique, afin de favoriser l'utilisation d'électricité propre aux dépens des énergies fossiles. Conjointement à cette initiative, le principal producteur d'électricité de la province, Hydro-Québec, a élargi en 2020 son offre de tarification avantageuse à de plus petits producteurs en serre (Hydro-Québec, 2020a). Selon la société d'État, cette tarification permettra à plus de 1 000 producteurs supplémentaires d'accéder à une source d'énergie de chauffage abordable et propre, en alternative au gaz naturel ou au mazout, ainsi que de réduire les coûts d'éclairage photosynthétique, afin que plus d'entreprises puissent produire toute l'année.

Un rapport de l'UPA (2017) rappelle d'ailleurs que le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique du secteur de l'agriculture est, de manière générale, encore considérable, sachant que de 1990 à 2015 la part des coûts en énergie a représenté environ 8 % des dépenses des exploitations agricoles québécoises. La proportion des dépenses relatives à la consommation énergétique peut toutefois s'avérer d'autant plus élevée dans le secteur de la sericulture, comme le démontre une étude du MAPAQ (2003) portant sur les coûts de production de la tomate de serre au Québec. En 2001, à la suite à l'analyse d'une vingtaine d'opérations serricoles de superficies variant de 1 000 à 6 000 m², les coûts de consommation énergétique représentaient en moyenne 22 % des coûts d'exploitation totaux de ces entreprises. De manière générale, la sericulture serait le secteur agricole le plus énergivore, les coûts énergétiques pouvant représenter en moyenne de 15 % à 30 % des coûts totaux d'exploitation (Consultants

G.T. & Associés Inc., 2008). Ces coûts énergétiques sont en grande partie associés au maintien de conditions climatiques appropriées au sein de la serre (Berger *et al.*, 2011). Il est à noter que le chauffage des serres était, encore en 2015, majoritairement assuré par des sources d'énergies fossiles, comme le gaz naturel ou le mazout (UPA, 2017). La consommation énergétique annuelle d'une serre opérant 12 mois par année au Québec, bien qu'elle puisse varier de manière non négligeable en fonction d'une multitude de facteurs techniques et opérationnels, est d'en moyenne de l'ordre de 850 kWh/m² (3060 MJ/m²) (Brault *et al.*, 1989; Proulx-Gobeil et Dion, 2015).

Selon le MAPAQ (2018), le profil de consommation énergétique des producteurs en serre au Québec, lorsque comparé à celui de producteurs dans les autres provinces au Canada, se caractérise généralement par une plus grande utilisation d'électricité. Ceci s'explique en grande partie par le fait que les producteurs québécois profitent de tarifs d'électricités plus avantageux, leur permettant ainsi de recourir de manière rentable à l'éclairage artificiel, essentiel pour la culture en période hivernale. En 2015, plus de 40 % de la superficie cultivée en serre au Québec utilisaient de l'éclairage artificiel. Les dépenses associées à la consommation énergétique d'une serre commerciale peuvent varier grandement en fonction de la taille des opérations, des technologies utilisées et de la période de culture, les serres opérant 12 mois par année ayant généralement des besoins de chauffage et d'éclairage beaucoup plus élevés que celles n'opérant que du printemps à l'automne. Au Québec, étant donné les importants coûts associés au chauffage des serres, les producteurs opérant à l'année durant se tourneraient, de plus en plus, vers des méthodes de chauffage moins conventionnelles et plus environnementales, telles que par la biomasse et la récupération de rejets thermiques industriels. De plus, certaines technologies encore au stade de développement en ce qui a trait à leur application à grande échelle dans le secteur de la serriculture, par exemple, la géothermie, l'éclairage par diode électroluminescente (DEL) et la robotisation de certains équipements, pourraient permettre davantage d'efficacité en matière d'énergie.

1.4.2.1.2 Aperçu de la serriculture urbaine commerciale au Canada et dans le monde

La serriculture commerciale en contexte urbain est une industrie relativement récente. Selon Cohen *et al.* (2021), les premières entreprises œuvrant dans ce secteur ne seraient apparues qu'au début des années 2010 et la multiplication de telles opérations se serait accélérée vers 2015. Ce secteur gagne ainsi en popularité depuis un dizaine d'années, notamment en Amérique du Nord et en Europe, tant pour des raisons écologiques, que socioéconomiques, s'inspirant des mouvements de transition écologique et d'économie circulaire. L'étude de Cohen *et al.* (2021) recensait, en 2021, 26 entreprises serricoles urbaines à travers le monde, ayant des opérations réparties dans une quarantaine de sites différents. De ce nombre, 8 entreprises opéraient des ST dans 14 différents emplacements. Les auteurs font également état de plusieurs nouvelles ST présentement en construction, particulièrement en France. La figure 1.5 présente la répartition géographique des différentes opérations identifiées dans l'étude.

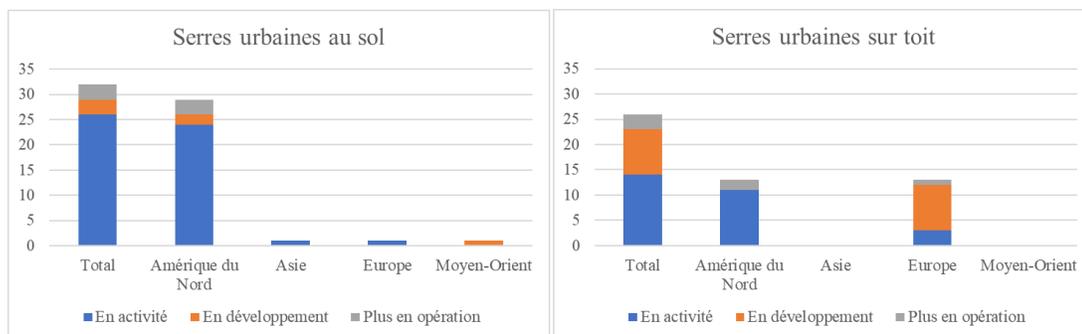


Figure 1.5 – Répartition mondiale des sites de production maraîchère en serre urbaine au sol (à gauche) et sur toit (à droite) répertoriés dans l'étude de Cohen *et al.* (2021)

Cohen *et al.* (2021) observent également une grande disparité quant aux tailles de ces opérations, tant pour les serres urbaines commerciales implantées au sol que celles installées sur les toits. Les superficies des serres au sol, d'un échantillon de 23 opérations localisées en Amérique du Nord, variaient entre 75 m² et 15 000 m² (valeur médiane de 2 800 m²), alors que les superficies moyennes étaient de l'ordre de 7 500 m², 2 200 m² et 6 000 m² respectivement pour les États-Unis, le Canada et le

Québec. Similairement, les superficies de ST commerciales, d'un échantillon de 13 opérations localisées en Amérique du Nord et en Europe, variaient entre 80 m² et 15 200 m² (valeur médiane de 1 600 m²). Environ 31 % des ST avaient une superficie de plus de 5 000 m², alors que 38 % d'entre elles avaient une superficie inférieure à 800 m². La plupart des entreprises opéraient des serres urbaines plus petites que 1 000 m², mais la majorité de la superficie totale répertoriée était associée à une minorité d'entreprises possédant des installations de plus de 10 000 m².

1.4.2.1.3 Considérations et viabilité économique de la serriculture urbaine

L'implantation de serres en milieux urbains comporte son lot de contraintes par rapport à celles construites en milieux ruraux. Ces projets nécessitent généralement des études préalables poussées et devraient être traités au cas par cas. Selon Seguin *et al.* (2021), des surcoûts initiaux et des considérations supplémentaires sont à prévoir en ville, notamment en raison du contexte foncier particulier (coûts des terrains et disponibilité restreinte de l'espace), de normes de construction plus exigeantes, d'une potentielle augmentation des besoins en éclairage artificiel (la luminosité pouvant être réduite due à l'architecture environnante et à l'ajout d'éléments structuraux supplémentaires pour répondre aux codes de construction applicables), de même que de potentiels besoins d'analyse et de décontamination du sol, particulièrement pour une culture effectuée en plein sol. D'autre part, toujours selon Seguin *et al.* (2021), les ST, bien qu'elles aient l'avantage d'occuper des espaces urbains largement sous-valorisés, rencontrent également plusieurs embûches. Par exemple, les règlements d'urbanisme peuvent restreindre le droit d'ériger de telles structures à certaines zones industrielles de la ville, de même qu'imposer certaines restrictions quant à l'éclairage artificiel, pouvant être considéré comme une forme de pollution visuelle. Il est également à noter que les bâtiments sont rarement conçus de manière à accueillir une telle surcharge sur leur toit, ce qui peut entraîner la nécessité de renforcer la structure du toit pour en augmenter la capacité portante. De plus, l'utilisation de matériaux plus légers est généralement

privilegiée pour la structure de la serre, par exemple, l'aluminium plutôt que l'acier galvanisé, entraînant également des surcoûts non négligeables. Finalement, il est également à noter que la construction en hauteur est plus coûteuse que celle au sol, entraînant typiquement des coûts de l'ordre de 30 % à 40 % plus élevés (Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013).

En ce qui a trait au contexte particulier du Québec, les études du Syndicat des producteurs en serre du Québec (2013) et de Seguin *et al.* (2021) rappellent que les serres implantées en milieux urbains sont soumises au Code national de construction du bâtiment (CNB), contrairement aux serres en milieux agricoles qui sont, elles, soumises au Code national de construction des bâtiments agricoles (CNCBA). Certaines spécificités réglementaires, notamment relatives à la Régie du bâtiment du Québec (RBQ) et aux municipalités elles-mêmes, peuvent également entrer en jeu dans certaines situations. Les auteurs notent que le CNB implique des exigences supérieures au CNBA, pouvant entraîner une augmentation considérable des coûts de construction. À titre d'exemples, il exige une capacité portante de neige environ quatre fois supérieure et, dans certaines situations, requiert l'installation de systèmes de gicleurs pour la protection contre les incendies. De plus, si la serre est implantée au toit, l'installation d'accès, soit des escaliers ou des ascenseurs, doit aussi être considérée. Finalement, dans certains cas, l'utilisation de matériaux de recouvrement plastiques (p. ex. le polycarbonate), bien qu'ils soient typiquement plus légers et abordables que le verre et fréquemment utilisés dans l'industrie serricole, peut impliquer des considérations supplémentaires en matière de protection incendie, voire être limitée ou interdite, ce type de matériau étant considéré comme inflammable, comme mentionné dans le Code national de prévention des incendies (Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, 2015).

En considérant l'ensemble de ces facteurs, au Québec, les coûts de construction d'une serre urbaine au sol et sur toit peuvent ainsi s'avérer respectivement environ 2 à 3 fois

et 4 à 5 fois supérieurs à ceux d'une serre au sol de dimensions équivalentes en zonage agricole, alors que les coûts opérationnels, eux, seraient similaires pour l'ensemble de ces scénarios (Seguin *et al.*, 2021; Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013). De tels surcoûts initiaux semblent mener à des périodes d'amortissement prolongées et une rentabilité réduite pour les serres urbaines, ou encore à la nécessité d'utiliser des stratégies d'affaires favorisant une marge de profit supérieure à celle des modèles conventionnels (p. ex. les circuits courts et la vente directe), bien que certains bénéfices financiers puissent être tirés en contexte urbain, notamment sur le plan énergétique. Néanmoins, selon une étude menée par Autogrow et Agritecture Consulting (2020), soit une enquête internationale auprès d'une multitude d'entreprises d'agriculture en intérieur, environ 58 % des entreprises interrogées opérant des ST considéraient avoir atteint ou dépassé le seuil de rentabilité, suggérant que des modèles d'affaires adaptés pourraient contrebalancer les importants investissements initiaux nécessaires au démarrage.

1.4.2.1.4 Bénéfices potentiels de l'implantation de serres sur les toits de bâtiments

Il y a un nombre assez restreint d'études portant sur les ST et la plupart d'entre elles ont été effectuées dans des climats chauds. Au regard des conclusions de ces études, dans certains contextes, les ST présenteraient tout de même d'intéressants bénéfices potentiels, tant sur le plan énergétique qu'environnemental. Elles offriraient, notamment, plusieurs avantages par rapport aux complexes traditionnels de serres commerciales. Quelques études d'analyse de cycle de vie (ACV) ont été effectuées sur ces dernières, particulièrement en climat méditerranéen et/ou chaud. Il est à noter que la tomate est régulièrement considérée comme unité de référence dans les ACV, étant une des cultures en serre les plus rentables et répandues (Canakci et Akinci, 2006). Ces analyses démontrent que, étant donné une production plus locale, les impacts environnementaux et les coûts liés à la distribution et la mise en marché des produits (transport et emballage) des serres urbaines sont réduits (Benis *et al.*, 2017; Montero *et*

al., 2012). Considérant l'ensemble de ces facteurs, en climat méditerranéen, tel qu'à Barcelone (Espagne), Sanyé-Mengual *et al.* (2013) estiment d'ailleurs que l'implantation de ST pourrait entraîner des économies de l'ordre de 66 tonnes de CO_{2eq} par hectare, en considérant le potentiel de réchauffement climatique, voire de 71 tonnes de CO_{2eq} par hectare si les impacts associés à la déforestation et/ou à la dénaturalisation des terres sont également pris en compte.

Des études se sont intéressées plus spécifiquement à une serre expérimentale intégrée au toit de l'Université autonome de Barcelone, d'une superficie d'environ 123 m². L'étude de Nadal *et al.* (2017) montre que la récupération des pertes thermiques du bâtiment par la serre permettait le maintien de conditions de culture acceptables lors des mois d'automne et d'hiver, et ce, sans système de chauffage d'appoint, impliquant par le fait même une importante réduction des émissions de GES comparativement une serre conventionnelle qui utiliserait une source d'énergie fossile pour maintenir des conditions équivalentes. L'environnement de la ST en question n'étant pas complètement contrôlé, n'ayant pas de systèmes de chauffage et d'éclairage artificiel, Sanjuan-Delmás *et al.* (2018) rapportent toutefois des performances environnementales inférieures lors des mois d'hiver, soit des rendements environ trois fois inférieurs à ceux du printemps pour la culture hydroponique de tomates. Les auteurs expliquent cet écart par les variations saisonnières des températures et de la luminosité naturelle. La ST a tout de même démontré qu'elle pouvait produire en moyenne 30,2 kilogrammes de tomates par mètre carré sur 15,5 mois, et ce, malgré des températures hivernales moyennes de 8°C, et qu'elle pouvait répondre à la demande annuelle en tomates de 110 personnes, soit 60 % des occupants du bâtiment hôte de 6 étages et de 7 500 m² (Sanjuan-Delmás *et al.*, 2018). De plus, Piezer *et al.* (2019) établissent que les performances environnementales de cette même ST seraient toutefois fortement liées à la provenance de l'énergie utilisée et au recyclage des divers intrants de production. Pour les auteurs de cette étude, les deux moyens les plus efficaces pour réduire les impacts environnementaux d'une telle installation seraient d'augmenter la part

d'énergie renouvelable dans le mix énergétique des opérations et d'augmenter le recyclage de l'énergie (récupération de la chaleur du bâtiment) et de la matière (récupération des intrants de production). Montero *et al.* (2017) suggèrent, quant à eux, qu'étant donné de nombreux éléments présents dans la ST à l'étude qui obstruent l'entrée de la lumière naturelle, il y a une transmission réduite de cette dernière aux plantes cultivées, comparativement à une serre conventionnelle sur sol qui serait située dans la même région, ce qui peut avoir un impact non négligeable sur les rendements de culture. Cet inconvénient serait néanmoins compensé par les gains énergétiques effectués, particulièrement en périodes nocturnes, étant donné la symbiose énergétique entre la serre et le bâtiment. La récupération de la chaleur d'un bâtiment sur lequel est intégrée une serre semblerait, ainsi, un paramètre clé quant aux gains de performances par rapport aux serres conventionnelles. De manière générale, la ST étudiée montrerait globalement de meilleures performances environnementales qu'une serre équivalente sur sol. En effet, selon Sanjuan-Delmás *et al.* (2018), les impacts environnementaux seraient de 50 % à 75 % inférieurs dans 5 des 6 catégories d'impacts environnementaux étudiés (changements climatiques, écotoxicité, acidification terrestre, eutrophisation de l'eau douce, eutrophisation de l'eau de mer, épuisement des ressources fossiles) et les émissions de GES seraient de l'ordre de 0,58 kg CO₂éq plutôt que de 1,7 kg CO₂éq pour la production d'un kilogramme de tomates.

Une autre analyse, effectuée cette fois dans le contexte de Lisbonne (Portugal) par Benis *et al.* (2017), fait la comparaison de la culture de tomates pour cinq différents scénarios, soit une serre sur sol *low-tech* (non conditionnée avec culture en sol) représentant une chaîne de distribution conventionnelle, une ST *low-tech* (non conditionnée avec culture en sol), une ST *high-tech* en polycarbonate (chauffée, éclairée avec culture hydroponique), ainsi que des fermes d'agriculture verticale (AV) hydroponique avec et sans fenestration. Les auteurs concluent que la ST *high-tech* et l'AV avec de l'éclairage naturel seraient les solutions les plus performantes d'un point de vue environnemental, divisant respectivement en trois et en deux les émissions de

GES en comparaison à une chaîne d'approvisionnement conventionnelle, et suggèrent que la réhabilitation de vieux bâtiments en espaces d'agriculture intérieure pourrait s'avérer une alternative écologiquement viable dans certains cas, d'autant plus que la production urbaine d'aliments serait plus bénéfique d'un point de vue holistique que la production d'électricité.

De plus, une étude d'Il-Seok *et al.* (2018) montre aussi l'intéressant potentiel de synergie entre un bâtiment et une serre, encore dans un climat chaud. Il y est déterminé, à l'aide de simulations numériques, que la récupération de la chaleur produite par les refroidisseurs d'un bâtiment permettrait de combler une part non négligeable des besoins en énergie de refroidisseurs climatisant une ST située sur ce dernier.

Finalement, il semble ainsi que plusieurs études effectuées en climats chauds suggèrent que la production en serres urbaines intégrées aux bâtiments pourrait s'avérer globalement plus performante énergétiquement que les serres conventionnelles. Plusieurs des bénéfices présentés précédemment sont d'ailleurs également cités par les Fermes Lufa, entreprise spécialisée en serriculture urbaine dans la région de Montréal. En effet, cette dernière affirme que ses ST consomment environ 50 % moins d'énergie que les serres conventionnelles sur sol étant donné, notamment, la récupération passive des pertes de chaleur du toit du bâtiment hôte et des températures nocturnes typiquement plus élevées en zones urbaines que rurales, de même que l'utilisation de certaines technologies, comme des systèmes de chauffage au gaz naturel plus efficaces et des rideaux isolants spécialement conçus, déployés en périodes nocturnes et froides (Fermes Lufa, 2020b). L'entreprise rappelle également que plusieurs avantages, outre ceux associés à l'efficacité énergétique, découlent de son modèle d'affaires visant une clientèle de proximité (p. ex. une réduction de l'emballage, des distances de livraison, des pertes et du gaspillage alimentaire), l'utilisation efficace et bénéfique de l'espace urbain (p. ex. la valorisation d'espaces autrement inutilisés et la réduction des îlots de chaleur) et des pratiques agronomiques durables (p. ex. la réduction de la

consommation d'eau par la recirculation et la non-utilisation de pesticides de synthèse par la lutte parasitaire biologique).

1.4.2.2 Agriculture verticale intérieure dans une structure bâtie

Selon Kozai *et al.* (2019), l'AV en environnement contrôlé est généralement pratiquée dans un espace hermétique et isolé thermiquement communément appelé *plant factory*, par exemple, dans un bâtiment ou un conteneur. La culture des plantes, souvent des légumes et des fines herbes, y est faite de manière étagée, dans une optique d'efficacité spatiale. Les conditions environnementales (température, humidité, taux de CO₂ et luminosité) y sont maintenues stables grâce à des équipements mécaniques et d'éclairage. Elle permet généralement d'atteindre des rendements de culture par superficie de plancher inégalés, c'est-à-dire jusqu'à 100 fois supérieurs à l'agriculture sur sol, n'étant pas influencée par les conditions climatiques extérieures et pouvant accueillir des méthodes de culture plus performantes et qui utilisent efficacement l'espace, comme l'hydroponie. Elle assure généralement des conditions de culture plus stables et une meilleure conservation de certaines ressources, notamment la chaleur, l'eau et le CO₂, en comparaison à la culture en serre, dont la productivité et les opérations sont fortement impactées par le rayonnement solaire, variable dans le temps. En contrepartie, l'AV en environnement contrôlé ne profite toutefois peu ou pas de l'énergie solaire, essentielle à la photosynthèse des plantes, augmentant du fait même grandement les besoins en éclairage artificiel. De plus, toujours selon Kozai *et al.* (2019), les coûts d'investissements initiaux et d'opération élevés ne justifieraient pas, dans bien des cas, leur implantation à l'échelle commerciale, mais le développement de technologies d'éclairage plus performantes et moins coûteuses pourrait rendre l'AV intérieure plus rentable dans les prochaines années.

D'ailleurs, la rentabilité de telles opérations semblerait de plus en plus atteignable. En effet, selon la récente étude de Autogrow et Agritecture Consulting (2020), portant sur des entreprises agricoles utilisant divers types d'environnements contrôlés à travers le

monde, environ 62 % des entreprises interrogées effectuant de l'AV intérieure considéraient avoir atteint ou dépassé le seuil de rentabilité, proportion augmentant à 72 % pour celles effectuant de l'AV en conteneurs. L'étude de Cohen et Duchemin (2021), qui effectue une revue de littérature de diverses études de cas d'agriculture intérieure, fictifs et réels, dénote que les coûts d'exploitation de telles entreprises sont souvent principalement associés à la consommation d'énergie et à la main d'œuvre et, dans une moindre mesure, au matériel. Les auteurs remarquent également une certaine disparité entre les différentes études analysées, relative à la répartition des coûts d'exploitation. De plus, il y est observé que les des coûts de main-d'œuvre sont généralement proportionnellement plus élevés pour les cas réels que fictifs, représentant généralement plus du tiers, voire près de la moitié des coûts d'exploitation totaux, suggérant que les entreprises en démarrage pourraient avoir tendance à sous-estimer ces derniers. Les auteurs rappellent également que les entreprises de maraîchage intérieur optant de s'installer dans un bâtiment choisiront généralement d'installer leurs espaces de production, soit en location dans un bâtiment existant, où plusieurs travaux de réaménagement et l'installation d'équipements spécialisés seront typiquement requis, soit dans des bâtiments construits sur mesure et plus adaptés à l'accueil de telles opérations, nécessitant cependant des investissements initiaux largement supérieurs.

Une étude effectuée par Eaves et Eaves (2018) rapporte d'ailleurs d'intéressants éléments qui semblent confirmer la potentielle rentabilité de ce genre d'opérations, cette fois en contexte québécois. Cette dernière étudie le cas théorique d'une ferme intérieure en AV située dans la ville de Québec et fait l'analyse de sa rentabilité. L'analyse économique qui y est effectuée montre qu'une opération d'AV intérieure de laitues pourrait s'avérer globalement aussi rentable qu'une opération en serre conventionnelle d'une superficie de culture équivalente, étant donné le contexte énergétique particulier du Québec. En s'intéressant plus spécifiquement aux consommations énergétiques des scénarios étudiés, on observe que, pour une superficie

de culture de 1 171 m², la ferme intérieure consommerait annuellement 1 198 129 kWh (4 313 GJ) d'électricité et 3 948 m³ de gaz naturel (150 GJ), alors que la serre consommerait 176 777 kWh (636 GJ) d'électricité et 226 077 m³ de gaz naturel (8 566 GJ). La consommation électrique serait donc beaucoup plus importante pour la ferme intérieure que pour la serre, étant donné les importants besoins en éclairage et en refroidissement. Cependant, les besoins en chauffage, assurés par le gaz naturel, s'en trouveraient grandement réduits. Les besoins en énergie et les émissions de GES s'avéreraient ainsi moindres pour la production d'une même quantité de laitues.

1.4.3 Comparaison entre différentes méthodes d'agriculture urbaine

Certaines études se sont intéressées à comparer différentes méthodes d'AUC entre elles. C'est le cas de l'analyse coût-avantage de Benis *et al.* (2018), effectuée dans le contexte de Lisbonne, au Portugal. L'étude compare multiples scénarios d'implantation de différentes technologies sur les toits de bâtiments sur une période de 50 ans, soit des TV comestibles intensifs, des ST *low-tech* non conditionnées, des ST *high-tech* chauffées et éclairées, de même que de panneaux photovoltaïques. Les auteurs rappellent certains des bénéfices et contraintes associés à chacune des méthodes d'agriculture analysées. En effet, les TV permettraient de réduire les débordements d'eau des toits, le ruissellement urbain, les îlots de chaleur, la pollution, l'acidité des pluies, ainsi que d'améliorer la biodiversité urbaine. Les serres urbaines intégrées aux bâtiments permettent, quant à elles, de produire de la nourriture avec de hauts rendements. Il est dénoté que la culture en serre dans les climats tempérés permet de cultiver une multitude de fruits et de légumes, et ce, dans des serres non conditionnées. En contrepartie, dans les climats froids, les surcoûts associés à la demande énergétique supérieure des serres, associés à un plus grand contrôle du climat, peuvent s'avérer une limitation majeure à leur implantation. Les résultats indiquent que la viabilité économique serait fortement liée aux rendements de production, mais aussi aux modèles de distribution et aux prix locaux de la nourriture et de l'électricité. Il y est

aussi rappelé que les rendements peuvent être affectés à la baisse en contexte urbain, étant donné l'ombrage occasionné par les éléments environnants. Les résultats de l'étude montrent que l'installation de panneaux solaires permettrait une réduction plus de dix fois supérieure à la production alimentaire. Les TV et les ST *low-tech* permettent, néanmoins, une réduction des émissions de GES comparativement à des méthodes conventionnelles d'agriculture. Les ST *high-tech* auraient, quant à elles, plutôt un impact négatif sur les émissions de GES par mètre carré occupé, lorsqu'elles sont comparées aux TV et aux ST *low-tech*. Les auteurs suggèrent tout de même que, de manière générale, la production de nourriture sur les toits apporterait globalement plus de bénéfices socioéconomiques que la production d'électricité. De plus, l'implantation de ST *high-tech* serait l'option qui offrirait globalement les meilleures perspectives financières et pourrait réduire de moitié les émissions de GES de la production en poids équivalent de tomates, comparativement aux méthodes conventionnelles, et ce, lorsque l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement est pris en considération. Toutefois, seules les cultures de haute valeur, à croissance rapide et à faible empreinte seraient potentiellement rentables, contrairement aux céréales et aux cultures à croissance lente.

Une autre étude, de Graamans *et al.* (2018), propose une comparaison de la culture de la laitue intérieure à celle effectuée en serres équivalentes pour trois emplacements ayant des conditions climatiques différentes, soit la Suède, les Pays-Bas et les Émirats arabes unis. Il y est établi que, de manière générale, l'agriculture intérieure serait plus performante qu'en serre sur le plan de l'efficacité de l'utilisation des ressources, c'est-à-dire l'énergie, l'eau, le CO₂ et l'usage des terres. Toutefois, la culture intérieure consommerait tout de même une plus grande quantité d'énergie de manière absolue que la serre, étant donné les besoins élevés en électricité associés à l'éclairage artificiel, et ce, même dans un climat froid comme en Suède. Les serres ont l'important avantage d'utiliser de l'énergie solaire gratuite pour la photosynthèse des plantes. Ce serait avant tout la rareté des ressources locales qui détermine la viabilité du système de production choisi, l'AV intérieure étant avantagée quand il y a moins d'énergie solaire disponible.

En contrepartie, une étude d'ACV effectuée par Goldstein *et al.* (2016a), comparant plusieurs méthodes pour la culture de tomates et de laitues dans des climats tempérés froids, soit à New York et à Boston, suggère toutefois que l'AU pourrait, de manière générale, moins bien performer que l'agriculture conventionnelle, soit parce qu'elle nécessite de grandes quantités d'énergie, particulièrement en hiver (chauffage et éclairage artificiel) et/ou parce qu'elle n'offre pas de rendements intéressants justifiant les investissements élevés. Différents scénarios d'AU y sont analysés, plus spécifiquement un jardin urbain sur sol, une serre urbaine conditionnée sur sol, une ferme intérieure en AV, un TV comestible et une ST conditionnée. Les serres chauffées urbaines seraient les scénarios analysés dont les indicateurs environnementaux associés aux changements climatiques et à l'épuisement des ressources fossiles ont obtenu les pires résultats. Ces mauvaises performances seraient essentiellement dues à l'utilisation directe et indirecte d'une grande quantité d'énergies fossiles, notamment pour le chauffage et l'éclairage, et ce, malgré la récupération théorique d'une quantité importante d'énergie résiduelle provenant du bâtiment hôte, soit environ la moitié de l'énergie de chauffage. Les gains énergétiques en transport étant généralement fortement contrebalancés par les intrants énergétiques et de production, comme les fertilisants et l'eau, les auteurs laissent entendre que l'AU ne serait peut-être pas la manière optimale d'utiliser les espaces vacants et les toits en climats nordiques, du moins, dans ces conditions. Il est toutefois montré que le remplacement des sources d'énergie utilisées pour le chauffage (gaz naturel) et les opérations (électricité produite avec des énergies fossiles) par de l'électricité de sources renouvelables réduirait drastiquement les impacts environnementaux issus de la production en serre, rendant celle-ci plus performante que l'agriculture conventionnelle d'un point de vue environnemental. Les TV obtiennent globalement, quant à eux, de meilleurs pointages de performances environnementales, à condition que la culture soit effectuée de manière intensive, ce qui nécessite typiquement des investissements supérieurs.

Finalement, une étude de Romeo *et al.* (2018), effectuée à Lyon (France), vient d'ailleurs appuyer certaines conclusions de la précédente étude. Il y est observé que l'utilisation d'énergie de sources renouvelables dans une serre hydroponique cultivant des légumes permet d'obtenir des performances environnementales drastiquement meilleures qu'une serre conventionnelle chauffée avec des énergies fossiles, dont les performances se rapprochent plutôt de la culture en champs.

1.5 Constats

L'AUC s'effectue sous diverses formes et peut s'avérer une intéressante alternative pour répondre à une partie de la demande alimentaire des villes. Bien que sa viabilité financière soit souvent remise en question, un nombre croissant d'initiatives semblent démontrer que l'atteinte de rentabilité est possible par l'optimisation de certaines stratégies d'affaires et des coûts d'exploitation. Chacune des différentes méthodes de culture présentées offre des avantages et des inconvénients en climats froids en contexte commercial. Bien qu'elle comporte son lot de bénéfices socioéconomiques et écologiques, l'AUC en climats froids pourrait toutefois, dans certains cas, performer moins bien que l'agriculture conventionnelle, soit parce qu'elle nécessite de grandes quantités d'énergie, ou parce qu'elle n'offre pas de rendements intéressants justifiant les investissements élevés. Cependant, les pratiques répandues en AU offrent toutes de potentielles opportunités en efficacité énergétique, que ce soit pour l'espace de production ou pour le bâtiment hôte, et ce, à divers degrés.

Le potentiel de production de l'AU en environnement non contrôlé est limité par une multitude de facteurs (p. ex. les conditions climatiques extérieures, l'accès à de l'eau d'irrigation, les coûts fonciers élevés, etc.) ne pouvant parfois pas justifier sa pratique commerciale d'un point de vue purement financier. Les TV comestibles s'avèrent néanmoins de plus en plus répandus et offrent plusieurs bénéfices, variables selon le contexte, autant pour le bâtiment hôte que pour la ville. Ils offrent, entre autres, un

potentiel de production alimentaire non négligeable, la possibilité de cultiver une grande variété de légumes et une vaste gamme de services écosystémiques urbains. En revanche, ils n'ont généralement qu'un impact marginal sur les performances énergétiques du bâtiment hôte, qui ne justifient souvent pas en soi les investissements substantiels nécessaires.

L'AV intérieure, quant à elle, offre une efficacité accrue en termes d'utilisation des ressources, des rendements de production élevés et peut s'avérer plus performante, à certains égards, que la culture en serre dans un climat froid et de faible luminosité naturelle. Ses dépenses énergétiques sont majoritairement associées à l'éclairage artificiel et à la climatisation, mais les besoins de chauffage s'en trouvent grandement réduits. Les cultures pouvant s'y faire de manière rentable semblent toutefois limitées aux légumes et aux fines herbes. De plus, les investissements et coûts opérationnels qui y sont associés sont encore une barrière majeure à leur déploiement à l'échelle commerciale, bien que de nouvelles percées technologiques la rendraient de plus en plus viable.

Finalement, les ST requièrent des investissements initiaux et des coûts de production typiquement élevés, ne permettent de cultiver de manière rentable que certains types de légumes et pourraient s'avérer une des pires solutions sur le plan environnemental en climats froids lorsque l'énergie consommée provient de sources fossiles. Le potentiel de synergie avec le bâtiment hôte et les rendements de production y sont toutefois élevés. Une grande variété de facteurs, tant en matière de la construction que des opérations, peuvent influencer les performances énergétiques des ST en climats froids.

En conclusion, il y a une grande variété de facteurs (p. ex. le climat, la source d'énergie, les infrastructures et les opérations) pouvant influencer les performances environnementales et énergétiques des diverses méthodes de production en AUC. Le

cas de l'intégration d'une serre sur le toit d'un bâtiment dans un climat froid nous semble cependant particulièrement intéressant à étudier par rapport aux autres méthodes analysées. En plus d'offrir un intéressant potentiel commercial, il semble qu'une meilleure efficacité énergétique, une réduction des besoins en chauffage et l'utilisation d'énergies renouvelables permettraient d'atteindre des performances environnementales et financières supérieures à celles de serres conventionnelles. De plus, la serriculture commerciale est un secteur déjà bien implanté au Québec et il semble y avoir un désir de la part des producteurs et des instances gouvernementales à développer encore plus ce secteur d'activités, entre autres en encourageant l'innovation technologique de manière à rendre plus performant ce dernier sur le plan énergétique.

CHAPITRE II

CONSIDÉRATIONS ÉNERGÉTIQUES EN SERRICULTURE ET OUTILS DE MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE

2.1 Facteurs influençant la consommation énergétique en serriculture

La culture en serre, méthode de production en environnement contrôlé encore la plus largement répandue, peut s'avérer très énergivore. Afin de mieux comprendre son fonctionnement, cette section passe en revue les principaux facteurs pouvant influencer la consommation énergétique de telles opérations.

2.1.1 Conditions environnementales

Pour des performances culturales optimales, la serre doit maintenir des conditions favorables aux plantes en contrôlant certains paramètres (p. ex. la lumière, la température, le taux d'humidité, le taux de CO₂, le substrat de croissance), de même que minimiser l'incidence de maladies et d'insectes nuisibles (ASHRAE, 2011). La culture en serre permet de recréer un microclimat favorable à la croissance des plantes, afin d'assurer des produits de meilleure qualité et des récoltes plus constantes et productives. En revanche, la consommation énergétique associée au maintien de ces conditions est fortement dépendante des conditions environnementales extérieures et peut s'avérer très élevée. Le chauffage peut représenter à lui seul jusqu'à 90 % de la consommation énergétique d'une serre (Semple *et al.*, 2017). Généralement, lorsque la température extérieure moyenne descend en dessous de 10°C, une serre nécessitera du chauffage pour maintenir des conditions favorables à la croissance des plantes (Kittas

et al., 2013). De plus, lorsque la quantité de lumière naturelle est réduite pour une période prolongée, il s'avère utile d'utiliser de l'éclairage artificiel d'appoint. Étant donné les conditions météorologiques du Québec, une serre commerciale y opérant 12 mois par année nécessite ainsi typiquement du chauffage et de l'éclairage artificiel. Il en est de même pour la plupart des pays nordiques. Ces points seront discutés plus en détail dans les prochaines sections. Les figures 2.1 et 2.2 présentent, à titre de référence, les valeurs mensuelles moyennes de la température (°C) et du rayonnement solaire quotidien sur une surface horizontale (MJ/m²) pour les villes de Montréal et de Québec, ainsi que d'autres régions agricoles dans différents emplacements nordiques, dont les données météorologiques sont tirées de RETScreen (2021).

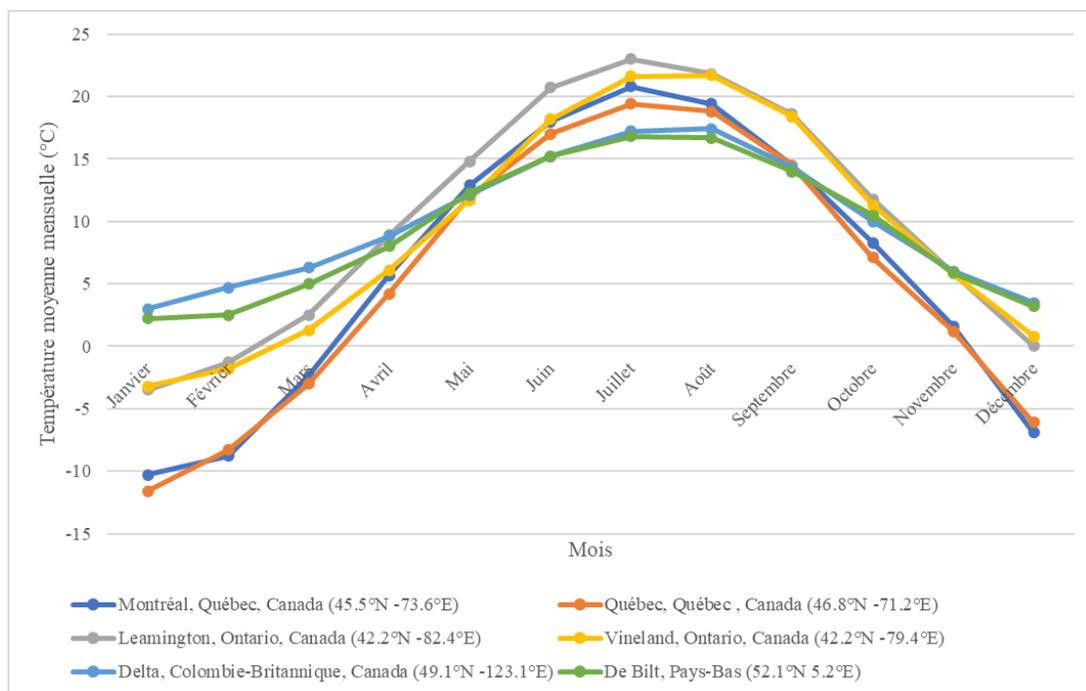


Figure 2.1 – Températures moyennes mensuelles à proximité des villes de Montréal (Québec), Québec (Québec), Vineland (Ontario), Delta (Colombie-Britannique) et De Bilt (Pays-Bas) (RETScreen, 2021)

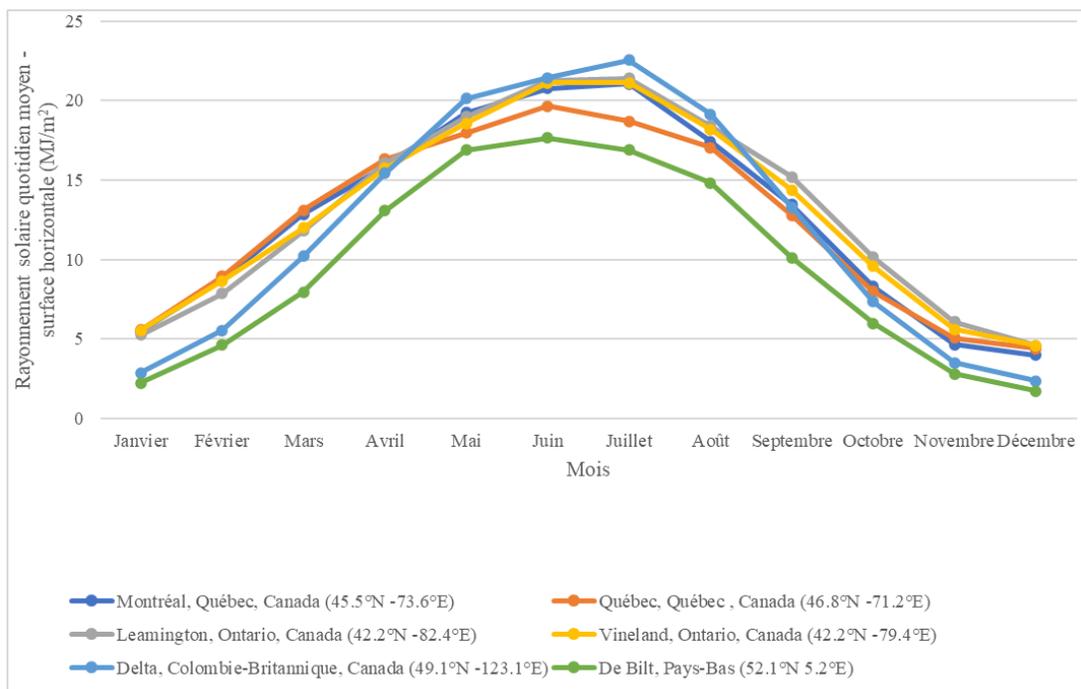


Figure 2.2 – Rayonnement solaire quotidien moyen reçu sur une surface horizontale à proximité des villes de Montréal (Québec), Québec (Québec), Vineland (Ontario), Delta (Colombie-Britannique) et De Bilt (Pays-Bas) (RETScreen, 2021)

2.1.1.1 Facteurs environnementaux de croissance des plantes

Selon l'OMAFRA (2010), la croissance d'une plante se traduit par l'accumulation de matière sèche (glucides) qui est assurée par certains processus. D'une part, il y a la photosynthèse qui utilise l'énergie de la lumière pour convertir l'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'air en oxygène (O_2) et en glucides. Ces derniers sont reconvertis en énergie, en CO_2 et en O_2 lors du processus de respiration. La respiration permet le développement des racines, des feuilles et des bourgeons de la plante et ne dépend que de la température, contrairement à la photosynthèse qui dépend principalement du niveau de luminosité. Finalement, la transpiration est un phénomène induit durant la photosynthèse par l'évaporation de l'eau par les feuilles, faisant circuler l'eau des racines vers l'atmosphère. Ce processus permet de faire circuler la sève des plantes. Le taux de transpiration est fonction de l'écart entre la pression exercée par la

vapeur d'eau contenue dans les feuilles de la plante et celle contenue dans l'air. Généralement, le taux de transpiration augmente avec la température ambiante (OMAFRA, 2010).

2.1.1.2 Température

La température est un facteur influençant grandement la croissance des plantes, affectant notamment la photosynthèse, la respiration, la morphologie, le taux de croissance, l'humidité relative et, par le fait même, les rendements de production dans une serre (OMAFRA, 2010). La majorité des cultures en serre croissent de manière optimale dans des températures variant de 17°C à 27°C, mais peuvent généralement tolérer, pour de courtes périodes, des températures variant entre 10°C et 35°C (Kittas *et al.*, 2013).

Selon l'OMAFRA (2010), toute plante a toutefois une gamme idéale de températures qui lui est propre. Certaines cultures préfèrent des températures plus élevées (p. ex. la tomate, le poivron, le concombre ou l'aubergine), alors que d'autres sont adaptées à des températures plus froides (p. ex. la laitue). La température optimale de croissance augmente typiquement avec l'intensité lumineuse. Il est également préférable d'éviter des changements trop brusques de la température. Les températures diurnes sont généralement maintenues plus élevées que les températures nocturnes, afin de maximiser le taux de croissance des plantes et obtenir une morphologie et d'autres caractéristiques favorables. Les températures idéales peuvent varier en fonction de divers facteurs, notamment le stade de croissance de la plante, le niveau de luminosité et le taux de CO₂ de l'air ambiant (OMAFRA, 2010).

2.1.1.3 Humidité relative

L'humidité relative (HR) représente le niveau de saturation de vapeur d'eau présent dans l'air. La capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau augmente avec la

température. Les légumes cultivés en serre tolèrent bien un taux d'humidité relative variant de 60 % à 90 % (Kittas *et al.*, 2013). L'humidité relative peut avoir d'importants impacts sur la croissance des plantes et il existe une gamme optimale relative à la variété cultivée, son stade de croissance, de même que la température ambiante. Si elle est trop basse, elle peut induire un stress et un assèchement rapide des plantes par transpiration excessive. Cependant, si l'humidité relative est trop élevée, des problèmes associés à la condensation d'eau sur les parois de la serre et les feuilles des plantes peuvent survenir, de même que favoriser l'apparition de maladies fongiques et bactériologiques (Critten et Bailey, 2002; OMAFRA, 2010). Une humidité relative trop élevée en période nocturne peut être corrigée par un apport d'air extérieur chauffé et, à l'inverse, une humidité relative trop basse en période diurne peut être corrigée par des systèmes pulvérisation ou de brumisation (ASHRAE, 2011).

2.1.1.4 Déficit de tension de vapeur

Selon l'OMAFRA (2010), le déficit de tension de vapeur (DTV) est un concept exprimant la différence de pression exercée par la vapeur d'eau se situant dans une plante avec celle contenue dans l'air de son environnement. Le DTV augmente proportionnellement avec la température de l'air ambiant. Une différence de pression plus élevée induit un taux de transpiration accru, le déplacement de l'eau contenue dans la plante vers l'atmosphère étant favorisé. Le taux de croissance d'une plante est lié à son taux de transpiration. Un faible taux de transpiration est généralement associé à de plus petites plantes ayant un système racinaire sous-développé et favorise l'apparition de maladies, alors qu'un taux de transpiration élevé entraîne des tiges et des feuilles plus fragiles. Des valeurs extrêmes ne sont ainsi généralement pas favorables à la culture en serre. Le DTV est typiquement corrigé en serre en ajustant la température de l'air, mais aussi la ventilation et la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation (OMAFRA, 2010).

2.1.1.5 Concentration de CO₂ de l'air

Selon l'OMAFRA (2010), un taux optimal de CO₂ de l'air ambiant permet généralement une meilleure activité photosynthétique et de meilleurs rendements de production. En période photosynthétique, les plantes consomment du CO₂ et rejettent de l'O₂ dans l'atmosphère. Il est donc important de, minimalement, assurer un renouvellement d'air extérieur suffisant. Les taux optimaux de CO₂ varient d'environ 400 ppm, lors de journées nuageuses, à plus de 1 000 ppm lors de journées ensoleillées. Il est à noter que le taux de CO₂ moyen de l'air ambiant était, selon la NASA (2022), légèrement supérieur à 415 ppm en 2021. L'utilisation de méthodes d'enrichissement de l'air en CO₂ est donc généralement nécessaire pour l'atteinte de ces conditions de croissance optimales (OMAFRA, 2010).

2.1.1.6 Lumière

C'est grâce à l'énergie de la lumière que les plantes peuvent assurer leur croissance par photosynthèse. Il s'agit d'un facteur essentiel à la production de végétaux qui peut influencer de manière considérable les rendements de production. Selon Dorais (2003), la croissance des plantes répond à deux principaux facteurs associés à la lumière, soit la quantité de lumière, de même que sa qualité (distribution spectrale). Dans une serre, la quantité et la qualité de la lumière sont fonction de divers facteurs externes (p. ex. la longueur des jours, l'angle du soleil et la couverture nuageuse) et internes (p. ex. la densité de culture, la réflectivité des surfaces environnantes, les caractéristiques architecturales et les matériaux).

Selon Dorais *et al.* (2002), la lumière est une radiation électromagnétique qui se présente sous diverses gammes de longueurs d'onde. La figure 2.3 montre la gamme du spectre lumineux utile pour la photosynthèse, aussi appelé rayonnement photosynthétique actif, ou *photosynthetically active radiation* (PAR) en anglais, qui est de 400 nm à 700 nm, en comparaison à celle visible par l'œil humain (380 nm à 780

nm). On parle de flux photonique pour décrire la quantité produite de photons par unité de temps par une source lumineuse. Lorsque seuls les photons du PAR sont mesurés, il s'agit du flux photonique photosynthétique, ou *photosynthetic photon flux* (PPF) en anglais. Lorsque les photons du PAR sont mesurés par unité de surface, il s'agit plutôt de densité de flux photonique photosynthétique, ou *photosynthetic photon flux density* (PPFD) en anglais. Ces derniers sont exprimés respectivement en $\mu\text{mol/s}$ et $\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$. Le flux photonique visible et sa densité sont, quant à eux, exprimés respectivement en lumens (lm) et en lux.

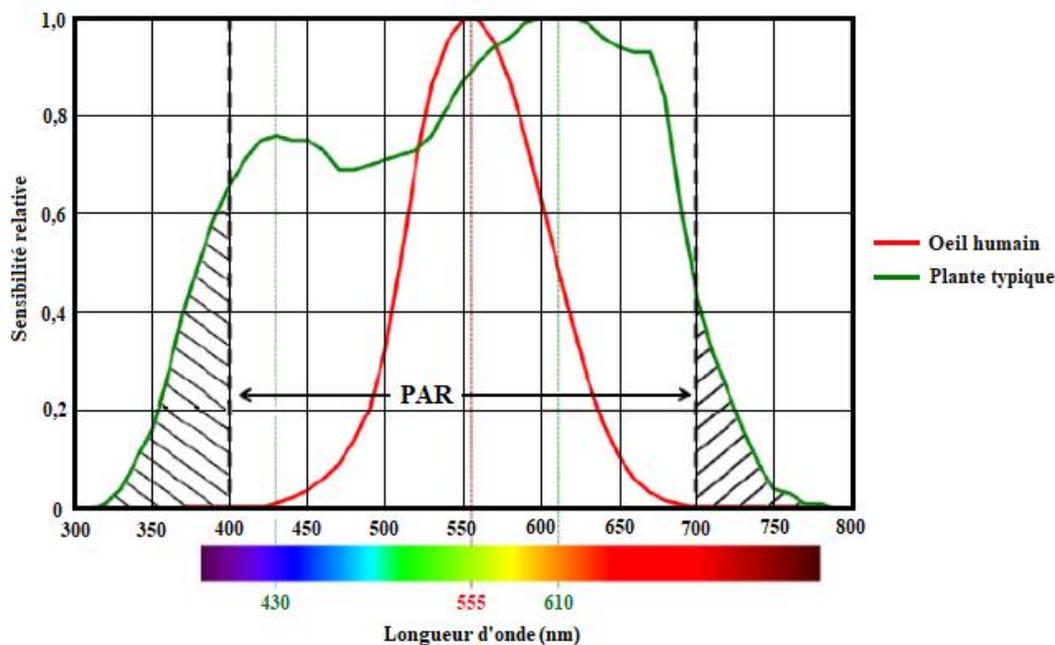


Figure 2.3 – Courbes de sensibilité relative à la lumière de l'œil humain (rouge) et d'une plante typique (vert) (Shelford et Both, 2020)

Toujours selon Dorais *et al.* (2002), la quantité de lumière reçue en une journée par unité de surface peut se traduire par la valeur intégrée journalière, ou *daily light integral* (DLI) en anglais, exprimée en mol/m^2 ou J/cm^2 . Chaque type de culture a une valeur de DLI minimale optimale. Au Québec, la quantité de lumière journalière ne suffit pas à atteindre ces valeurs pendant une grande partie de l'année. En effet, il y a un important

écart entre la quantité de lumière naturelle reçue pendant l'hiver et celle reçue pendant la saison estivale. Une serre commerciale opérant 12 mois par année doit donc généralement utiliser des appareils d'éclairage artificiel pour pallier une partie des besoins durant les périodes de plus faible luminosité. Il est à noter que la quantité de lumière reçue journalièrement par rayonnement solaire est dépendante, notamment, du climat local, de la localisation géographique et de la période de l'année. Ainsi, dans l'hémisphère nord, la quantité de lumière reçue globalement dans l'année est généralement supérieure pour les emplacements situés plus au sud et la quantité moyenne de lumière reçue journalièrement est typiquement supérieure pendant la saison estivale que pendant la saison hivernale (Torres et Lopez, 2010).

2.1.2 Caractéristiques du site et de la serre

Les particularités du site d'implantation d'une serre, de même que les caractéristiques techniques propres à cette dernière, peuvent avoir un impact décisif sur sa consommation énergétique. La présente section résume les principaux facteurs à considérer.

2.1.2.1 Géométrie, exposition au soleil et orientation de la serre

Selon ASHRAE (2011), il est important de sélectionner le site où la serre est implantée de manière à maximiser la quantité de lumière reçue. Il faut ainsi éviter qu'il y ait des éléments environnants obstruant la lumière du soleil. En zone nordique, une serre qui opère toute l'année devrait être conçue de manière à maximiser son exposition au soleil en hiver. La ligne de toit d'une serre individuelle devrait idéalement être orientée dans l'axe est-ouest, alors qu'une serre jumelée devrait être orientée dans l'axe nord-sud, afin de limiter l'ombrage occasionné par la structure. L'arche du toit d'une serre peut être, notamment, droite ou courbée.

Certaines études ont également démontré que d'intéressants gains énergétiques pouvaient être faits par l'optimisation de la géométrie du toit d'une serre, maximisant l'utilisation de l'énergie solaire par la façade du toit orienté au sud (Facchini *et al.*, 1983; Kurata, 1993; Malquori *et al.*, 1993; Zamir *et al.*, 1984). Ces conclusions seraient toutefois plus applicables aux serres individuelles qu'aux serres jumelées. La figure 2.4 illustre différentes configurations et géométries possibles de serres commerciales.

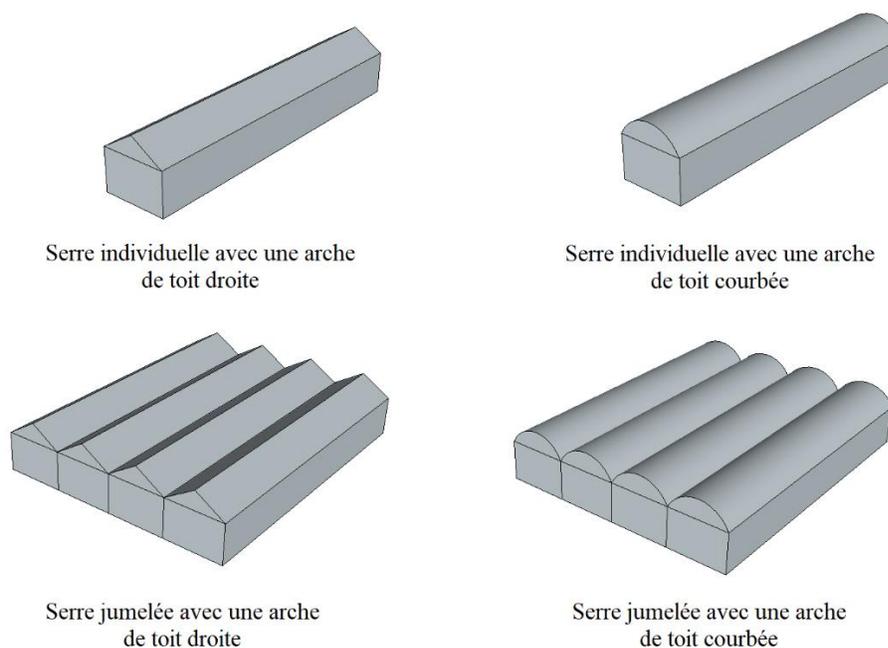


Figure 2.4 – Représentation de diverses géométries typiques de serres commerciales individuelles (en haut) et jumelées (en bas) avec une arche de toit droite (à gauche) ou courbée (à droite)

2.1.2.2 Vent

Il peut s'avérer avantageux de protéger la serre du vent pour limiter la déperdition thermique en hiver. Les serres installées au sol peuvent profiter de barrières brise-vent naturelles, par exemple des arbres, mais il faut s'assurer de ne pas obstruer le rayonnement solaire (ASHRAE, 2011).

2.1.2.3 Température du sol

Les échanges thermiques entre une serre et le sol sont grandement inférieurs à ceux de l'enveloppe composant les murs et le toit de la serre, comme le montre une étude de Nawalany *et al.* (2014). L'étude, menée en Pologne, porte sur une serre individuelle chauffée dont le plancher n'est pas isolé thermiquement. Il y est observé que les pertes thermiques de la serre par le sol ne représentent qu'environ 5 % des pertes totales annuelles de l'enveloppe et donc n'impacteraient pas de manière significative le bilan thermique. L'étude suggère toutefois que le sol, agissant comme masse thermique, pourrait servir à tempérer la température de la serre en saison estivale et réduire l'intermittence des besoins en chauffage en période froide. Le sol accumule de l'énergie pendant la saison estivale qui est ensuite redistribuée à la serre en automne. Il est également observé qu'en saison froide la distribution des températures de surface varie fortement en fonction de l'emplacement. Ainsi, la température de surface du sol aux abords de la serre se rapproche plutôt des températures extérieures, alors qu'en se rapprochant du centre de la serre, elles augmentent rapidement, étant moins influencées par les conditions extérieures. En été, ces différences de températures sont cependant largement moindres. Il est également observé que, en tout temps de l'année, les températures du sol se stabilisent rapidement en profondeur. Selon Sodha *et al.* (2004), d'autres facteurs peuvent également influencer les échanges thermiques entre la serre et le sol, comme les propriétés thermophysiques de ce dernier, les variations de température étant proportionnelles à la conductivité thermique.

2.1.2.4 Interaction des plantes avec leur environnement

ASHRAE (2011) propose une méthodologie pour le calcul des interactions physiques et thermiques entre une serre et son environnement afin de faciliter le dimensionnement des équipements mécaniques. Cette méthodologie n'intègre pas les interactions thermiques des plantes avec leur environnement. Bien que généralement négligés, leur modélisation s'avérant complexe, certaines études se sont penchées sur les impacts des

gains thermiques (sensibles et latents) associés aux plantes sur le bilan énergétique global d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé et ont modélisé ces derniers (Graamans *et al.*, 2017; Kokogiannakis et Cooper, 2015; Talbot et Monfet, 2018; Ward *et al.*, 2015). En résumé, selon Talbot et Monfet (2018), une certaine quantité d'énergie est absorbée par les plantes lors de la photosynthèse et une autre quantité d'énergie est relâchée dans l'atmosphère sous forme latente, par phénomène de transpiration, qui elle-même induit un effet refroidissant par convection sur l'environnement. De plus, d'autres facteurs entrent également en jeu, comme l'accumulation d'énergie dans la plante et les flux radiatifs infrarouges entre la plante et son environnement.

2.1.2.5 Structure et matériaux

L'étanchéité d'une serre peut varier en fonction des matériaux et de la méthode de construction. Une plus faible étanchéité se traduit en une plus grande infiltration d'air extérieur, exprimée en nombre de changements d'air à l'heure (CAH), augmentant du fait même les besoins en chauffage (ASHRAE, 2011). Le tableau 2.1 propose des valeurs typiques d'infiltration naturelle pour différents types de construction.

Tableau 2.1 – Valeurs suggérées de nombre de changements d'air à l'heure par infiltration par types de constructions de serres (ASHRAE, 2011)

Nouvelles constructions	
Verre simple non scellé	1,25
Verre simple scellé	1,0
Film de plastique	0,6 – 1,0
Panneaux structuraux	1,0
Film de plastique par-dessus verre	0,9
Vieilles constructions	
Bonne maintenance	1,5
Mauvaise maintenance	2 à 4

Les propriétés thermophysiques associées aux matériaux de construction d'une serre ont aussi un impact sur les pertes de chaleur par induction de la serre. Généralement,

un coefficient de transfert thermique (U) est attribué à la structure d'une serre, selon les matériaux qui la composent, comme illustré au tableau 2.2. Il est à noter que la valeur U est inversement proportionnelle à la valeur R , soit le coefficient de résistance thermique. Il est à noter que les caractéristiques de l'ossature d'une serre peuvent également impacter le coefficient de transfert thermique global. Les éléments structuraux métalliques peuvent être exposés à l'extérieur à divers degrés, selon le type d'assemblage, induisant ainsi un phénomène de ponts thermiques avec l'extérieur (ASHRAE, 2011). Le tableau 2.3 présente des facteurs correctifs de la valeur U selon le type d'ossature.

Tableau 2.2 – Valeur suggérées de coefficients de transfert thermique globaux par types de matériaux et assemblages (ASHRAE, 2011)

Matériau	Assemblage	Valeur U ($W/m^2 \cdot K$)
Verre	Simple vitrage	6,4
	Double vitrage	4,0
	Isolé	Variable
Film plastique (p. ex. polyéthylène)	Film simple	6,8
	Film double, soufflé	4,0
	Film simple par-dessus verre	4,8
	Film double par-dessus verre	3,4
Panneaux structuraux rigides de plastique (p. ex. polycarbonate)	16 mm d'épaisseur	3,3
	8 mm d'épaisseur	3,7
	6 mm d'épaisseur	4,1

Tableau 2.3 – Facteurs correctifs suggérés de la valeur U d'une serre pour différents types d'ossatures (ASHRAE, 2011)

Type d'ossature	Facteur
Ossature en métal, espacement de 400 mm à 600 mm	1,08
Ossature en métal, espacement de 1 200 mm	1,05
Fibre de verre sur ossature en métal	1,03
Film de plastique sur ossature en métal	1,02
Film de plastique ou fibre de verre sur ossature en bois	1,00

Lorsqu'un bilan d'échanges thermiques d'une serre est effectué, notamment pour estimer les besoins maximaux en chauffage, il est également important de considérer les gains de chaleur (q_{in}) de source interne, tels que ceux associés à l'éclairage artificiel et aux équipements de la serre, de même que les gains associés au rayonnement solaire. Les déperditions thermiques par la structure de la serre (q_{out}) sont donc la somme des pertes d'énergie par conduction (q_c) et par infiltration d'air extérieur (q_i). Le bilan énergétique d'une serre en régime permanent peut ainsi s'exprimer comme (ASHRAE, 2011) :

$$\Delta Q [W] = q_{in} - q_{out}$$

Où : $q_{out} = q_c + q_i = UA(T_i - T_o) + 0,33VN_{CAH}(T_i - T_o)$

Et : U : coefficient de déperdition thermique global de la structure [W/(m²·K)]

A : superficie de la structure exposée à l'extérieur [W/(m²·K)]

T_i : température intérieure [°C] et T_o : température extérieure [°C]

V : volume intérieur de la serre [m³]

N_{CAH} : nombre de changements d'air à l'heure [m³/(m³·h)]

Les matériaux de recouvrement des serres sont divers (p. ex. le verre, la fibre de verre, le polyéthylène, le polycarbonate, etc.). Ils offrent chacun leurs bénéfices et inconvénients, de même que différents niveaux de performances thermiques, optiques et de durabilité. Ces derniers influencent donc, en plus du coefficient de transfert thermique global, la quantité de lumière transmise dans la serre. Généralement, les matériaux plus isolants (valeur du coefficient U moins élevée) offrent une moins bonne transmittance de la lumière, soit la fraction de la lumière transmise à travers le matériau. L'angle du toit peut aussi avoir un impact sur la quantité de lumière transmise dans la serre. En effet, les matériaux utilisés pour le recouvrement des serres ont des propriétés

optiques qui leur sont propres. Un angle d'incidence trop élevé avec le rayonnement solaire peut en réduire drastiquement sa transmittance, comme l'illustre la figure 2.5 pour une surface en verre (ASHRAE, 2011).

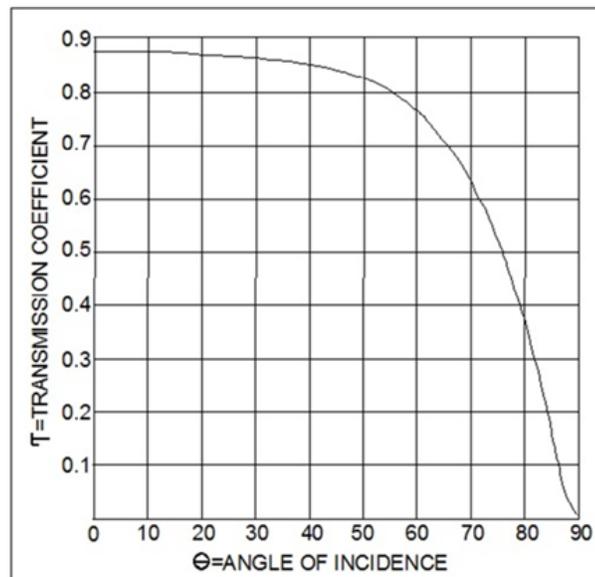


Figure 2.5 – Transmittance de la lumière en fonction de l'angle d'incidence pour une surface en verre (Topcuoglu et Unal, 2019)

Finalement, il est à noter que des dispositifs d'ombrage opérés mécaniquement, comme des toiles ou des rideaux, peuvent également être installés et permettent de réduire les gains solaires thermiques en périodes de surchauffe. Certains types peuvent aussi être réutilisés, en période de chauffage nocturne, afin de diminuer les pertes de chaleur. Ces systèmes sont discutés plus en détail dans la section 2.1.3.5.

2.1.3 Équipements et efficacité énergétique

Les divers équipements mécaniques permettant le maintien de conditions internes optimales à la culture de plantes dans une serre peuvent également jouer un rôle important dans la consommation énergétique de celle-ci. La présente section discute

des principaux équipements et processus utilisés dans un tel environnement contrôlé, de même que de certaines opportunités d'efficacité énergétique associées à ces derniers.

2.1.3.1 Chauffage

Selon ASHRAE (2011), il existe une variété de systèmes de chauffage pour les serres. Certains systèmes distribuent de l'eau chaude dans des tuyaux le long des parois de la serre ou sous les plantes. Ces systèmes sont généralement conçus de manière à minimiser l'ombrage sur les cultures, de même que le phénomène de stratification thermique par une distribution optimale. Le chauffage peut également s'effectuer par des unités de ventilation. Avec ces systèmes, l'air est typiquement distribué via des conduits troués répartis dans la serre au-dessus de la canopée, ou encore à la hauteur du sol. Ce sont généralement des brûleurs au gaz naturel qui assurent le chauffage par ventilation. Les gaz de combustion de tels systèmes peuvent être nocifs pour les travailleurs et la qualité de l'air doit être assurée par une ventilation minimale. Certains systèmes de chauffage par planchers radiants peuvent également être utilisés et fournir près de 25 % de la charge maximale de chauffage d'une serre située dans un climat froid. De manière générale, le chauffage au niveau du plancher permet des économies d'énergie de l'ordre de 20 % à 30 %, étant donné une meilleure distribution et une utilisation plus efficace de la chaleur. Plusieurs serres combinent le chauffage au sol avec le chauffage par ventilation.

Il est aussi intéressant de noter que plusieurs études font état de l'intéressant potentiel de systèmes de chauffage de serres utilisant des pompes à chaleur (géothermiques ou à l'air), tant sur le plan environnemental qu'énergétique, et ce, particulièrement en climats tempérés ou chauds (Aljubury et Ridha, 2017; Aye *et al.*, 2010; Bakos *et al.*, 1999; Ghosal et Tiwari, 2004; Lanini et Bouzit, 2013; Penjiyev, 2018; Tong *et al.*, 2010). Cependant, selon ASHRAE (2011), leurs coûts initiaux élevés et la nécessité d'un accès à une source de chaleur stable et de faible coût peuvent rendre ces équipements moins viables dans certains contextes. À un niveau plus local, au Québec,

il semble y avoir un gain d'intérêt pour l'utilisation de systèmes géothermiques pour le chauffage des serres depuis quelques années, étant une alternative verte aux systèmes de chauffage utilisant des énergies fossiles, mais la complexité d'installation, les coûts initiaux élevés et les périodes de récupération relativement longues, pouvant atteindre de 12 à 15 ans, sont encore des freins au développement de cette technologie (Brodeur *et al.*, 2006; UPA, 2008). Selon le Syndicat des producteurs en serre du Québec (2009), il n'existe encore qu'une quantité restreinte d'études démontrant la viabilité de systèmes de chauffage géothermiques pour serres, particulièrement en climats froids, et les quelques projets du genre qui ont pris place au Québec dans le passé ont souvent occasionné un dépassement des coûts d'investissement prévus, de même que des performances variables.

2.1.3.2 Refroidissement

Selon ASHRAE (2011), il est également important de prévoir des infrastructures permettant le refroidissement de l'espace. En effet, les radiations solaires sont une importante source de gains de chaleur sensible, dont une partie est convertie en chaleur latente ou convertie par photosynthèse par les plantes. Le refroidissement mécanique est rarement utilisé dans les serres, la ventilation naturelle permettant généralement de répondre à une grande partie de la demande en refroidissement à moindres coûts. Certaines serres sont donc conçues de manière à profiter du différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur, de même que du vent, afin d'aérer les espaces grâce à des ouvertures au toit et/ou sur les côtés de ces dernières. Il est aussi possible de ventiler la serre de manière mécanique, grâce à des ventilateurs d'extraction. Cette méthode permet un meilleur contrôle que la ventilation naturelle, mais nécessite des investissements et coûts opérationnels supplémentaires. De plus, l'utilisation de tels ventilateurs n'est efficace que pour de serres de longueurs restreintes. Finalement, il existe une variété de systèmes de refroidissement par évaporation qui permettent de limiter les besoins en ventilation et d'assurer l'humidification de la serre au besoin. Ces

dispositifs pulvérisent de l'eau sous forme de microgouttelettes. L'évaporation subséquente de l'eau cause ensuite un effet refroidissant. Ce procédé, appelée brumisation, permet généralement de réduire la température de l'air de la serre jusqu'à l'équivalent de 80 % de la différence entre les températures du bulbe sec et du bulbe humide de l'air extérieur.

2.1.3.3 Ventilation

La température et l'humidité dans une serre sont largement contrôlées par une ventilation appropriée. Selon ASHRAE (2011), il est nécessaire d'assurer une aération minimale tout au long de l'année, malgré des conditions hivernales nécessitant une consommation énergétique supplémentaire associée au chauffage de l'air extérieur. Ce renouvellement d'air permet, entre autres, le maintien d'une humidité relative et d'un taux de CO₂ appropriés. La ventilation hivernale est typiquement assurée par des ventilateurs d'extraction ou à pression positive. En période où la ventilation est limitée, il est important d'assurer une bonne circulation de l'air dans la serre pour, notamment, réduire l'incidence de maladies et la stratification thermique.

2.1.3.4 Éclairage artificiel

Selon Dorais *et al.* (2002), il existe plusieurs technologies d'éclairage, dont l'efficacité se définit par leur capacité de production de lumière utile (PAR) en fonction de leur puissance électrique ($\mu\text{mol/s/W}_{\text{elec}}$ ou mol/kWh). Toujours selon la même étude, une grande partie de l'énergie consommée par les appareils d'éclairage est transformée en chaleur résiduelle, qui peut contribuer jusqu'à 35 % du chauffage de la serre lorsque des lampes de type à haute pression de sodium sont utilisées. En périodes froides, l'utilisation d'éclairage artificiel peut tout de même s'avérer plus efficace énergétiquement que la culture sans éclairage, car l'électricité consommée est utilisée de manière optimale, servant la double fonction d'éclairage et de chauffage.

La lampe à haute pression de sodium, ou *high pressure sodium* (HPS) en anglais, est la technologie d'éclairage en serre la plus répandue, étant donné son intéressante efficacité, sa durabilité et son bon rapport qualité/prix (Dorais *et al.*, 2002). Toutefois, les appareils d'éclairage à diode électroluminescente (DEL), ou *light emitting diode* (LED) en anglais, gagnent en popularité depuis quelques années, étant donné une durée de vie et des performances énergétiques accrues par rapport aux appareils de type HPS. Nelson et Bugbee (2014), dans une étude effectuée il y a quelques années, rapportaient des coûts d'investissements de 5 à 10 fois plus élevés pour l'installation d'appareils d'éclairage DEL en comparaison à l'installation d'appareils HPS, alors que d'autres semblent plutôt suggérer des coûts de l'ordre de 3 à 6 fois supérieurs (Berger, 2018; Kowalczyk *et al.*, 2020; Runkle, 2014). Nelson et Bugbee (2014) rappelaient d'ailleurs que les avancées technologiques prévues dans les prochaines années permettraient d'en améliorer l'efficacité et d'en réduire les coûts d'investissements initiaux, augmentant du fait même la viabilité de la technologie d'éclairage DEL. Il semble également pertinent de mentionner que certains appuis financiers gouvernementaux peuvent également être offerts pour l'installation d'appareils d'éclairage DEL dans les serres, permettant de réduire les investissements initiaux associés. Par exemple, au Québec, le programme Produits agricoles efficaces d'Hydro-Québec offre des remises monétaires à l'achat de certains appareils agricoles efficaces sélectionnés, dont les appareils d'éclairage DEL (Hydro-Québec, 2022).

2.1.3.5 Mesures améliorant l'efficacité énergétique

Selon ASHRAE (2011), il existe une multitude de mesures permettant de réduire la consommation énergétique et l'impact environnemental d'une serre. Certains facteurs, comme l'efficacité de certains appareils mécaniques et électriques associés notamment à l'éclairage et à la ventilation, de même que la source d'énergie utilisée (renouvelable ou fossile), exercent une importante influence sur ces derniers. Il serait également possible de réduire les pertes thermiques d'une serre de 5 % à 10 % par l'utilisation de

scellant au silicone, afin de minimiser l'infiltration indésirable de l'air, de même que de 10 % à 20 % avec l'utilisation de matériaux de recouvrement ayant une meilleure résistance thermique (verre ou panneaux à double ou triple paroi). D'autres études suggèrent même une réduction des besoins de chauffage de serres individuelles de l'ordre de 20 % à 40 % pour l'utilisation de vitrage à double paroi, en comparaison à un vitrage simple paroi (Gupta et Chandra, 2002). L'utilisation de matériel opaque isolant et réfléchissant recouvrant le mur nord d'une serre permet également d'effectuer des gains énergétiques potentiels non négligeables pour une serre individuelle, ce dernier ne contribuant typiquement que très peu aux gains solaires globaux en période hivernale (Gupta et Chandra, 2002).

Finalement, l'utilisation de rideaux thermiques, opérés manuellement ou mécaniquement, est une des mesures les plus communément proposées dans la littérature. En effet, ils permettent généralement de réduire les pertes thermiques de l'ordre de 25 % à 40 % (ASHRAE, 2011; Critten et Bailey, 2002). L'utilisation de rideaux thermiques en combinaison avec un vitrage simple pourrait même s'avérer, selon le contexte, plus performante énergétiquement qu'un vitrage à double paroi (Gupta et Chandra, 2002). Il s'agirait d'une des mesures les plus efficaces en serriculture au Québec, pouvant typiquement réduire la consommation en combustible de l'ordre de 20 % à 40 %, et par le fait même, réduire la dimension des équipements de chauffage nécessaires (Berger et Brazeau, 2018). Les toiles, fabriquées dans une large gamme de matériaux peu coûteux et pouvant atteindre d'intéressants niveaux isolants, sont généralement déroulées la nuit de manière à limiter les déperditions thermiques par le toit, qui peuvent représenter jusqu'à 60 % de la consommation énergétique totale d'une serre (Paris *et al.*, 1989). L'installation des systèmes les opérant peut toutefois nécessiter des investissements supplémentaires non négligeables et leur opération peut s'avérer relativement complexe (ASHRAE, 2011). Ces derniers peuvent aussi réduire de l'ordre de 4 % la quantité de lumière reçue dans la serre, étant donné l'ombrage supplémentaire qu'ils occasionnent (Critten et Bailey, 2002).

2.2 Opportunités de réduction de la consommation énergétique en serriculture par la valorisation de rejets thermiques

La forte intensité énergétique en serriculture commerciale est largement associée au maintien de conditions de culture appropriées, particulièrement de gammes de températures optimales. En climats froids, les besoins en chauffage des serres sont typiquement élevés et peuvent représenter une importante part du bilan énergétique des opérations. La récupération de chaleur provenant de diverses sources de rejets thermiques, qui serait autrement perdue, peut toutefois s'avérer une stratégie permettant de réduire les impacts financiers et environnementaux associés à ces besoins. La présente section fait ainsi un survol de certains types de rejets thermiques dont la récupération pourrait être particulièrement adaptée au chauffage de serres.

2.2.1 Récupération de chaleur de l'air évacué et stockage thermique saisonnier en serres fermées

Selon Semple *et al.* (2017), dans un climat tempéré, comme aux Pays-Bas, les serres fermées permettraient de réduire de 20 % à 60 % la consommation énergétique en comparaison aux serres conventionnelles, dites ouvertes. Pour ce faire, les serres fermées, caractérisées par une étanchéité accrue, misent sur et une utilisation de systèmes actifs de refroidissement et de déshumidification. De plus, elles utilisent généralement des systèmes de récupération de la chaleur de l'air de ventilation, de même que des systèmes de stockage thermique saisonnier utilisant, par exemple, des réservoirs d'eau enfouis. Ces installations permettent de minimiser les besoins en chauffage et en refroidissement par la récupération de chaleur qui serait autrement perdue, provenant de l'air évacué de la serre en périodes de surchauffe. De plus, l'utilisation de la ventilation naturelle étant réduite, il est possible d'y maintenir des taux de CO₂ plus élevés lorsqu'il y a utilisation de systèmes de supplémentation, augmentant par le fait même les rendements de culture. Le meilleur contrôle de la

ventilation permet aussi de réduire les besoins en irrigation et en pesticides, par un meilleur contrôle des conditions intérieures, des insectes nuisibles et des maladies.

L'étude de Semple *et al.* (2017), qui évalue les besoins énergétiques d'une serre fermée par modélisation énergétique, et ce, pour différentes conditions et dans divers endroits au Canada (Colombie-Britannique, Ontario et Québec), rapporte aussi d'intéressants bénéfices potentiels associés à ce type d'installation en climats froids. Les auteurs montrent que, sur une base annuelle, les différents scénarios étudiés ont tous des besoins en refroidissement égaux ou supérieurs à ceux en chauffage, pouvant s'avérer être jusqu'à 3,5 fois plus élevés. Ces surplus énergétiques seraient fortement variables, en fonction de l'emplacement géographique (conditions climatiques), du type de matériau de recouvrement (conductivité thermique), des paramètres d'opération (taux de ventilation) et de l'utilisation de méthodes de conservation de la chaleur (rideaux thermiques). Il y est également suggéré que le plus intéressant potentiel de réduction des besoins de chauffage, associé à des systèmes de récupération de chaleur de l'air évacué de tailles optimales, serait surtout durant le printemps et l'automne, les besoins en ventilation étant supérieurs à ceux de l'hiver.

2.2.2 Chauffage de serres par cogénération

Selon l'étude de Tataraki *et al.* (2020), l'une des meilleures applications à la cogénération, soit la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir d'un combustible, peut s'avérer être le chauffage de serres en climats tempérés, étant donné les besoins en chauffage non négligeables de ces opérations. Selon les auteurs, plusieurs projets d'envergure en serriculture commerciale misant sur cette stratégie pour réduire leur consommation énergétique, ainsi que les coûts associés, ont fait leurs preuves dans certains pays d'Europe, particulièrement aux Pays-Bas. L'étude se penche plus précisément sur la viabilité économique de systèmes de production combinée de trigénération, utilisés pour alimenter des serres en électricité, tout en assurant le chauffage et le refroidissement de ces dernières, et ce, pour différents pays

d'Europe. Les auteurs concluent que le ratio entre les coûts locaux de l'électricité et ceux du carburant (gaz naturel) serait le paramètre économique le plus déterminant à considérer. Ainsi, pour les pays ayant un ratio supérieur à 3, comme l'Italie ou le Royaume-Uni, d'importantes économies peuvent être faites par rapport aux scénarios sans l'utilisation de cogénération. Ce type de système ne s'avérerait toutefois pas financièrement rentable dans certains pays, comme la Suède et la Finlande, caractérisées par des climats plus froids et de moins grands apports mensuels moyens d'énergie solaire, de même que par des coûts d'électricité inférieurs par rapport aux coûts du gaz naturel, menant à un ratio d'environ 1,5. Ces conditions, similaires à celles retrouvées au Québec, entraînent des besoins énergétiques grandement supérieurs, la nécessité d'installer des équipements de plus grande capacité, des investissements initiaux plus élevés et une période de récupération plus longue.

2.2.3 Valorisation de rejets thermiques de sources industrielles

2.2.3.1 Récupération de rejets thermiques industriels pour le chauffage de serres

La récupération d'une source de chaleur résiduelle provenant de procédés industriels d'une usine ou de la production d'électricité d'une centrale thermique peut s'avérer une intéressante option pour l'obtention d'une énergie thermique à coûts réduits, à condition que le fournisseur soit en mesure d'en assurer la fiabilité et la constance (ASHRAE, 2011). Certains projets de ce genre ont d'ailleurs pris place au Québec. C'est le cas notamment du plus grand complexe serricole de la province, soit celui des Serres Toundra, situé dans la ville de Saint-Félicien et occupant 35 hectares. Selon l'entreprise, ce dernier, en plus d'utiliser les plus récentes technologies en termes d'efficacité énergétique, comme des appareils d'éclairage à faible consommation de type DEL, valorise une partie du CO₂ et des rejets d'eau chaude de procédés produits par une usine de pâte de produits forestiers voisine au site, soit l'équivalent journalier de 30 tonnes d'émissions de CO₂éq, permettant de répondre à 25 % des besoins en chauffage des opérations (Serres Toundra, 2020; Ville de Saint-Félicien, 2019).

2.2.3.2 Potentiel de valorisation de rejets thermiques au Québec et à Montréal

Selon l'étude de Dionne et Girouard (2013), la valorisation de rejets thermiques industriels visant l'amélioration de l'efficacité énergétique en sericulture commerciale pourrait s'avérer, non seulement réaliste d'un point de vue technique et économique, mais une façon de rendre l'industrie plus compétitive au Québec. À titre indicatif, selon l'étude de Niget (2010), le gisement énergétique associé aux rejets thermiques non valorisés des industries et des centrales électriques thermiques du Québec représentait, en 2008, plus de 76,6 TWh (276×10^6 GJ). Selon l'auteur, cela représente environ 15 % de l'énergie totale consommée annuellement dans la province, l'équivalent d'environ dix fois la production annuelle prévue de la centrale hydroélectrique La Romaine d'une capacité installée de 395 MW, et a une valeur équivalente de 2,9 milliards de dollars, soit plus de 1,1 % du produit intérieur brut (PIB) du Québec en 2008. La répartition de cette énergie thermique est illustrée par gammes de températures et par principaux secteurs d'activités desquels elle est émise respectivement aux figures 2.6 et 2.7, alors qu'elle est détaillée par régions au tableau 2.4. Il est à noter que ces données n'incluent pas les rejets thermiques associés aux bâtiments des secteurs résidentiel, commercial et institutionnel.

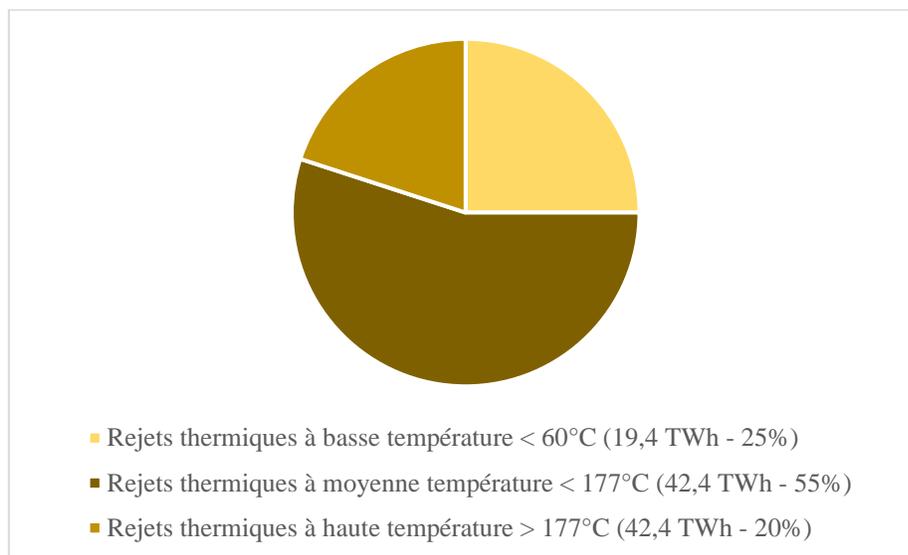


Figure 2.6 – Répartition des rejets thermiques industriels du Québec en 2008 par gammes de températures (Niget, 2010)

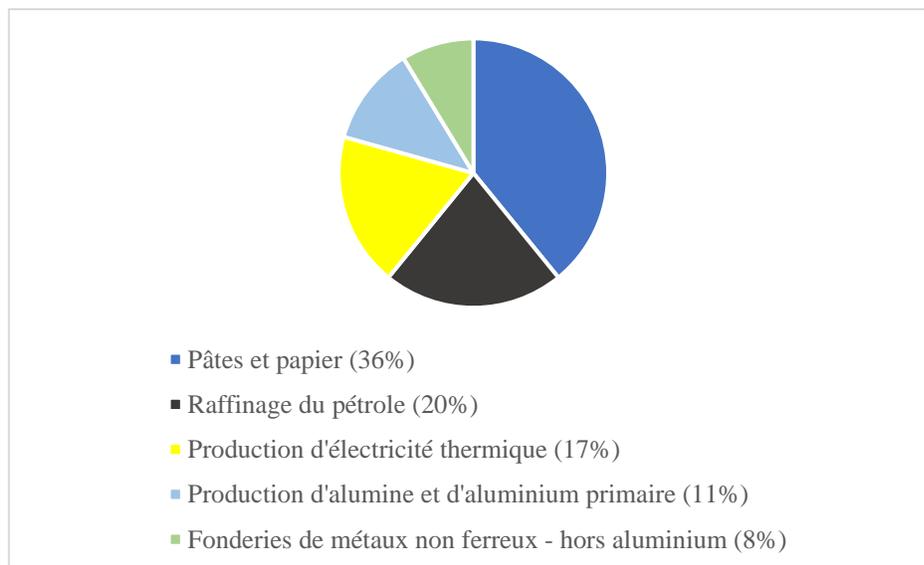


Figure 2.7 – Répartition des rejets thermiques industriels du Québec en 2008 par secteurs (Niget, 2010)

Tableau 2.4 – Répartition des rejets thermiques industriels au Québec en 2008 par régions administratives (Niget, 2010)

Région	Rejets thermiques industriels totaux (GJ/an)	Proportion régionale par rapport au Québec
Bas-Saint-Laurent	8 475 546	3 %
Saguenay - Lac-Saint-Jean	32 193 928	12 %
Capitale Nationale	16 040 003	6 %
Mauricie	21 267 963	8 %
Estrie	13 204 754	5 %
Montréal	37 765 096	14 %
Outaouais	11 407 910	4 %
Abitibi-Témiscamingue	17 925 896	7 %
Côte-Nord	15 522 300	6 %
Nord du Québec	3 387 073	1 %
Gaspésie - Îles-de-la-Madeleine	574	0 %
Chaudières - Appalaches	26 123 100	10 %
Laval	0	0 %
Lanaudière	4 213 634	2 %
Laurentides	1 641 171	1 %
Montérégie	20 331 610	7 %
Centre-du-Québec	42 849 377	16 %
Total	272 349 935	100 %

Toujours selon l'étude de Niget (2010), la valorisation de cette chaleur est particulièrement prometteuse et adaptée pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des coûts d'exploitation de projets de serriculture de grande envergure. Ceci pourrait permettre, d'une part, de revitaliser l'économie de certaines régions rurales et, d'autre part, de favoriser l'implantation de tels projets à proximité de zones urbaines. Il est à noter que, bien que ces activités industrielles soient inégalement réparties sur le territoire de la province et qu'une grande partie d'entre elles soient effectuées à l'extérieur des centres urbains, une quantité non négligeable d'industries énergivores sont installées au sein, ou en périphérie, de zones densément peuplées. En effet, à Montréal seulement, près de 38×10^6 GJ de chaleur a été émise en 2008 sous forme d'effluents liquides ou de gaz chauds, principalement par une poignée d'entreprises œuvrant dans les industries du raffinage de produits pétroliers (79 %), de la fonderie et l'affinage de métaux non-ferreux (19 %), de la fabrication de produits en

verre (2 %) et de la fabrication de gaz industriels (moins de 1 %). Cette quantité d'énergie représentait, à elle seule, près de 14 % des rejets thermiques industriels du Québec. Finalement, malgré cette importante quantité d'énergie thermique disponible à travers la province, il n'y a encore aujourd'hui que peu de projets commerciaux et agricoles développant des partenariats avec les secteurs industriels énergivores, en comparaison à l'Europe. Selon l'auteur, ce manque d'efforts à l'égard de l'efficacité énergétique peut s'expliquer, en partie, par des tarifs d'électricité particulièrement abordables et une autonomie énergétique accrue par rapport à d'autres régions du monde.

L'étude de Dionne et Girouard (2013) rappelle toutefois, en se basant sur l'analyse de cas existants au Québec, que la valorisation de rejets thermiques industriels pour le chauffage de serres peut s'avérer relativement complexe à mettre en œuvre, tant sur le plan technique, financier, qu'humain, et ce, particulièrement pour les plus petites entreprises ayant accès à des ressources plus restreintes. Le caractère unique de chaque projet rend difficile de répéter une même approche, impliquant d'autant plus de préparation et d'analyse de la part des producteurs et des fournisseurs énergétiques. Les auteurs établissent également que de tels projets ont typiquement accès à des rejets thermiques considérés de basses températures (moins de 100°C), nécessitant souvent de plus importants débits du fluide et un surdimensionnement des équipements (p. ex. les pompes, la tuyauterie et les échangeurs de chaleur), augmentant par le fait même les investissements nécessaires et la période de récupération. Il y est aussi rappelé que, pour s'assurer de la réussite de tels projets, il est essentiel d'effectuer une analyse approfondie des besoins en chauffage sur une échelle temporelle et de s'assurer de la coïncidence, de la disponibilité et de la stabilité des rejets thermiques récupérés. Il y est finalement suggéré que le développement de politiques favorables, de même que le soutien financier et l'accompagnement d'institutions gouvernementales pourraient, néanmoins, potentiellement permettre un meilleur accès et une plus grande adoption de ces pratiques chez les producteurs en serres.

2.2.4 Récupération de rejets thermiques de sources commerciales : cas particulier des centres de serveurs

Dans un contexte de conscientisation environnementale et de raréfaction des ressources énergétiques non renouvelables, la mise en place de mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments a gagné en importance dans les dernières années. Outre des mesures typiques de récupération de chaleur provenant des opérations usuelles des bâtiments associées à la ventilation et au chauffage des espaces, certains projets visant l'implantation d'opérations commerciales particulièrement énergivores au sein de bâtiments peuvent également s'avérer d'intéressantes opportunités à considérer. Ces projets ont pour objectif de récupérer les rejets thermiques associés à la climatisation des espaces. La chaleur résiduelle peut ainsi être redistribuée, lorsque possible, dans d'autres espaces du bâtiment hôte, ou de bâtiments situés à proximité, afin d'en combler une partie des besoins en chauffage.

Les centres de données ou de serveurs informatiques, *data centers* en anglais, se prêteraient particulièrement bien à ce genre de stratégie, leur intensité énergétique étant généralement élevée, consommant et rejetant une grande quantité d'énergie par rapport à leur faible superficie de plancher. Ces derniers, qui nécessitent le maintien de conditions optimales et stables (température et taux d'humidité), comportent typiquement des baies, ou *racks* en anglais, accueillant divers types d'appareils électroniques particulièrement énergivores qui fonctionnent généralement 24 heures par jour pendant toute l'année (Oró *et al.*, 2015). Selon l'application, ces équipements peuvent émettre à eux seuls de l'ordre de 2 000 W à près de 100 000 W de chaleur par mètre carré de surface de plancher qu'ils occupent et il est prévu que l'intensité énergétique de ces derniers aura tendance à augmenter encore davantage au cours des prochaines années (ASHRAE, 2011, 2019; Balaras *et al.*, 2017). La demande totale en puissance de ce type de bâtiment peut ainsi varier grandement en fonction des équipements et de la configuration, des valeurs entre 54 W/m² à 2 700 W/m² (fréquemment supérieures à 1 000 W/m²) ayant d'ailleurs été rapportées dans de

précédentes études (Whitehead *et al.*, 2014). Une autre étude, effectuée par Avgerinou *et al.* (2017), se penche sur 289 centres de données, principalement situés en Europe, et permet d'estimer une puissance installée moyenne plutôt de l'ordre de 750 W/m^2 pour l'échantillon analysé. De plus, la même étude suggère que la consommation électrique associée aux équipements informatiques représenterait, en moyenne, un peu plus de la moitié de la consommation d'électricité totale des centres de données. Dans certains cas, la consommation d'électricité de tels immeubles peut représenter jusqu'à 100 à 200 fois celle d'un espace de bureau conventionnel (Balaras *et al.*, 2017; Bruschi *et al.*, 2011). L'étude de Ni et Bai (2017) observe, quant à elle, que les équipements de climatisation sont typiquement responsables d'environ 20 % à 60 % de la consommation d'énergie totale de ce type d'installation.

Dans un monde de plus en plus numérique, les centres de données consommeraient aujourd'hui près de 1 % de l'électricité à l'échelle mondiale, chiffre qui pourrait être multiplié par un facteur de 3 ou 4 au cours de la prochaine décennie (Masanet *et al.*, 2020). Quelques projets expérimentaux de valorisation des rejets thermiques de centres de données ont d'ailleurs vu le jour dans le monde au cours des dernières années, visant à combler les besoins thermiques de divers types d'installations, notamment des bâtiments résidentiels et commerciaux (p. ex. les centres informatiques de Telehouse West à Londres, de la cathédrale Uspenski en Finlande et de Quebecor à Winnipeg), de piscines (p. ex. le centre informatique Uitikon-IBM en Suisse), de serres (p. ex. le centre de recherche en informatique de l'Université Notre Dame aux États-Unis) ou d'espaces d'agriculture intégrés au bâtiment (p. ex. le centre de données TeleCity à Paris) (Miller, 2010). À un niveau plus local, le centre de données massives de l'Université Laval, à Québec, dédié à la recherche scientifique, prévoit également la récupération de la chaleur produite par ses équipements informatiques, électriques et mécaniques, dont la capacité nominale totalise 850 kW concentrées dans une surface de plancher d'environ $1\,200 \text{ m}^2$, afin de répondre à ses besoins en chauffage, de même qu'à ceux d'autres bâtiments du campus (Gagnon, 2019).

L'étude de Ljungqvist *et al.* (2020) vient, quant à elle, confirmer l'intéressant potentiel symbiotique entre les centres de données et les serres dans un contexte de climat froid. Les auteurs s'inspirent ainsi de cas existants locaux pour analyser, par modélisation énergétique, la réduction en chauffage pour différents scénarios, associés à la variation de la taille des opérations de la serre (2 000 m² et 10 000 m²) et de sa période de production (du printemps à l'automne sans éclairage artificiel et toute l'année avec éclairage artificiel). Les opérations, localisées en climat subarctique, sont ainsi jointes à un centre de données d'une puissance nominale de 1 MW. À des fins de simplification, il y est assumé que le centre y opère à charge constante et que l'énergie thermique y est récupérée, au besoin, grâce à un système de ventilation faisant circuler l'air de la serre à travers des échangeurs de chaleur situés dans les allées froides et chaudes du centre de serveurs, respectivement maintenus à 27°C et 40°C. Il y est démontré que, selon la situation, environ 5 % à 30 % de l'énergie consommée par le centre de données pourrait être récupérée pour le chauffage de la serre, la quantité de chaleur récupérée augmentant lorsque la taille de la serre est supérieure et/ou la période de production en serre est prolongée, car les besoins en chauffage s'en trouvent accrus. Pour une production en serre effectuée toute l'année, ainsi que du printemps à l'automne seulement, respectivement 90 % et 98 % des besoins en chauffage de la serre de 2 000 m² pourraient être comblés par la récupération des rejets thermiques, alors que la capacité de ces derniers à chauffer la serre de 10 000 m² s'en trouve réduite à 50 % et 62 %. Selon les auteurs, une production sur une période prolongée et sur une plus grande superficie s'avère toutefois l'alternative la plus profitable, permettant globalement de récupérer une plus grande quantité de chaleur et de produire une plus grande quantité de tomates à des coûts approximativement 7,6 % inférieurs à une installation serricole locale de mêmes caractéristiques ne récupérant pas de chaleur. Il y est conclu que ce type de partenariats commerciaux pourrait aider à augmenter considérablement la production en légumes par la réduction des coûts d'exploitation, et par le fait même à améliorer l'autosuffisance alimentaire de régions dont les conditions climatiques sont typiquement peu favorables à la serriculture.

Bien que peu d'études portent sur le sujet, la récupération de la chaleur résiduelle provenant de centres de données semblerait ainsi plus adaptée à des projets de production en serres en contexte urbain et/ou de tailles plus restreintes, comparativement à la récupération de rejets thermiques industriels. En effet, les centres de données ont l'avantage d'être plus flexible en ce qui a trait à la taille, leurs opérations pouvant être décentralisées et ajustées selon les besoins. De plus, ils peuvent être installés presque n'importe où, à l'intérieur ou à proximité du bâtiment ou des opérations désirant récupérer leur chaleur résiduelle. L'un des principaux désavantages reste toutefois associé à des températures de rejets thermiques relativement basses, typiquement entre 27°C et 47°C, par rapport à celles de rejets industriels, ce qui peut limiter ou complexifier les stratégies de récupération de chaleur (Miller, 2010).

2.3 Intégration d'espaces de culture et de serres aux bâtiments et outils de modélisation énergétique

Au regard du premier chapitre, l'intégration de projets d'agriculture aux bâtiments semblerait une des options les plus fréquemment proposées en AUC. Les résultats de diverses études suggèrent l'intéressant potentiel de symbiose énergétique dont peut profiter un environnement de culture contrôlé, particulièrement les serres, qui ont d'importants besoins en énergie de chauffage. Dans une moindre mesure, les TV pourraient également avoir certains effets bénéfiques sur la consommation énergétique de leur bâtiment hôte. Les secteurs du bâtiment et de l'agriculture étant d'importants émetteurs de GES, l'intégration de projets d'AUC aux bâtiments pourrait ainsi potentiellement, selon le contexte, avoir d'intéressants bénéfices environnementaux. Certains outils ont d'ailleurs été développés pour mieux évaluer les performances énergétiques de bâtiments.

Selon Clarke et Hensen (2015), le développement des logiciels de simulation de performances de bâtiments a permis, au cours des dernières années, de faciliter les

analyses et d'améliorer grandement les niveaux de précision. En effet, ces analyses s'avèrent généralement extrêmement complexes étant donné le grand nombre de paramètres techniques associés, influençant le comportement des bâtiments (p. ex. les occupants, les équipements, l'enveloppe du bâtiment, les conditions météorologiques, la ventilation, le conditionnement des espaces, etc.). Ils sont donc devenus des outils indispensables et multidisciplinaires en écoconception de bâtiments. Bien qu'ils n'offrent pas de fonctionnalités de base permettant la modélisation d'opération d'agriculture intégrée au bâtiment, certains modèles ont été développés dernièrement, par divers chercheurs, dans le cadre d'études de performances énergétiques.

Les performances et bénéfices énergétiques des TV ont été étudiés à plusieurs reprises par le passé, bien que moins souvent dans un contexte de production alimentaire. Le logiciel EnergyPlus a fréquemment été utilisé lors d'études de leurs performances énergétiques (Benedetta *et al.*, 2017; Cascone *et al.*, 2018; Castleton *et al.*, 2010; Jaffal *et al.*, 2012; Moody et Sailor, 2013; Pastore *et al.*, 2017). Le module *Ecoroof* a d'ailleurs été développé pour EnergyPlus par Sailor, permettant d'intégrer un TV à un bâtiment modélisé et prendrait en considération les effets conductifs, radiatifs, convectifs et les taux d'humidité, ce qui permettrait de déterminer avec un meilleur degré de précision leurs impacts énergétiques (Castleton *et al.*, 2010).

En ce qui concerne la production en serre, certains modèles mathématiques de performances énergétiques ont été développés, comme celui de Vanthoor *et al.* (2011), soit une méthodologie complexe adaptée à tous les types de climats et incluant plusieurs éléments (p. ex. les conditions climatiques, les flux d'intrants matériels et énergétiques, les matériaux de construction, les rendements de production, les variables économiques, etc.). Le modèle intègre notamment les modèles mathématiques développés par Bot (1983) et De Zwart (1996), qui étaient calibrés pour l'analyse de situations plus précises, se limitant ainsi à des conditions climatiques et méthodes de constructions spécifiques. Les modèles mathématiques cités précédemment semblent

offrir un haut degré de précision quant aux performances culturales, considérant notamment l'impact des plantes sur l'environnement de la serre associé à leurs échanges gazeux, massiques et énergétiques, mais semblent toutefois moins adaptés à la simulation du comportement énergétique de serres intégrées à un bâtiment. De manière plus générale, la revue de littérature effectuée par Critten et Bailey (2002), s'intéressant aux différents développements en ingénierie de serres depuis les années 1990, informe des différents facteurs à considérer dans la modélisation de performances de ces dernières, notamment les différents mécanismes de transmission de la lumière et de la chaleur, ainsi que la ventilation. L'étude de Choab *et al.* (2019), quant à elle, effectue une revue de littérature sur les différents systèmes de contrôle climatique de serres, et ce, pour diverses conditions climatiques et opérationnelles. Les auteurs étudient notamment différents modèles mathématiques développés au cours des dernières années et concluent que la plupart d'entre eux sont généralement développés pour des conditions spécifiques et que plusieurs paramètres, pouvant avoir un impact énergétique non négligeable sur la serre, y sont parfois négligés, comme l'évapotranspiration des plantes et le taux de CO₂ dans l'air.

Bien que certains logiciels aient commencé à intégrer des outils facilitant la modélisation énergétique de bâtiments accueillant un TV (EnergyPlus, 2014b), les outils numériques pour simuler l'influence des plantes dans un environnement contrôlé semblent plus limités. La revue de littérature de Choab *et al.* (2019) observe que les logiciels fréquemment utilisés par les chercheurs pour effectuer la modélisation énergétique de serres, comme TRNSYS et EnergyPlus, plutôt adaptés à la modélisation énergétique de bâtiments conventionnels, n'offrent pas de modèles pour y intégrer les impacts énergétiques des plantes, principalement associés au phénomène d'évapotranspiration. Les auteurs suggèrent ainsi qu'il s'avère difficile et complexe de simuler avec précision l'ensemble des phénomènes présents dans un environnement contrôlé d'agriculture, car ces logiciels doivent être modifiés ou adaptés avec de multiples modèles ou outils additionnels.

Des travaux plus récents se sont tout de même intéressés aux impacts énergétiques de la végétation présente au sein d'un bâtiment, associés entre autres à l'évapotranspiration des plantes, afin qu'ils puissent être mieux représentés dans les logiciels de modélisation énergétique de bâtiments grâce à certains modules (Kokogiannakis et Cooper, 2015; Ward *et al.*, 2015). L'étude de Nadal *et al.* (2017) utilise la serre expérimentale de l'Université autonome de Barcelone, étudiée précédemment par (Pons *et al.*, 2015). L'étude utilise des mesures expérimentales afin de calibrer un modèle énergétique, qui intègre notamment l'effet rafraichissant associé à l'évapotranspiration des plantes sous forme de formules empiriques. L'étude de Benis *et al.* (2017), qui s'intéresse aux performances de divers types de fermes urbaines, utilise également le logiciel EnergyPlus pour évaluer les performances d'une serre intégrée à un bâtiment, ainsi que d'autres types d'espaces de culture conditionnés. Cette fois, l'impact des plantes sur les bilans énergétiques de la serre ne semble pas pris en considération, bien que les auteurs intègrent tout de même aux simulations la consommation d'eau associée à l'évapotranspiration des plantes.

Talbot et Monfet (2018), dans leur étude, observent que les impacts des plantes dans le bilan thermique de serres (gains de chaleur sensibles et latents) sont généralement négligés en simulation énergétique, car ils s'avèrent complexes à modéliser. Les auteurs se penchent sur les travaux de Kokogiannakis et Cooper (2015), Benis *et al.* (2017) et Graamans *et al.* (2017), qui utilisent respectivement les logiciels ESP-r, EnergyPlus et MATLAB pour simuler les flux énergétiques. Les auteurs reprennent toutefois le modèle de Ward *et al.* (2015) sur TRNSYS, auquel sont dénotées certaines irrégularités, et y proposent des améliorations. De manière générale, l'intégration de l'impact des plantes en modélisation énergétique assistée par ordinateur semblerait cependant intensive en ressources de calculs. De plus récents travaux de Talbot et Monfet (2020), viennent confirmer que les diverses interactions des plantes avec leur environnement peuvent être largement sous-estimées en modélisation d'espaces de culture en environnement contrôlé (p. ex. une ferme verticale en intérieur). Comme les

auteurs l'expliquent, lors de la photosynthèse, il y a absorption de l'énergie radiative provenant de l'éclairage et/ou de la lumière naturelle, qui est ensuite redistribuée dans son environnement sous diverses formes (latente, radiative et convective). En période d'obscurité, lorsqu'il n'y a pas de photosynthèse, le phénomène de respiration des plantes induit un refroidissement de leur environnement. Le modèle utilisé pour l'étude évalue une opération faisant la culture de laitues en environnement contrôlé dans un climat froid, et ce, pour certaines gammes de température et taux d'humidité d'air, de même que de densités de culture et indices de surface foliaire. Les résultats y sont comparés à un modèle où les interactions thermiques entre les plantes et leur environnement sont négligées. Il y est démontré que les valeurs de demande instantanée maximale, respectivement en chauffage et en déshumidification, peuvent s'en trouver de 3,6 à 14,0 supérieures et de 1,1 à 9,9 fois supérieures, selon les cas. Selon les auteurs, ces résultats confirment ainsi l'importance de considérer les flux thermiques associés aux plantes dans une ferme verticale en intérieur lors du dimensionnement des divers appareils mécaniques (ventilation, chauffage, climatisation et/ou déshumidification).

L'étude de Ahamed *et al.* (2018), quant à elle, effectue la modélisation énergétique d'une serre jumelée conventionnelle située dans un climat froid, soit à Saskatoon (Canada), et y intègre l'évapotranspiration des plantes cultivées, soit des tomates. Il y est observé que la grande majorité des besoins en chauffage sont associés à la période hivernale (novembre à mars). De plus, lors des périodes les plus froides, plus de 90 % de la chaleur est perdue par les phénomènes de conduction, convection, infiltration et radiation, alors que l'évapotranspiration est responsable de pertes de l'ordre de 9 %. Durant les périodes plus chaudes et ensoleillées (avril à octobre), à l'inverse, les pertes de chaleur associées à l'évapotranspiration des plantes sont proportionnellement plus importantes que les autres phénomènes, mais les besoins en chauffage y sont largement réduits, étant donné des températures extérieures plus élevées et de plus importants gains solaires. Les auteurs rappellent également que la pertes thermiques associées aux différents mécanismes étudiés sont fortement influencés par le climat dans laquelle la

serre se situe, suggérant ainsi que les pertes de chaleur et besoins en chauffage associés à l'évapotranspiration des plantes pourraient s'avérer, par exemple, proportionnellement plus importants dans un climat plus chaud et ensoleillé.

En conclusion, il existe plusieurs logiciels de modélisation énergétique, largement utilisés dans le monde scientifique et technique, permettant la simulation énergétique de bâtiments et l'intégration de modules indépendants développés par des chercheurs à travers le monde (Beckman *et al.*, 1994; Coakley *et al.*, 2014; Crawley *et al.*, 2001). L'utilisation d'outils numériques de modélisation du bâtiment semblerait pouvoir faciliter grandement l'analyse de performances de ces derniers (Fumo, 2014) et être l'outil de prédilection pour une analyse énergétique de l'intégration d'un espace de culture en environnement contrôlé à un bâtiment. En contrepartie, l'étude des impacts énergétiques de l'intégration de serres aux toits de bâtiments, et le développement d'outils associés, semblent, eux, avoir été effectués de manière plus limitée en comparaison à d'autres types d'espaces de culture, tels que les TV.

2.4 Constats

Il y a une multitude de facteurs pouvant influencer les performances énergétiques en serriculture, secteur de l'agriculture particulièrement énergivore. Le climat est néanmoins un paramètre d'importance majeure, impactant les besoins énergétiques, ainsi que le choix des équipements et des caractéristiques d'une serre. Il existe néanmoins diverses mesures permettant de réduire la consommation d'énergie et les coûts associés, mais variables en termes de rentabilité et de faisabilité technique. Le chauffage de serres par la récupération de rejets thermiques, qui peuvent provenir de diverses sources (p. ex. des rejets thermiques industriels ou d'un centre de serveurs), peut être rentable dans certains contextes, mais peut être complexe techniquement. De plus, la viabilité de ces stratégies s'avère typiquement plus difficile à atteindre pour les

producteurs ayant des ressources financières limitées et/ou des opérations de tailles plus restreintes.

Plusieurs études suggèrent que l'intégration de serres aux toits de bâtiments pourrait également permettre, dans certains contextes, d'en réduire la consommation énergétique. Cette mesure s'avère d'autant plus pertinente en contexte urbain, où la taille des opérations est généralement limitée. Cette stratégie permettrait d'utiliser un espace autrement typiquement inutilisé en ville, où l'accès limité à des terrains de taille suffisante et des coûts fonciers supérieurs à ceux des campagnes sont souvent des facteurs limitatifs au développement de pratiques agricoles urbaines. L'étude de telles opérations symbiotiques en contexte montréalais pourrait mener à des conclusions divergeant de celles d'autres études portant sur l'AU intégrée aux bâtiments et sur sa viabilité énergétique et environnementale, étant donné les conditions climatiques et le contexte énergétique qui y sont spécifiques. Il est finalement à noter qu'il existe certains logiciels permettant de simplifier l'évaluation des performances énergétiques de bâtiments et d'espaces d'agriculture qui pourraient y être intégrés.

CHAPITRE III

OBJECTIFS ET DÉMARCHE DE RECHERCHE

3.1 Problématique et objectifs

Au regard des constats effectués avec la revue de littérature, il semble que l'intégration de projets d'AU sur les toits de bâtiments pourrait avoir certains impacts bénéfiques en ce qui concerne la consommation énergétique de ces derniers. Ces bénéfices pourraient toutefois s'avérer limités en climats froids, particulièrement lorsque le niveau d'isolation du toit est élevé. De plus, de potentielles modifications structurelles majeures peuvent être nécessaires pour accueillir des opérations agricoles commerciales et/ou intensives, entraînant par le fait même d'importants surcoûts en comparaison à une mise à niveau de l'isolation de la toiture de bâtiments mal isolés. Ainsi, dans bien des cas, l'implantation de tels projets pourrait ne pas être justifiée d'un point de vue purement énergétique pour l'opérateur du bâtiment. Cependant, certaines études laissent toutefois présager que l'installation d'une serre sur le toit d'un bâtiment pourrait permettre de réduire de manière non négligeable ses besoins en chauffage par rapport à une serre conventionnelle équivalente. Peu d'études se concentrent toutefois sur l'analyse des performances énergétiques et environnementales de telles opérations, particulièrement en climats froids, et celles qui le font n'étudient généralement pas de manière détaillée les différents paramètres pouvant influencer les résultats. Il semble donc pertinent de se demander dans quelle mesure la valorisation de pertes thermiques

provenant d'un bâtiment permettrait d'améliorer les performances énergétiques de serres urbaines et aider au développement de l'AUC en climats froids?

L'expérimentation a ainsi pour objectif d'évaluer, sous forme d'étude paramétrique, les impacts énergétiques de l'intégration d'une serre au toit d'un bâtiment dans un climat froid, ainsi que de certains choix de conception techniques et de pratiques culturelles. De manière plus spécifique, les sous-objectifs de cette étude sont :

1. Évaluer la consommation énergétique, ainsi que les émissions de GES associées, d'un bâtiment et d'une serre intégrée à son toit, ainsi que les impacts de divers paramètres sur le bilan énergétique d'un tel système.
2. Évaluer, à titre comparatif, la consommation énergétique du bâtiment et de la serre ayant les mêmes paramètres, et ce, dans le cas où la serre ne serait pas intégrée au toit du bâtiment.
3. Comparer les performances énergétiques et environnementales des différents scénarios analysés, ainsi que leurs avantages et inconvénients.
4. Déterminer quels sont les scénarios étudiés qui semblent les plus prometteurs en contexte montréalais.

3.2 Démarche de recherche

Premièrement, afin de caractériser le bâtiment et la serre à des fins de modélisation énergétique, les données primaires ont été recueillies. À la suite de cette caractérisation, les méthodes de production ont été définies et la modélisation énergétique des divers scénarios a été accomplie. L'étude comparative des scénarios analysés a ainsi permis d'évaluer l'influence de certaines variables sur les performances énergétiques et environnementales globales du système, et ce, à l'échelle d'une année entière. Plus précisément, il a premièrement été possible de déterminer les performances des

scénarios n'impliquant aucune valorisation de rejets thermiques, soit ceux d'un bâtiment seul et d'une serre au sol.

Par la suite, au modèle du bâtiment à l'étude a été intégrée une serre sur toit, de dimensions et de caractéristiques identiques à celles de la serre au sol préalablement modélisée. Il a ainsi été possible de vérifier l'impact sur le profil énergétique de la serre et du bâtiment, de même que des émissions de GES et des coûts associés, de l'intégration de la serre au toit du bâtiment, mais aussi de la modification de certains paramètres du bâtiment (le niveau d'isolation du toit) et de la serre (le type de légumes cultivés, le matériau de recouvrement, le type d'éclairage artificiel et la source d'énergie de chauffage). Cette analyse a également permis d'identifier des scénarios particulièrement prometteurs. La figure 3.1 résume la méthodologie utilisée pour cette étude. La prochaine section, quant à elle, présente de manière plus détaillée la méthodologie, de même que les hypothèses et paramètres utilisés.

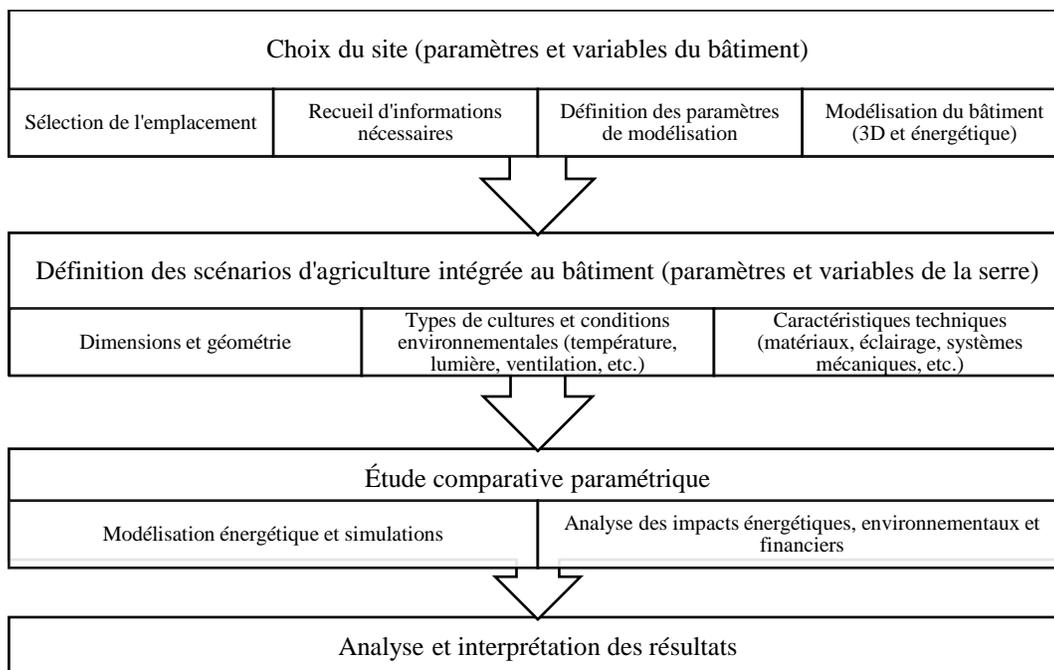


Figure 3.1 – Schéma résumant la méthodologie

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE ET ÉTUDE DE CAS

4.1 Site à l'étude

Comme établi précédemment, plusieurs études se penchent sur les performances énergétiques de diverses méthodes d'AU pratiquées dans différents types de climats chauds ou tempérés, mais un nombre plus restreint d'entre elles ont été effectuées en climats froids. La ville de Montréal se situe dans une zone ayant un climat continental froid et humide de catégorie Dfb, selon la classification de Köppen, caractérisé par des précipitations relativement élevées et réparties sur toute l'année, de même que des hivers froids et des étés chauds (Arnfield, 2020; MELCC, 2020a). Ainsi, étant un important centre urbain d'Amérique du Nord, propice au développement de projets d'AU commerciale, la ville de Montréal s'avère adaptée à l'étude des performances de tels projets dans un climat froid.

Un bâtiment commercial situé à Montréal a été sélectionné afin d'y mener l'expérimentation. Il s'agit d'un bâtiment de trois étages, construit dans les années 1970, et situé au 1401 rue Legendre O., dans une zone commerciale et industrielle de l'arrondissement Ahuntsic-Cartierville. Le toit du bâtiment a une superficie d'environ 4 000 m² et une partie de ce dernier est déjà utilisé à des fins expérimentales de production maraichère hors sol. Le site voisin abrite d'ailleurs un bâtiment de dimensions et caractéristiques similaires à celui à l'étude, qui héberge une des

exploitations des Fermes Lufa, la Serre Ahuntsic, qui a été construite en 2011 et qui occupe un peu moins de 3 000 m² (Fermes Lufa, 2020a). Cette dernière est représentative d'une opération de taille moyenne au Québec (Charron *et al.*, 2011; MAPAQ, 2018).

Le site à l'étude s'avère donc un lieu intéressant à étudier pour diverses raisons. Premièrement, le bâtiment est relativement âgé et ne répond pas aux récentes normes locales d'efficacité énergétique, ce qui en fait un bon candidat potentiel à une réhabilitation énergétique. De plus, le toit du bâtiment est plat et offre une superficie suffisamment grande pour permettre une opération serricole commerciale de taille moyenne. La présence d'une opération en ST sur le bâtiment voisin s'avère d'autant plus intéressant quant à l'interprétation des résultats obtenus. Les figures 4.1 et 4.2 présentent des images satellites localisant le site à l'étude.



Figure 4.1 – Vue de haut du site à l'étude (Google Earth, s.d.)



Figure 4.2 – Vue de face du site à l'étude (Google Earth, s.d.)

4.2 Échantillonnage et paramètres

Le bâtiment a été analysé par le biais d'une visite des lieux et d'une étude des plans et documentations pertinentes et disponibles, et ce, dans le but d'obtenir le plus d'informations possible et de pouvoir en effectuer une modélisation représentative. Les paramètres architecturaux et opérationnels ont été établis par cette étude et complétés, lorsque les informations étaient manquantes, par des normes de l'industrie ou des données de références applicables. La modélisation de la serre, sur sol et intégrée au toit du bâtiment, est quant à elle inspirée des caractéristiques techniques et de la géométrie d'un modèle commercial d'un fabricant local. Certains paramètres, présentés dans les prochaines sections, ont cependant été ajustés pour les besoins de l'étude comparative.

Selon Coakley *et al.* (2014), des écarts pouvant atteindre l'ordre de 100 % peuvent apparaître entre une modélisation et les données réellement mesurées, étant donné la

grande quantité d'éléments influençant les performances énergétiques d'un bâtiment. Il existe une multitude de techniques de calibration de simulation énergétique de bâtiments, manuelles et automatisées, dont le niveau de précision augmente avec le degré de complexité. Les lignes directrices l'ASHRAE 14-2002 suggèrent d'ailleurs qu'un modèle est proprement calibré lorsque l'erreur de biais moyenne normalisée est inférieure à $\pm 5\%$ et le coefficient de variation d'erreur quadratique moyenne est inférieure à $\pm 15\%$, relativement aux données mensuelles mesurées (ASHRAE, 2002). Il est à noter qu'aucune calibration n'a toutefois été effectuée dans le cadre de ce projet, l'objectif étant plutôt l'évaluation des impacts de la modification de différents paramètres par comparaison avec des scénarios de référence équivalents.

4.3 Modélisation énergétique

La consommation énergétique et les émissions de GES des différents scénarios ont été calculées par modélisation énergétique. Les simulations ont été effectuées grâce au logiciel OpenStudio V.2.9 (OS), plateforme qui intègre plusieurs logiciels de modélisation, dont EnergyPlus, ainsi que le *plug-in* SketchUp 2017, outil graphique servant à la modélisation 3D de bâtiments (OpenStudio, 2020). Pour chaque cas, les simulations ont été effectuées sur une année entière, pour des conditions climatiques typiques de la ville de Montréal. Les données météorologiques proviennent d'un même fichier (*Montreal.Intl.AP.716270_CWEC*), récupérable sur le site internet d'EnergyPlus (2020). La figure 4.3 résume les principales étapes de modélisation des scénarios à l'étude. Les hypothèses et paramètres utilisés sont présentés en détail dans les prochaines sections.

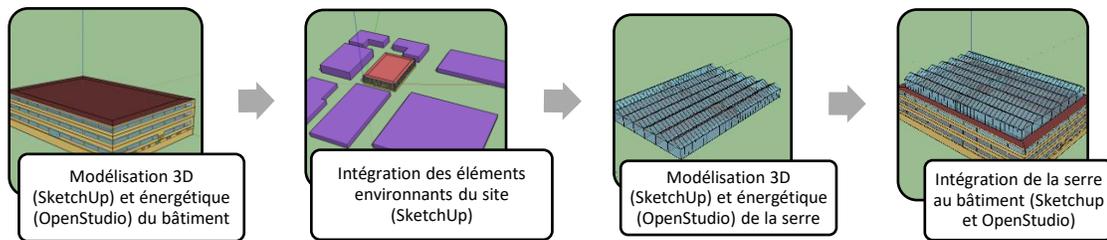


Figure 4.3 – Étapes de modélisation

4.3.1 Description du bâtiment

Le bâtiment à l'étude est de type commercial et de forme rectangulaire. Il a été construit vers 1972. Il est occupé principalement par des locataires qui utilisent les espaces comme bureaux, ainsi qu'à des fins d'entreposage et d'activités commerciales ou industrielles légères. Le toit du bâtiment a la particularité de ne pas être isolé (dalle de béton recouverte de bitume et gravier), ce dernier devant avoir été prévu à l'origine pour un possible agrandissement du bâtiment par un ou des étage(s) supplémentaire(s). Le chauffage est assuré par des chaudières au gaz naturel alimentant un réseau à l'eau chaude et des radiateurs. Il n'y a aucun système centralisé de climatisation, d'humidification ou de ventilation.

Les bâtiments environnants ont également été intégrés au modèle, afin que leur influence soit considérée dans les simulations énergétiques. Leurs dimensions ont été estimées avec le logiciel Google Earth. Aucun de ces éléments n'est source d'ombrage pour le toit du bâtiment à l'étude. La figure 4.4 présente un aperçu de la modélisation du bâtiment effectuée sur le logiciel SketchUp. Le tableau 4.1, quant à lui, résume les principales caractéristiques géométriques du bâtiment modélisé, qui sont présentées de manière plus détaillée à l'Annexe A.

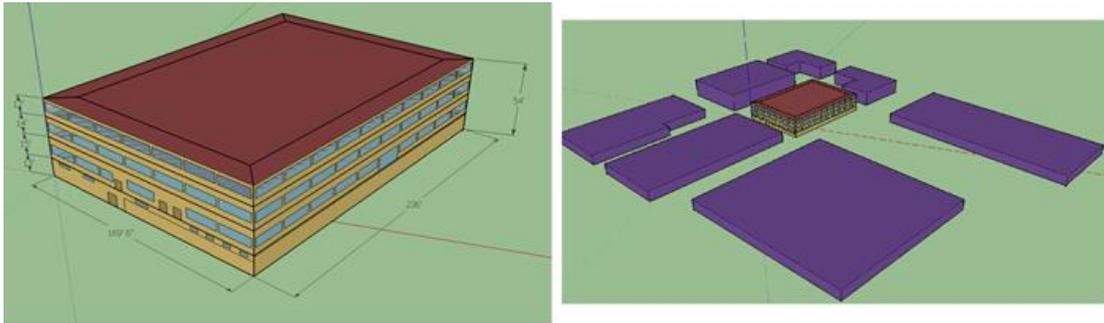


Figure 4.4 – Modèle 3D du bâtiment (à gauche) et intégration des bâtiments environnants (à droite)

Tableau 4.1 – Principales caractéristiques géométriques du bâtiment modélisé

Description	Valeur
Orientation de la façade nord du bâtiment par rapport au nord	+22,5°
Nombre d'étages (incluant le sous-sol)	4
Dimensions des façades extérieures	71,9 m × 51,5 m
Hauteur total (incluant le sous-sol)	16,6 m
Superficie des étages et du toit	3 716 m ²
Superficie de plancher totale	14 865 m ²
Ratios de la superficie de la fenestration, des portes et des murs enfouis par rapport à la superficie totale des façades (incluant le sous-sol)	Fenêtres : 28 % Portes : 2 % Murs enfouis : 17 %

4.3.1.1 Enveloppe et matériaux

Les hypothèses concernant les matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment ont été déterminées par une étude initiale de la documentation disponible. Les informations manquantes ont été complétées, entre autres, par l'utilisation d'assemblages typiques de bâtiments de référence proposés par la bibliothèque de composants d'OS (*DOE Ref-Pre-1980*), relative à l'année de construction du bâtiment et à sa zone climatique (zone climatique ASHRAE 6). Il est également à noter qu'en plus du niveau d'isolation du toit existant estimé (faible), d'autres niveaux d'isolation ont également été considérés (moyen et élevé) pour les simulations effectuées dans le cadre de cette étude. Cette démarche est expliquée en détail à la section 4.4. Le tableau 4.2 résume les principales propriétés de l'enveloppe du bâtiment modélisé. Les propriétés thermiques et optiques

des différents éléments constituant l'enveloppe du bâtiment, ainsi que les sources d'information utilisées pour déterminer ces hypothèses de modélisation, sont présentées de manière plus détaillée à l'Annexe A.

Tableau 4.2 – Principales propriétés de l'enveloppe du bâtiment modélisé

Description	Valeur U (W/m ² ·K)	Coefficient de gain solaire thermique – SHGC (-)
Toit – scénarios avec toit de niveau d'isolation faible (existant)	1,55	-
Toit – scénarios avec toit de niveau d'isolation moyen	0,36	-
Toit – scénarios avec toit de niveau d'isolation élevé	0,18	-
Murs extérieurs des étages	1,87	-
Murs du sous-sol	6,40	-
Dalle du sous-sol	6,45	-
Portes extérieures	1,18	-
Fenêtres extérieures	5,84	0,54

4.3.1.2 Définition des zones thermiques, charges internes et points de consigne

Chaque étage a été subdivisé en cinq espaces (*spaces* dans OS) avec une zone thermique (*thermal zone* dans OS) associée, soit une zone périmétrique par façade d'une largeur de 4,6 m (15 pi), ainsi qu'une zone centrale, comme montré à la figure 4.5. À des fins de simplification, l'aménagement intérieur n'a pas été modélisé. Les zones thermiques sont séparées, à chaque étage, par des *air walls*, type de construction dans OS permettant de représenter une connexion ouverte entre zones et de simuler les échanges thermiques conductifs entre ces dernières (EnergyPlus, 2014a). Chaque espace est défini par un type d'espace (*space type* dans OS) ayant des particularités associées à leurs charges thermiques internes (occupation, éclairage, équipements électriques et infiltration d'air), les appareils mécaniques les desservant (ventilation, chauffage et eau chaude sanitaire), ainsi que des températures de consigne à maintenir en chauffage et en refroidissement. Des horaires typiques simplifiés ont également été appliqués à chacun de ces paramètres. Ces caractéristiques opérationnelles utilisées pour la modélisation sont basées sur les plans, relevés et informations disponibles, de

même que d'hypothèses issues de valeurs typiques associées au type, à l'année de construction et à la zone climatique du bâtiment. Elles sont présentées à l'Annexe A.

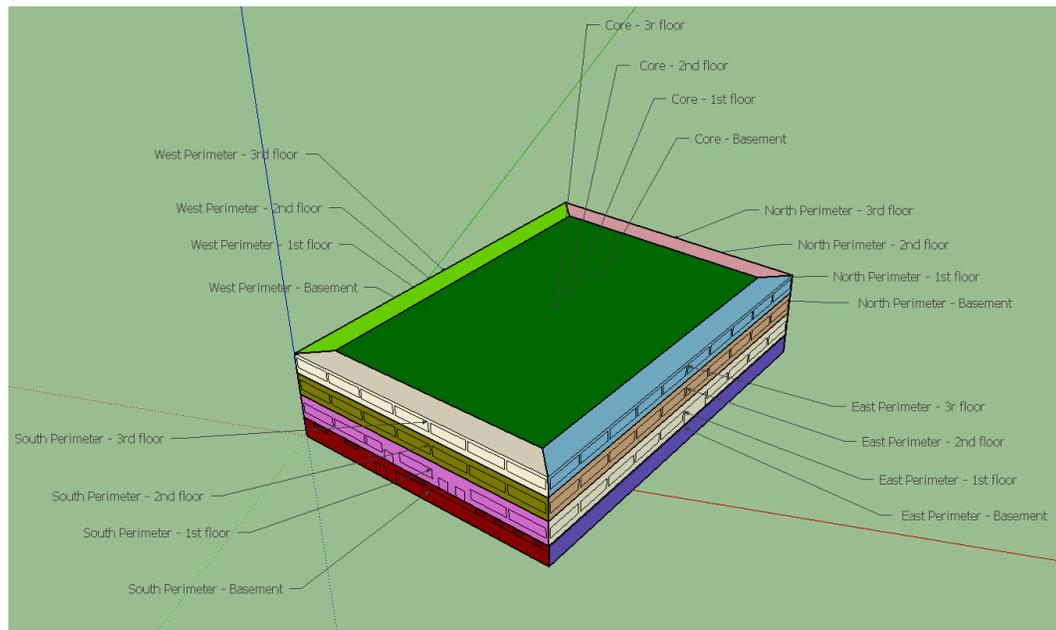


Figure 4.5 – Zones thermiques du bâtiment

4.3.1.3 Ventilation naturelle

Le bâtiment ne possède pas de système centralisé assurant la ventilation et la climatisation. Toutefois, les fenêtres de ce dernier sont ouvrantes et peuvent être utilisées pour ventiler le bâtiment en cas de surchauffe. Il y a plusieurs façons de modéliser la ventilation naturelle dans OS. Dans le cadre de cette étude, étant donné les incertitudes entourant l'utilisation des fenêtres dans le bâtiment, un débit de conception de ventilation de zone (*zone ventilation design flow rate* dans OS) a été utilisé à des fins de simplifications. L'utilisation de ce paramètre dans OS permet de simuler un renouvellement d'air extérieur par l'ouverture de fenêtres, en fonction de la température de consigne en refroidissement, du débit de conception (V_{design}) et d'un horaire ($F_{schedule}$), de même que des conditions climatiques environnementales, plus spécifiquement la température de la zone (T_{zone}), température extérieure (T_{odb}) et la

vitesse du vent (*WindSpeed*). La formule suivante, dont les paramètres sont détaillés à l'Annexe A, est utilisée pour le calcul du débit (EnergyPlus, 2014d) :

$$Ventilation = (V_{design})(F_{schedule})[A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed)^2]$$

4.3.2 Description de la serre

La serre modélisée est de type jumelé et s'inspire des caractéristiques du modèle commercial Luminosa (Série 8, 21'-4'') du fabricant de serres Harnois (Industries Harnois, s.d.). La serre est composée de sept chapelles orientées parallèlement, dans le sens des gouttières, à la façade principale du bâtiment. La serre hypothétique permet la culture à longueur d'année. Elle est ainsi équipée d'appareils de chauffage et d'éclairage photosynthétique artificiel. Un taux de changements d'air à l'heure (CAH) minimal est assuré par des ventilateurs d'extraction, alors que le refroidissement en périodes de surchauffe est assuré par de la ventilation naturelle. La figure 4.6 présente un aperçu de la modélisation de la serre effectuée sur le logiciel SketchUp et son intégration au bâtiment, alors que le tableau 4.3 résume les principales caractéristiques géométriques de la serre modélisée, qui sont présentées en détail à l'Annexe B.

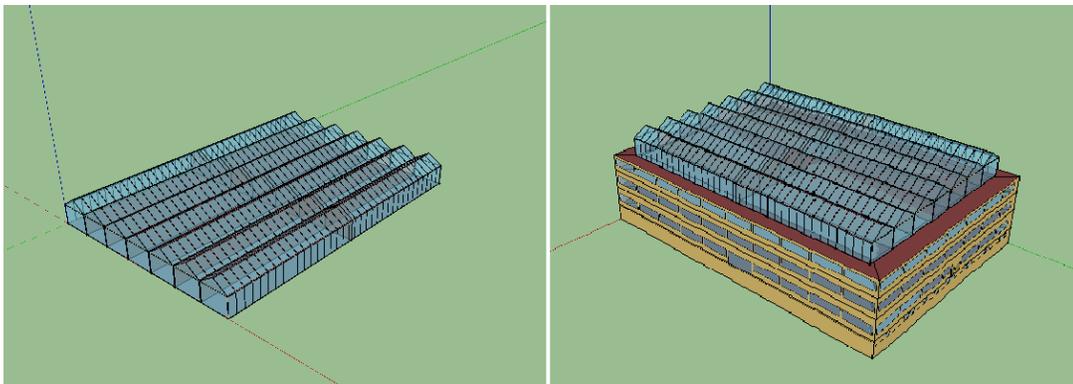


Figure 4.6 – Modèle 3D de la serre (à gauche) et intégration de la serre au bâtiment (à droite)

Tableau 4.3 – Principales caractéristiques géométriques de la serre modélisée

Description	Valeur
Orientation de la façade nord de la serre par rapport au nord géographique	+22,5°
Nombre de chapelles	7
Longueur et largeur d'une chapelle	64 m × 6,5 m
Largeur totale de la serre jumelée	45,5 m
Hauteur	À la gouttière : 4,27 m Au pignon : 6,3 m
Superficie de plancher totale	2 914 m ²
Volume total	15 513 m ³
Ratio de superficie de la fenestration des façades	90 %
Ratio de superficie de la fenestration du toit	85 %

4.3.2.1 Enveloppe et matériaux de la serre

Les matériaux de recouvrement d'une serre peuvent avoir des impacts majeurs sur les performances de celle-ci, comme expliqué précédemment. L'influence sur les besoins en chauffage, de même qu'en éclairage, a donc été évaluée pour deux différents assemblages de matériaux typiquement utilisés pour des serres commerciales *high-tech*, soit des panneaux de polycarbonate à double paroi et du verre à simple paroi, comme il l'est expliquée plus en détail à la section 4.4. Le premier offre un meilleur niveau d'isolation, mais laisse passer une moins grande portion de la lumière que le second. Le choix de ces matériaux se justifie notamment par leur durabilité supérieure. D'autres matériaux permettent l'atteinte d'intéressantes performances thermiques et optiques à moindres coûts initiaux, tels que les films de polyéthylène, mais nécessitent d'être remplacés plus fréquemment. Les serres *high-tech* et/ou sur les toits requièrent d'importants investissements financiers et nécessitent des matériaux offrant une durée de vie prolongée.

Il est à noter qu'un seul coefficient de déperditions thermiques global (valeur U) a été considéré pour l'enveloppe de la serre. Afin de tenir compte des ponts thermiques associés à la structure métallique, la valeur U de l'un ou l'autre des matériaux de référence analysés a été multipliée par un facteur correctif, comme recommandé par

ASHRAE (2011). De plus, afin de tenir compte des impacts de la structure et d'autres éléments sur la quantité de lumière reçue dans la serre, ces derniers pouvant occasionner de l'ombrage, un ratio de fenestration a été prédéterminé pour les façades et les toits, basé sur les recommandations du fabricant.

Le tableau 4.4 résume les principales propriétés de l'enveloppe de la serre modélisée. Il est à noter qu'il est discuté des rideaux thermiques à la section 4.3.2.8. Les propriétés thermiques et optiques des différents éléments constituant l'enveloppe de la serre, ainsi que les sources d'information utilisées pour déterminer ces hypothèses de modélisation, sont présentées de manière plus détaillée à l'Annexe B.

Tableau 4.4 – Principales propriétés de l'enveloppe de la serre modélisée

Description	Valeur U (W/m ² ·K)	Coefficient de gain solaire thermique du vitrage (SHGC) (-)	Transmittance du vitrage (-)
Murs et toits – scénarios avec polycarbonate double paroi	3,42	0,82	0,81
Murs et toits – scénarios avec vitrage simple paroi	6,22	0,84	0,90
Plancher de la serre au sol	6,45	-	-
Plancher de la serre sur toit – scénarios avec toit du bâtiment de niveau d'isolation faible	6,45	-	-
Plancher de la serre sur toit – scénarios avec toit du bâtiment de niveau d'isolation moyen	0,36	-	-
Plancher de la serre sur toit – scénarios avec toit du bâtiment de niveau d'isolation élevé	0,18	-	-

4.3.2.2 Définition des zones thermiques, charges internes et points de consigne

Chacune des sept chapelles a été subdivisée en deux espaces (*spaces* dans OS) et en zones thermiques (*thermal zones* dans OS) associées d'égales superficies, soit une zone nord et une zone sud, comme il l'est montré à la figure 4.7.

À des fins de simplifications, aucun élément intérieur n'a été modélisé. Tout comme pour le bâtiment, les zones thermiques sont séparées par des *air walls*, c'est-à-dire des connexions ouvertes. Pour un même scénario, l'ensemble des zones ont des paramètres identiques en ce qui a trait aux charges thermiques internes (occupation, éclairage, équipements électriques et infiltration d'air), aux appareils mécaniques (ventilation et chauffage), ainsi qu'aux températures de consigne de chauffage et de refroidissement. Des horaires typiques d'opération ont également été appliqués. Les principales caractéristiques opérationnelles de la serre sont présentées à l'Annexe B.

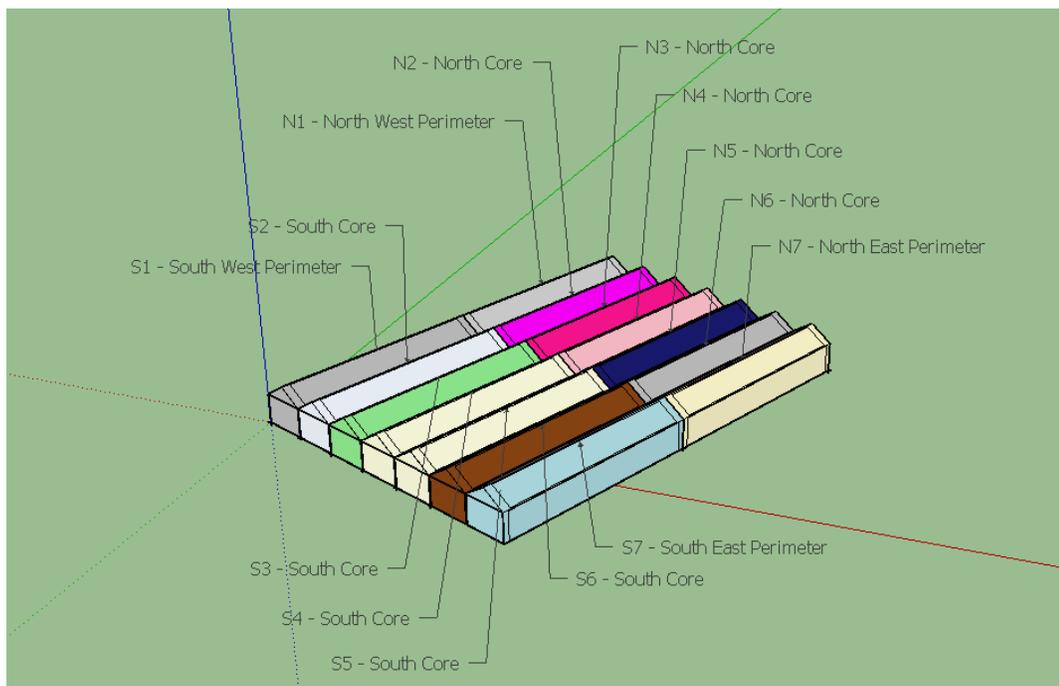


Figure 4.7 – Zones thermiques de la serre

4.3.2.3 Conditions de culture

Le maintien de conditions environnementales optimales exerce un impact déterminant sur la consommation énergétique d'une serre, particulièrement en climats froids. Bien que le contrôle des taux d'humidité et de CO₂ puisse affecter la consommation énergétique, la température de consigne serait toutefois le facteur ayant le plus grand

impact sur cette dernière. Chaque culture a une gamme optimale de températures à maintenir, impactant du fait même les besoins en chauffage de la serre. Le tableau 4.5 présente des gammes de températures diurnes et nocturnes recommandées par diverses sources pour deux cultures communément cultivées en serre au Québec, soit la tomate et la laitue, qui seront respectivement catégorisées de cultures de type chaud et de type froid pour les besoins de cette étude. Les températures de consigne utilisées pour la modélisation de la serre sont présentées dans le tableau 4.6 et les périodes associées (jour, nuit, été et hiver) sont définies dans le tableau 4.7. Il est à noter que les conditions de culture sont également présentées de manière détaillée à l'Annexe B.

Tableau 4.5 – Températures de culture idéales pour certains légumes de serre

Espèce	Températures diurnes (°C)	Températures nocturnes (°C)	Sources
Tomate	19 – 21	17 – 18	OMAFRA (2010)
	18 – 24	16 – 20	Turcotte <i>et al.</i> (2015)
Laitue	18 – 22	15 – 21	OMAFRA (2010)
	14 – 18	10 – 13	Wees <i>et al.</i> (1996)

Tableau 4.6 – Températures de consigne par type de culture utilisées pour la modélisation

Température de consigne	Tomate (culture de type chaud)	Laitue (culture de type froid)
Température minimale de jour	20°C	18°C
Température maximale de jour	24°C	21°C
Température minimale de nuit	18°C	Été: 18°C / Hiver: 15°C
Température maximale de nuit	22°C	21°C

Tableau 4.7 – Définition des périodes utilisées pour la modélisation

Nom de la période	Description de la période
Jour	6 h à 22 h (16 heures par jour)
Nuit	22 h à 6 h (8 heures par jour)
Hiver	15 octobre au 14 avril
Été	15 avril au 14 octobre

4.3.2.4 Température du sol et du plancher de la serre

Bien que les échanges thermiques entre une serre et le sol soient grandement inférieurs à ceux de son enveloppe (murs et toit) avec l'environnement extérieur, il semble tout de même pertinent de s'attarder à ce facteur dans le cadre de cette étude. En effet, dans le cas d'une ST, les pertes thermiques du toit du bâtiment permettent de conserver le plancher de la serre à une température plus élevée et stable en périodes froides, limitant ainsi ses pertes thermiques. Cependant, la température du plancher d'une serre située au sol est, quant à elle, plutôt influencée par les conditions climatiques extérieures, impactant du fait même la température du sol. La serre sur sol aura ainsi des pertes thermiques par le plancher plus élevées que celle sur toit en périodes froides. Le bilan thermique de la serre sur sol, en comparaison à celle sur toit, s'en trouve ainsi différent.

Selon la documentation d'EnergyPlus (2014c), pour un bâtiment commercial, une température du sol de 2°C sous la température de consigne des espaces en contact avec ce dernier permettrait de simuler les pertes thermiques du plancher de manière raisonnable. Toutefois, l'étude de Nawalany *et al.* (2014) semble démontrer que, pour une serre individuelle, les fluctuations de la température du sol sous la dalle seraient plus grandes, bien que largement réduites lorsque l'on se rapproche du centre de la serre. Dans le cadre d'une étude de calibration d'une serre individuelle à Montréal, Léveillé-Guillemette et Monfet (2018) suggèrent qu'une valeur de 25 % entre la température moyenne mensuelle du sol à 0,5 m de profondeur et de la température intérieure de la serre serait plus adaptée à leur modèle. Toutefois, la serre évaluée dans le cadre de la présente étude est jumelée et de superficie supérieure aux études citées précédemment. L'impact des conditions extérieures devrait ainsi s'en trouver réduit. Afin de tout de même considérer l'impact de ces variations mensuelles moyennes, une valeur de 75 % entre la température du sol à 0,5 m et la température intérieure de consigne de la serre est suggérée. Ainsi, pour chaque mois de l'année (i), il est calculé:

$$T_{d_i} = 0,75 \times (T_{cs} - T_{0,5m_i}) + T_{0,5m_i}$$

Où T_{d_i} : Température moyenne mensuelle sous la dalle de la serre (°C)

T_{cs} : Température de consigne journalière moyenne (°C)

$T_{0,5m_i}$: Température moyenne mensuelle du sol à 0,5 mètre de profondeur (°C)

Il est important de spécifier qu'il ne s'agit toutefois que d'une estimation et que l'obtention de températures plus précises nécessite une analyse approfondie. Il est aussi à noter que la serre sur sol à l'étude est considérée être sise sur une dalle de béton non isolée. La figure 4.8 illustre un aperçu des températures moyennes mensuelles sous la dalle calculées et considérées dans le cadre de cette étude.

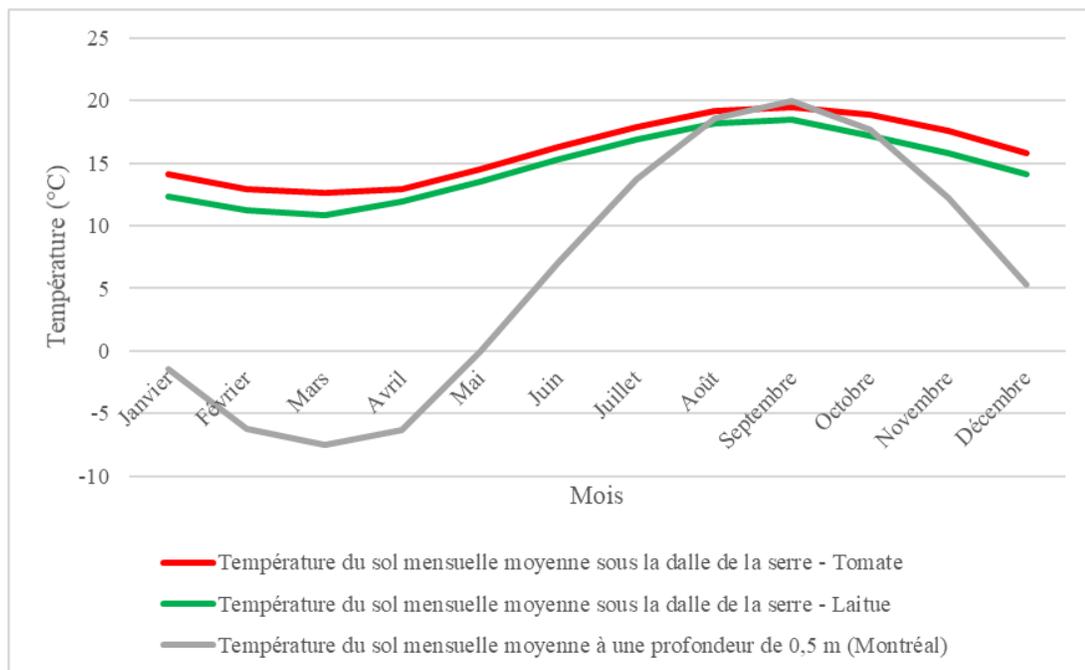


Figure 4.8 – Température sous la dalle de la serre sur sol et à 0,5 m de profondeur

4.3.2.5 Ventilation naturelle

La ventilation naturelle permet de réduire la ventilation mécanique, de même que la consommation énergétique associée. Il est recommandé d'être en mesure d'assurer un débit d'air neuf de $0,035 \text{ m}^3/\text{s}$ par mètre carré de surface de plancher (Critten et Bailey, 2002), ou encore de 45 à 60 CAH (ASHRAE, 2011; Watson *et al.*, 2019), afin de permettre l'abaissement de la température de la serre lors des périodes de surchauffe.

Tout comme pour le bâtiment, un débit de conception (*zone ventilation design flow rate* dans OS) a été utilisé pour simuler l'opération de la ventilation naturelle de la serre, variant selon des températures de consigne définies, de même que les conditions environnementales extérieures. Lorsque la température de consigne maximale de la serre est atteinte, le taux de ventilation naturelle peut ainsi augmenter jusqu'à un débit maximal, soit de 60 CAH, simulant ainsi l'ouverture de fenêtres dans la serre. De plus, un taux constant d'infiltration naturelle d'air de 0,6 CAH a été utilisé pour la modélisation de la serre (ASAE, 2003; ASHRAE, 2011). Il est finalement à noter qu'il est considéré que la serre à l'étude ne possède pas de système refroidissement par évaporation et que des conditions environnementales acceptables sont maintenues par la ventilation (naturelle et mécanique). Les détails concernant les paramètres utilisés sont présentés à l'Annexe B.

4.3.2.6 Ventilation mécanique

Dans une serre ouverte ventilée naturellement, il est généralement nécessaire d'installer des ventilateurs horizontaux au-dessus de la canopée pour assurer une bonne recirculation de l'air, de même que des ventilateurs d'évacuation ou à pression positive, pour assurer un renouvellement d'air minimal lorsque la ventilation naturelle est limitée ou nulle. L'utilisation de ces derniers permet un meilleur contrôle du renouvellement et de la température de l'air que la ventilation naturelle en périodes froides. Pendant l'hiver, dans un climat froid, il est recommandé de pouvoir assurer

une alimentation d'air extérieur minimale de 2 à 3 CAH (Watson *et al.*, 2019) ou de 5 à 15 L/s par mètre carré de surface de plancher (ASAE, 2003; ASHRAE, 2011) afin de maintenir des conditions environnementales optimales (taux d'humidité et de CO₂).

En périodes froides, l'alimentation d'air extérieur peut cependant avoir un important impact sur les besoins en chauffage. De plus, les équipements de ventilation mécaniques consomment de l'électricité et produisent de la chaleur, pouvant par le fait même avoir un certain impact sur le bilan énergétique d'une serre commerciale. La consommation électrique liée à leur opération, ainsi que les déperditions thermiques associées, ont été estimées en fonction des besoins en ventilation de la serre à l'étude et intégrés à la modélisation. Bien que l'opération de ces équipements puisse être variable et optimisée, dans le cadre de cette étude ces derniers sont opérés à une vitesse constante pendant le jour à un débit de consigne de 2 CAH, et sont arrêtés pendant la nuit. Il est considéré que la ventilation mécanique permet de maintenir des conditions environnementales acceptables en périodes de chauffage. Les caractéristiques associées à la ventilation et aux appareils mécaniques sont présentées de manière plus détaillée à l'Annexe B.

4.3.2.7 Éclairage photosynthétique artificiel

L'intensité de l'éclairage, la photopériode et la quantité de lumière reçue journalièrement peuvent avoir une incidence sur le développement et la morphologie des plantes (Dorais, 2003; Dorais *et al.*, 2002). Les tableaux 4.8 et 4.9 présentent des recommandations pour la culture de la tomate et de la laitue, respectivement quant à l'éclairage artificiel et aux besoins journaliers optimaux en lumière. Il est à noter que, comme mentionné par Torres et Lopez (2010), les serres en zones nordiques reçoivent généralement une quantité insuffisante de lumière naturelle en périodes de faible intensité lumineuse, particulièrement en hiver, ce qui peut limiter la qualité de production de certaines cultures. L'éclairage artificiel, bien qu'il ne permette pas nécessairement d'atteindre une quantité de lumière reçue optimale en tout temps,

assure tout de même une meilleure productivité par l'atteinte de conditions acceptables. Par exemple, selon les auteurs, pour la culture de la tomate, il est considéré que des valeurs du DLI journalier moyen de 22 à 30 mol/m²/jour sont de haute qualité, de 14 à 20 mol/m²/jour sont de bonne qualité et de 10 à 12 mol/m²/jour sont de qualité acceptable. De plus, selon Runkle (2013), même si la culture ne reçoit pas une quantité de lumière acceptable lors d'une journée spécifique, cela aura peu d'influence sur la productivité globale, car la croissance des plantes dépend surtout de la quantité de lumière moyenne reçue sur de plus longues périodes de temps, typiquement de l'ordre de plusieurs semaines. Les journées de faible luminosité sont donc compensées par des journées de plus haute luminosité.

Tableau 4.8 – Intensités des appareils d'éclairage et photopériodes recommandées pour la culture en serre de la tomate et de la laitue

Plante	Intensité de l'éclairage artificiel recommandée (μmol/m ² ·s)	Photopériode optimale (heures/jour)	Sources
Tomate	55 – 110	16	ASHRAE (2011)
	130 – 170	16 – 18	Turcotte <i>et al.</i> (2015)
	100 – 150	12 – 17	Dorais (2003)
Laitue	55 – 110	24	ASHRAE (2011)
	50 – 100	16	OMAFRA (2010)
	50 – 100	16 – 24	Wees <i>et al.</i> (1996) Dorais (2003)

Tableau 4.9 – Valeurs optimales du DLI pour la culture en serre de la tomate et de la laitue

Plante	DLI optimal (mol/m ² /jour)	Sources
Tomate	20 – 30 +	Mattson (2017), Torres et Lopez (2010)
Laitue	12 – 17 +	Mattson (2017), Dorais (2003)

Dans le cadre de cette étude, des paramètres spécifiques associés à l'éclairage artificiel ont été établis en fonction de ces recommandations. L'impact sur la consommation

électrique et les besoins en chauffage de la serre ont été évalués pour différentes technologies d'appareils d'éclairage, plus spécifiquement des lampes de type HPS et de type LED, comme il l'est expliqué plus en détail à la section 4.4. La puissance installée pour chacune des situations a été déterminée de manière à fournir des intensités équivalentes à celles recommandées. À des fins de simplifications, il est considéré que la totalité de l'énergie consommée par les appareils d'éclairage est transformée en chaleur (par conduction, convection et rayonnement) transférée à la serre, alors que la portion de l'énergie radiative absorbée par les plantes est, quant à elle, négligée. De plus, il a été considéré, tant pour le cas de la serre sur sol que sur toit, qu'aucun élément environnant n'affectait la quantité de lumière reçue par ombrage.

Une même logique de contrôle, qui autorise ou non le fonctionnement des appareils d'éclairage selon certains critères visant l'atteinte de conditions optimales, est appliquée à tous les scénarios. Ces critères sont l'heure de la journée (permission entre 6h et 22h), la quantité de lumière moyenne reçue journalièrement (DLI) et l'intensité de lumière naturelle instantanée. La séquence de contrôle considère une quantité de lumière journalière optimale pour chacune des cultures et l'éclairage artificiel est arrêté si cette valeur est atteinte. Il est à noter que l'intensité et la quantité de lumière ont été calculées par modélisation à l'aide de capteurs optiques, représentés par des *daylight sensor* dans OS. Des capteurs ont été placés à 76 cm (30 po) du sol, au centre de chacune des 14 zones de la serre. La moyenne pondérée des valeurs obtenues par les capteurs a été utilisée pour le contrôle de l'ensemble des appareils d'éclairage. Les principaux paramètres associés à l'éclairage de la serre utilisés pour cette étude sont résumés au tableau 4.10. Les conditions et la logique d'opération de l'éclairage, ainsi que les caractéristiques techniques des appareils associés, sont présentées en détail à l'Annexe B.

Tableau 4.10 – Consignes d'éclairage et principaux paramètres des appareils d'éclairage utilisés pour la modélisation par type de culture

Consigne ou paramètre	Tomates (chaud)	Laitue (froid)
Valeur optimale du DLI	30 mol/m ² /jour	17 mol/m ² /jour
Période d'autorisation d'éclairage	6 h à 22 h	6 h à 22 h
Photopériode	16 h	16 h
Intensité de l'éclairage artificiel	150 µmol/m ² /s	50 µmol/m ² /s
Efficacité des appareils d'éclairage de type HPS	1,3 µmol/J	1,3 µmol/J
Efficacité des appareils d'éclairage de type LED	2,6 µmol/J	2,6 µmol/J
Puissance d'éclairage installée avec appareils de type HPS	115 W/m ²	38 W/m ²
Puissance d'éclairage installée avec appareils de type LED	58 W/m ²	19 W/m ²

4.3.2.8 Rideaux thermiques

L'installation de rideaux thermiques a été incluse pour l'ensemble des scénarios. Ils sont contrôlés selon un horaire fixe à l'aide de l'option *shading control* dans OS, qui permet de modéliser l'horaire d'utilisation et les caractéristiques thermiques et optiques de rideaux ou d'écrans. À des fins de simplifications, ces derniers sont considérés couvrir l'ensemble des fenêtres du toit de la serre en période nocturne, bien qu'il ne s'agisse pas nécessairement d'un mode d'opération optimal. Il est à noter que l'outil offert par OS est plutôt conçu pour modéliser l'utilisation de dispositifs d'ombrage conventionnels de bâtiments et ne s'avère pas être parfaitement adapté pour représenter l'ensemble des bénéfices énergétiques associés aux rideaux thermiques, qui vont au-delà de l'amélioration de la résistance thermique de l'enveloppe. En effet, ils peuvent, selon leur configuration, notamment entraîner une réduction du volume d'air à chauffer et de l'infiltration d'air. Il est également à noter que, bien que de tels systèmes puissent avoir un impact sur les rendements de production ou la surface cultivable de la serre, étant donné l'ombrage supplémentaire qu'ils induisent, ces impacts n'ont pas spécifiquement été évalués dans le cadre de cette étude. L'impact sur la quantité de lumière reçue a tout de même été considéré dans les hypothèses relatives au ratio de fenestration du toit de la serre. Les paramètres de modélisation associés aux rideaux thermiques sont présentés à l'Annexe B.

4.3.2.9 Autres charges thermiques

Comme discuté précédemment, différents phénomènes associés aux interactions qu'ont les plantes avec leur environnement, comme l'évapotranspiration, peuvent avoir un impact non négligeable sur le bilan énergétique d'un espace de culture en environnement contrôlé. Par exemple, Talbot et Monfet (2020) démontrent, dans le cadre d'une étude paramétrique par modélisation énergétique se penchant sur un espace d'agriculture verticale en intérieur, que la considération de diverses interactions des plantes avec leur environnement a un impact significatif sur les charges de chauffage et de refroidissement de l'espace. D'autres études se sont plutôt intéressées à l'impact des plantes cultivées en serre. Les flux énergétiques dans une serre, à l'opposé d'un espace d'agriculture en intérieur, dépendent beaucoup plus des conditions climatiques extérieures. L'étude de Ahamed *et al.* (2018), qui effectue la modélisation énergétique d'une serre commerciale située dans un climat froid, montre d'ailleurs que la grande majorité des besoins en chauffage de cette dernière sont en hiver, quand les températures extérieures et l'ensoleillement sont les moins élevés. Durant cette période, les besoins en chauffage sont principalement associés aux pertes thermiques par l'enveloppe de la serre et à l'infiltration d'air extérieur. Il y est tout de même montré que l'évapotranspiration des plantes induit une quantité non négligeable de pertes thermiques, suggérant que le niveau de précision d'un modèle énergétique d'une serre s'en trouve amélioré en tenant compte de ce phénomène. De plus, les auteurs rappellent que les différents mécanismes associés aux pertes et gains thermiques d'une serre sont fortement affectés par le climat dans laquelle elle se situe.

Plusieurs études antérieures, utilisant des modèles mathématiques ou de la modélisation assistée par logiciel visant à évaluer certains aspects ou dynamiques énergétiques de serres, ont négligé les différentes interactions qu'ont les plantes avec leur environnement, ces dernières variant dans le temps et étant dépendantes d'une

multitude de facteurs (p. ex. le type de culture, les conditions extérieures et intérieures, etc.), ce qui les rend complexes à simuler (Choab *et al.*, 2019; Sethi *et al.*, 2013).

Dans le cadre de la présente étude, qui se veut une analyse paramétrique comparative, comme il le sera expliqué dans la section suivante, les gains et pertes thermiques associés aux plantes, au contrôle du taux d'humidité et à l'utilisation d'un système d'apport de CO₂ ont donc été négligés à des fins de simplifications. Il est considéré que les systèmes mécaniques de ventilation, ainsi que la ventilation naturelle, opérant selon les mêmes critères pour tous les scénarios à l'étude, permettent le maintien de conditions de culture acceptables. Bien que le niveau de précision du modèle énergétique puisse s'en trouver affecté, il s'agit d'une approche simplifiée qui permet tout de même d'étudier certains aspects spécifiques visés par cette étude et de tirer des conclusions pertinentes.

4.4 Étude paramétrique comparative: variables et scénarios

La présente étude se penche sur trois catégories de paramètres qui ont le potentiel d'influencer significativement les bilans thermiques des infrastructures à l'étude:

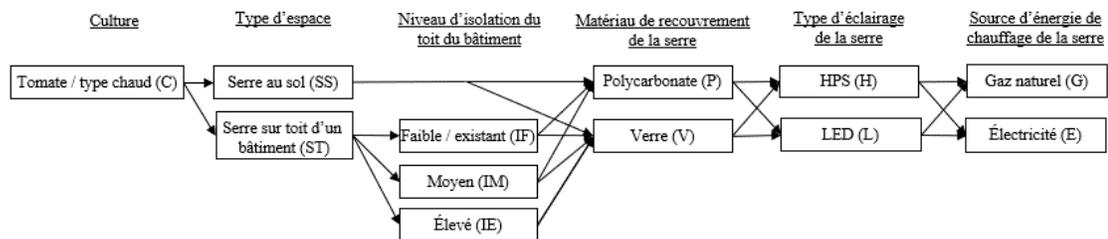
1. caractéristiques opérationnelles et conditions de culture à maintenir dans la serre;
2. caractéristiques architecturales et techniques de la serre et du bâtiment;
3. sources d'énergie utilisées pour le chauffage de la serre.

L'analyse comparative de différents scénarios a été effectuée grâce à la modification de certains paramètres des catégories mentionnées. La figure 4.9 résume les paramètres et scénarios à l'étude, dont la nomenclature associée est présentée au tableau 4.11.

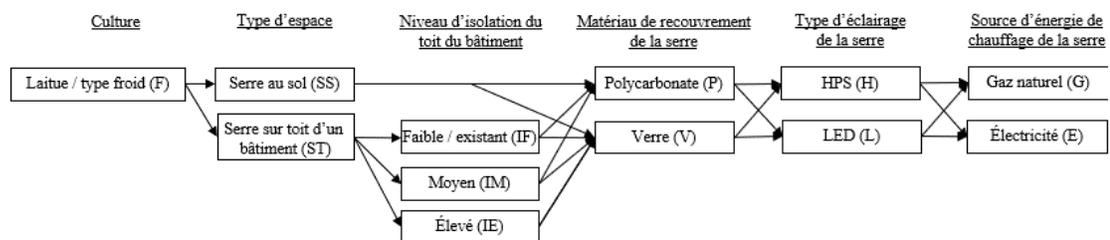
Tableau 4.11 – Nomenclature utilisée pour la définition des scénarios

Type de culture	Type d'espace	Niveau d'isolation du toit du bâtiment	Matériau de recouvrement de la serre	Type d'éclairage de la serre	Source d'énergie de chauffage de la serre
C: Chaud F: Froid	B : Bâtiment seul SS: Serre sur sol ST: Serre sur toit	IF: Faible IM: Moyen IE: Élevé	P: Polycarbonate V: Verre	H: HPS L: LED	G: Gaz naturel E: Électricité

Scénarios de culture en serre chaude



Scénarios de culture en serre froide



Scénarios de bâtiment seul (sans serre intégrée au toit)

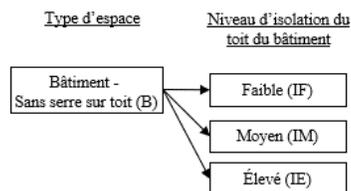


Figure 4.9 – Matrices des scénarios à l'étude

Les paramètres ont été identifiés et sélectionnés dans le but d'évaluer la variation des performances énergétiques et environnementales d'une serre urbaine commerciale, de même que du bâtiment hôte, pour divers contextes. Les conditions météorologiques du site à l'étude sont les mêmes pour l'ensemble des scénarios. La comparaison de

l'ensemble des indicateurs de performances de chacun des scénarios, soit la consommation énergétique, de même que les émissions de GES et les coûts associés, a été effectuée de manière séparée pour la serre et pour le bâtiment, afin de mieux évaluer les bénéfices potentiels pour chacune de ces infrastructures. Les scénarios ont également été comparés de manière indépendante pour les cas considérant une serre où est effectuée la culture de la tomate (serre chaude) et ceux considérant une serre où est effectuée la culture de la laitue (serre froide). Finalement, les scénarios ont été comparés à un scénario de référence. Ainsi, les performances de la serre ont été comparées avec celles des scénarios de référence C-SS-PHG (serre chaude / au sol / en polycarbonate / éclairage de type HPS / chauffage au gaz naturel) pour les scénarios incluant une serre chaude, et F-SS-PHG (serre froide / au sol / en polycarbonate / éclairage de type HPS / chauffage au gaz naturel) pour les scénarios incluant une serre froide. Les performances du bâtiment de l'ensemble des scénarios ont quant à elles été comparées avec le scénario de référence BIF (bâtiment sans serre au toit / toit avec niveau d'isolation faible).

4.5 Analyse de performances des scénarios

La modélisation énergétique a permis d'établir le profil de la puissance électrique (kW), de l'énergie électrique (kWh), de même que de la consommation de gaz naturel (m³) du bâtiment et/ou de l'espace de production de chaque scénario. Il est à noter que, dans le cas de la serre, une attention particulière a été portée à l'impact de l'éclairage. Ainsi, une analyse comparant la quantité de lumière naturelle reçue dans la serre et les impacts sur les besoins d'éclairage artificiels, en fonction des différents matériaux de recouvrement et types d'appareils d'éclairage à l'étude, a aussi été effectuée. Cette analyse a pour but d'estimer les impacts des matériaux de construction sur les rendements de production et les besoins supplémentaires en éclairage artificiel. Bien qu'elle permette de mieux refléter les performances globales des scénarios étudiés, il ne s'agit toutefois pas d'une analyse approfondie.

En premier lieu, la consommation énergétique mensuelle et annuelle de la serre (ES) a été établie pour chaque scénario (i) et répartie en trois portions, soit la consommation électrique de base (ES_b), associée au fonctionnement des appareils mécaniques et électriques, la consommation électrique associée à l'éclairage ($ES_{écl}$), ainsi que la consommation associée au chauffage (ES_c) à l'électricité ou au gaz naturel. Pour le bâtiment (EB), la consommation énergétique associée à l'éclairage a été incluse à celle de base (EB_b) et celle associée au chauffage a été évaluée séparément (EB_c). Ainsi :

$$ES_i[MJ] = ES_{b_i}[MJ] + ES_{écl_i}[MJ] + ES_{c_i}[MJ] ; EB_i[MJ] = EB_{b_i}[MJ] + EB_{c_i}[MJ]$$

$$E_i[MJ] = ES_i[MJ] + EB_i[MJ]$$

Il a également été possible, pour chaque scénario (i), de déterminer les émissions de gaz à effet de serre (C) associées à la consommation énergétique du bâtiment (CB) et/ou de la serre (CS). Un facteur d'émissions de GES associé à l'une ou l'autre des sources d'énergie utilisées, soit l'électricité ($FE_{él}$) et le gaz naturel (FE_g), a été appliqué aux consommations énergétiques résultantes des différents scénarios. Ainsi :

Pour la serre (avec du chauffage électrique) :

$$CS_i [t CO_2 eq.] = FE_{él} \left[\frac{t CO_2 eq.}{MJ} \right] \times (ES_{b_i} [MJ] + ES_{écl_i} [MJ] + ES_{c_i} [MJ])$$

Pour la serre (avec du chauffage au gaz naturel) :

$$CS_i [t CO_2 eq.] = FE_{él} \left[\frac{t CO_2 eq.}{MJ} \right] \times (ES_{b_i} [MJ] + ES_{écl_i} [MJ]) + FE_g \left[\frac{t CO_2 eq.}{MJ} \right] \times ES_{c_i} [MJ]$$

Pour le bâtiment (avec du chauffage au gaz naturel) :

$$CS_i [t CO_2 eq.] = FE_{él} \left[\frac{t CO_2 eq.}{MJ} \right] \times EB_{b_i} [MJ] + FE_g \left[\frac{t CO_2 eq.}{MJ} \right] \times EB_{c_i} [MJ]$$

De plus, une analyse des coûts énergétiques a également été faite. Le tableau 4.12 présente l'efficacité considérée pour les différentes sources d'énergie évaluées des appareils de chauffage de la serre, ainsi que les facteurs de conversion et d'émissions de GES utilisés dans cette étude, issus du contexte énergétique particulier du Québec. Les tarifs énergétiques qui ont été utilisés sont, quant à eux, présentés dans le tableau 4.13. Il est à noter que deux options tarifaires de l'électricité ont été évaluées dans le cadre de cette étude. Une explication plus détaillée de la tarification énergétique est présentée à l'Annexe C.

Tableau 4.12 – Efficacité des appareils de chauffage et facteurs de conversion d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre utilisées pour l'étude

Paramètre	Gaz naturel	Électricité
Efficacité des appareils de chauffage	80 %	100 %
Facteur d'émission de GES (MERN, 2020)	49,863 kg CO ₂ éq / GJ	0,567 kg CO ₂ éq / GJ

Tableau 4.13 – Tarifs énergétiques utilisés pour l'étude (avant taxes)

Structure du tarif d'électricité – option 1 (Hydro-Québec, 2020c)	
Énergie : Première tranche mensuelle de 210 000 kWh	0,0503 \$/kWh
Énergie : Reste de l'énergie mensuelle consommée	0,0373 \$/kWh
Puissance appelée maximale mensuelle	14,58 \$/kW
Structure du tarif d'électricité – option 2 (Hydro-Québec, 2020b)	
Énergie	0,0559 \$/kWh
Tarif du gaz naturel (Transition Énergétique Québec, 2018)	
Énergie	0,40 \$/m ³ de gaz naturel

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET ANALYSE

Ce chapitre présente et analyse les principaux résultats obtenus par modélisation énergétique des différents scénarios à l'étude.

5.1 Analyse de l'éclairage: impact du matériau de recouvrement sur la lumière reçue et les besoins en éclairage artificiel

En premier lieu, une analyse a été effectuée pour comparer les performances optiques des deux matériaux de recouvrement de la serre à l'étude, soit le polycarbonate et le verre. La lumière naturelle reçue et les besoins en éclairage ont été évalués dans les deux cas. L'impact de l'utilisation d'appareils d'éclairage artificiel a également été évalué. Les résultats relatifs à l'analyse de la lumière naturelle reçue en serre et des besoins en éclairage présentés dans cette section sont détaillés à l'Annexe D.

5.1.1 Impacts des matériaux sur la lumière naturelle reçue

De manière générale, la serre en polycarbonate reçoit moins de lumière naturelle que celle en verre, soit une réduction annuelle de l'ordre de 12 %, ce qui entraîne une augmentation des besoins en éclairage artificiel, car plus de jours dans l'année n'atteignent pas la valeur optimale considérée du DLI. La figure 5.1 illustre la valeur moyenne du DLI pour chaque mois de l'année pour une surface horizontale située à l'extérieur, ainsi qu'à l'intérieur de la serre en polycarbonate et en verre, et ce, avant l'utilisation d'éclairage artificiel. De plus, pour chacune des cultures, la valeur optimale

du DLI considérée est montrée à titre indicatif, soit 30 mol/m²/jour pour la tomate et 17 mol/m²/jour pour la laitue. La figure 5.2 illustre, quant à elle, pour chacun des matériaux de recouvrement et des cultures à l'étude, le nombre de jours par mois n'atteignant pas une quantité de lumière journalière considérée optimale, et ce, sans l'utilisation d'éclairage artificiel.

Il est possible d'y observer que les besoins en lumière sont comblés en presque totalité pour la laitue pendant les mois d'été, alors que la tomate nécessite quelques jours d'éclairage d'appoint. La serre en verre bénéficie, pour la plupart des mois, de quelques jours supplémentaires atteignant les valeurs optimales du DLI avec la lumière naturelle seulement. Les besoins en éclairage artificiel sont particulièrement importants entre octobre et février, tant pour la laitue que la tomate, la valeur optimale du DLI n'étant pas atteinte pour la majorité des jours de ces mois.

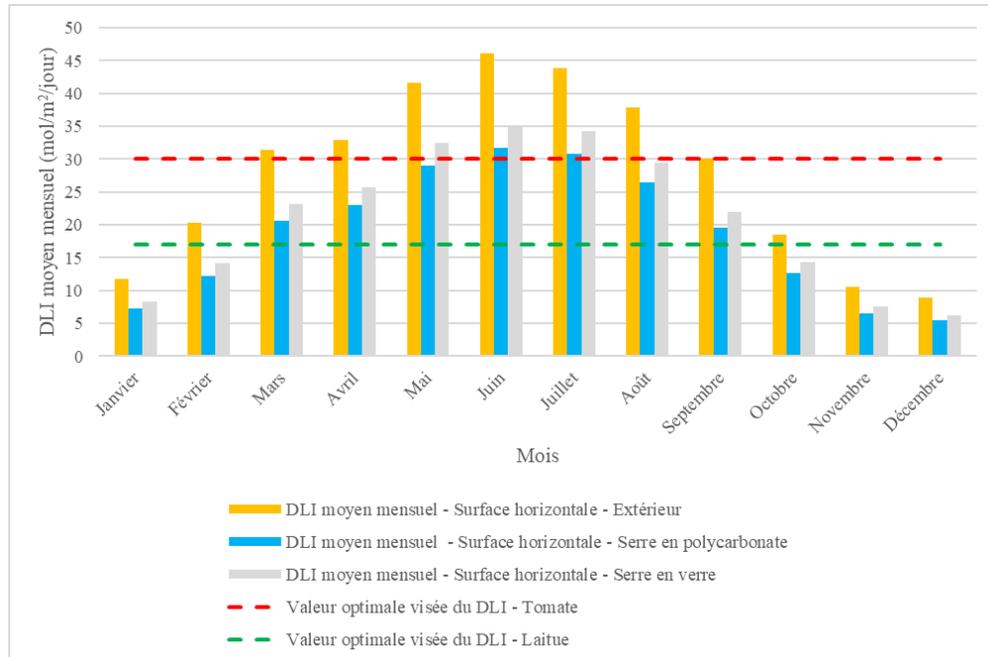


Figure 5.1 – DLI moyen mensuel pour la serre en polycarbonate et en verre

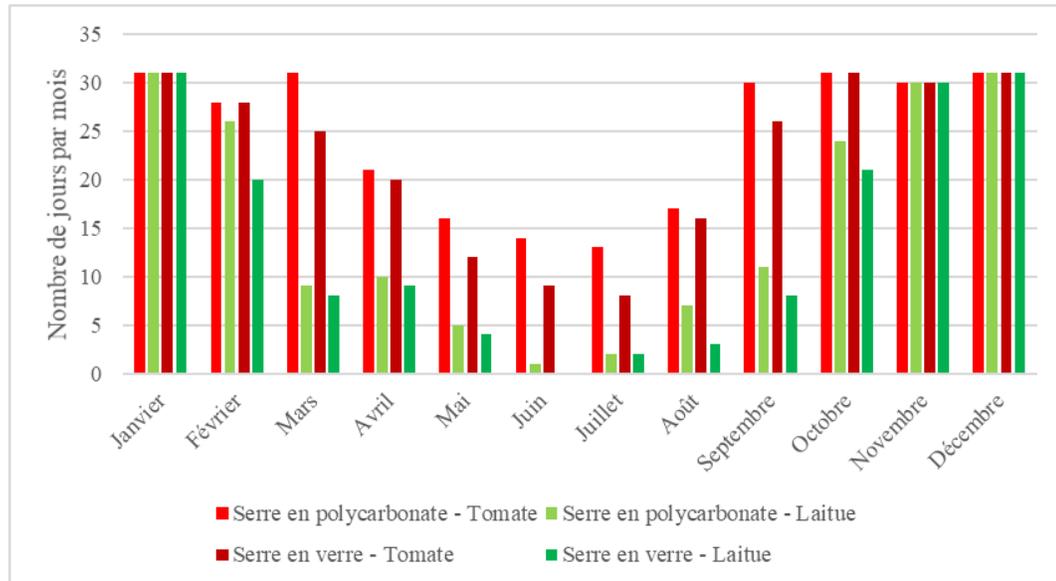


Figure 5.2 – Nombre de jours par mois n'atteignant pas la valeur optimale visée du DLI sans éclairage artificiel selon les cultures et matériaux de recouvrement à l'étude

5.1.2 Impacts des matériaux de recouvrement sur les besoins en éclairage

Pour donner suite à l'évaluation de la lumière naturelle reçue journalièrement effectuée précédemment, une évaluation des besoins en éclairage pour l'atteinte théorique de conditions de culture idéales de la tomate et de la laitue a été effectuée. Il est à noter que le modèle considère que les besoins en éclairage demeurent constants tout au long de l'année. Il est aussi à rappeler que l'analyse est effectuée pour une puissance d'éclairage fixe et une photopériode fixe, c'est-à-dire que, sous ces conditions, la valeur de DLI optimale n'est pas toujours atteinte. La logique d'utilisation des appareils d'éclairage est détaillée à l'Annexe B. La figure 5.3 illustre, pour chacun des matériaux de recouvrement et des cultures à l'étude, le nombre de jours par mois n'atteignant pas une quantité de lumière journalière considérée optimale, et ce, avec l'utilisation d'éclairage artificiel. La figure 5.4 résume les résultats sur une base annuelle.

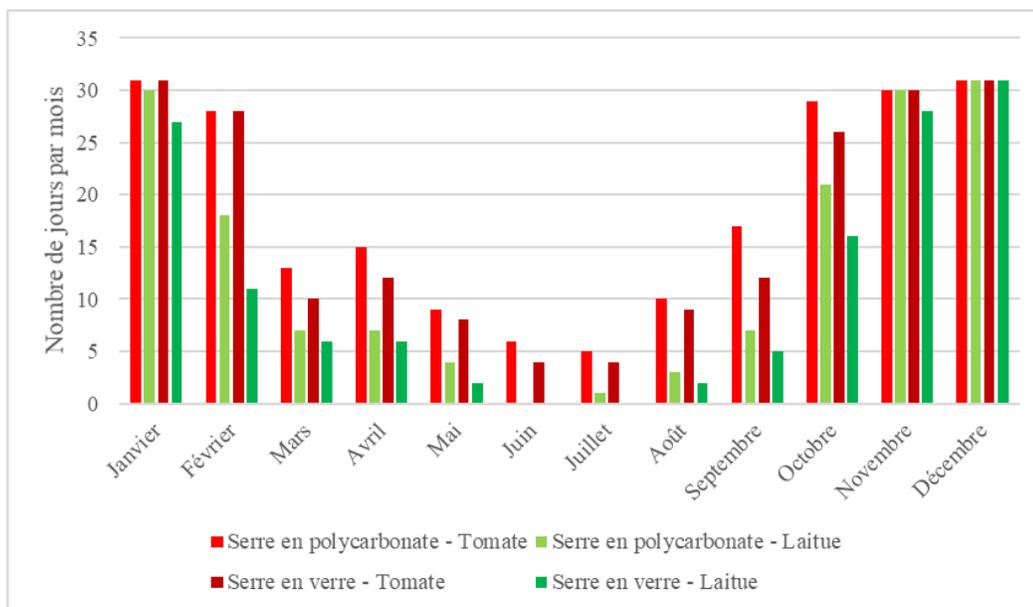


Figure 5.3 – Nombre de jours par mois n'atteignant pas la valeur optimale visée du DLI avec éclairage artificiel selon les cultures et matériaux de recouvrement à l'étude

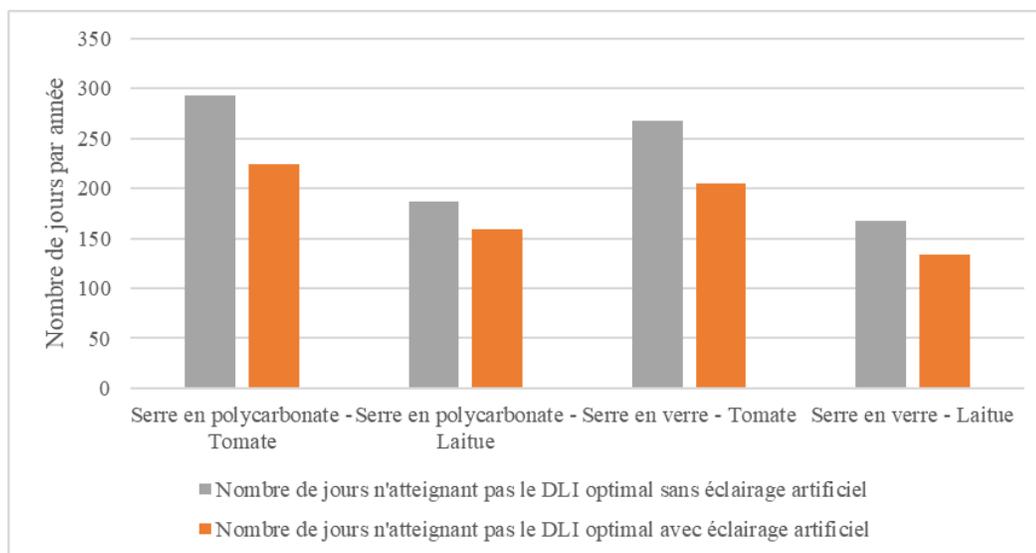


Figure 5.4 – Comparaison des besoins annuels en éclairage artificiel et de l'impact de l'utilisation de l'éclairage artificiel sur l'atteinte du DLI optimal selon les cultures et matériaux de recouvrement de la serre

Pour la culture de la tomate, des réductions annuelles de 26 jours n'atteignant pas la valeur optimale du DLI sans éclairage artificiel (9 %) et de 19 jours n'atteignant pas la valeur optimale du DLI avec éclairage artificiel (8 %) sont observées avec l'utilisation du verre, plutôt que du polycarbonate. Dans le cas de la culture de la laitue, des réductions annuelles de 20 jours n'atteignant pas la valeur optimale du DLI sans éclairage artificiel (11 %) et de 25 jours n'atteignant pas la valeur optimale du DLI avec éclairage artificiel (16 %) sont observées avec l'utilisation du verre, plutôt que du polycarbonate. L'utilisation du verre plutôt que du polycarbonate permet ainsi l'atteinte de meilleures conditions de culture pour un plus grand nombre de jours par année, de même qu'une réduction du nombre d'heures d'utilisation des appareils d'éclairage, et ce, pour les deux cultures à l'étude. Ces gains peuvent, par le fait même, se traduire potentiellement en de meilleurs rendements de culture et des économies associées à une durée de vie augmentée des appareils d'éclairage et des besoins réduits en maintenance. L'évaluation de ces impacts sort toutefois du cadre de cette étude.

Dans un même ordre d'idées, il est également possible d'observer que, pour la serre en polycarbonate, l'utilisation d'éclairage artificiel permet une réduction de 69 jours (24 %) et de 28 jours (15 %) n'atteignant pas la valeur optimale du DLI (24 %), respectivement pour la tomate et la laitue, par rapport à une même serre n'utilisant pas d'éclairage artificiel. Pour la serre en verre, l'utilisation d'éclairage artificiel permet une réduction de 62 jours (23 %) et de 33 jours (20 %) n'atteignant pas la valeur optimale du DLI (15 %), respectivement pour la tomate et la laitue, par rapport à une même serre n'utilisant pas d'éclairage artificiel. Il est ainsi possible de conclure que l'utilisation d'appareils d'éclairage artificiel permet une réduction significative du nombre de jours n'atteignant pas des conditions de luminosité de qualité optimale. Il est aussi à rappeler que, comme mentionné précédemment, même si la valeur optimale visée du DLI n'est pas atteinte pendant plusieurs journées de l'année, particulièrement en période hivernale, cela ne signifie pas que la quantité de lumière reçue globalement est insuffisante pour faire la culture de la tomate ou de la laitue. L'utilisation de

l'éclairage artificiel permet, théoriquement, d'optimiser la productivité de chacune des cultures en réduisant le nombre de jours avec une quantité de lumière reçue sous un seuil considéré optimal, mais aussi en augmentant de manière non négligeable la quantité de lumière reçue en périodes de faible luminosité naturelle, favorisant ainsi globalement de meilleurs rendements potentiels. L'évaluation de ces bénéfices sort toutefois du cadre de cette étude.

5.1.3 Consommation électrique de l'éclairage artificiel selon le matériau de recouvrement et le type d'appareils d'éclairage

Les variations des besoins en éclairage de la serre, associées aux divers matériaux de recouvrement et types d'appareils d'éclairage utilisés, entraînent différents profils de consommation d'électricité de l'éclairage. Les figures 5.5 et 5.6 permettent d'observer ces derniers, sur une base mensuelle, selon le matériau de recouvrement et le type d'éclairage, respectivement pour la serre chaude et la serre froide.

Il est possible d'y observer que le type d'appareils d'éclairage exerce un plus grand impact sur la consommation énergétique associée à l'éclairage que le matériau de recouvrement. En effet, dans le cas de la tomate, la consommation énergétique annuelle d'éclairage est de 1 300 MJ/m² pour la serre en polycarbonate avec un éclairage HPS et, en comparaison, de 1 175 MJ/m² (-10 %) pour la serre en verre avec un éclairage HPS, de 655 MJ/m² (-50 %) pour la serre en polycarbonate utilisant un éclairage LED et de 592 MJ/m² (-55 %) pour la serre en verre avec un éclairage LED. Dans le cas de la laitue, la consommation énergétique annuelle d'éclairage est de 335 MJ/m² pour la serre en polycarbonate utilisant un éclairage HPS et, en comparaison, de 289 MJ/m² (-14 %) pour la serre en verre utilisant un éclairage HPS, de 168 MJ/m² (-50 %) pour la serre en polycarbonate avec un éclairage LED et de 145 MJ/m² (-57 %) pour la serre en verre avec un éclairage LED.

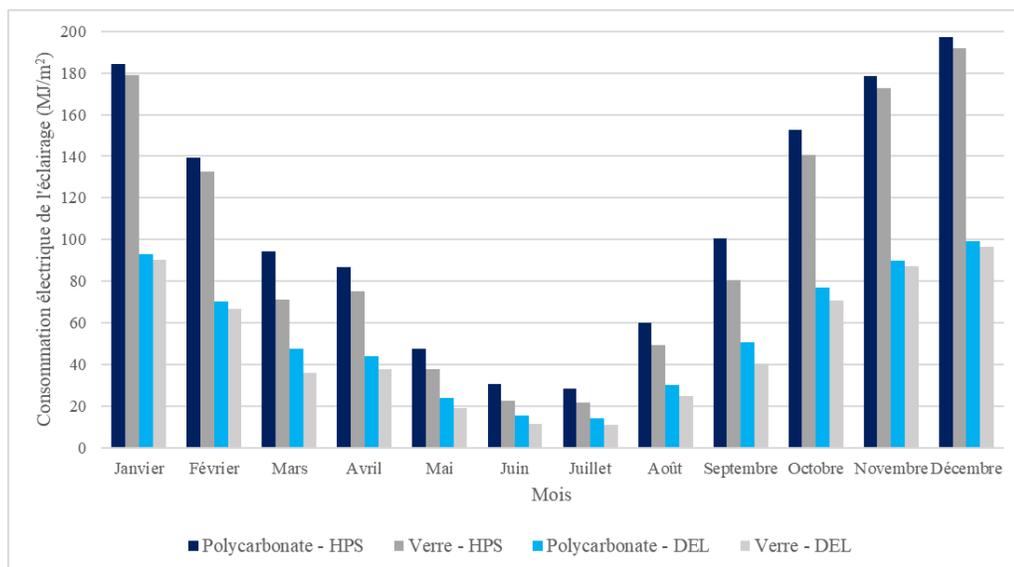


Figure 5.5 – Consommation électrique mensuelle de l'éclairage de la serre chaude selon le matériau de recouvrement et le type d'éclairage

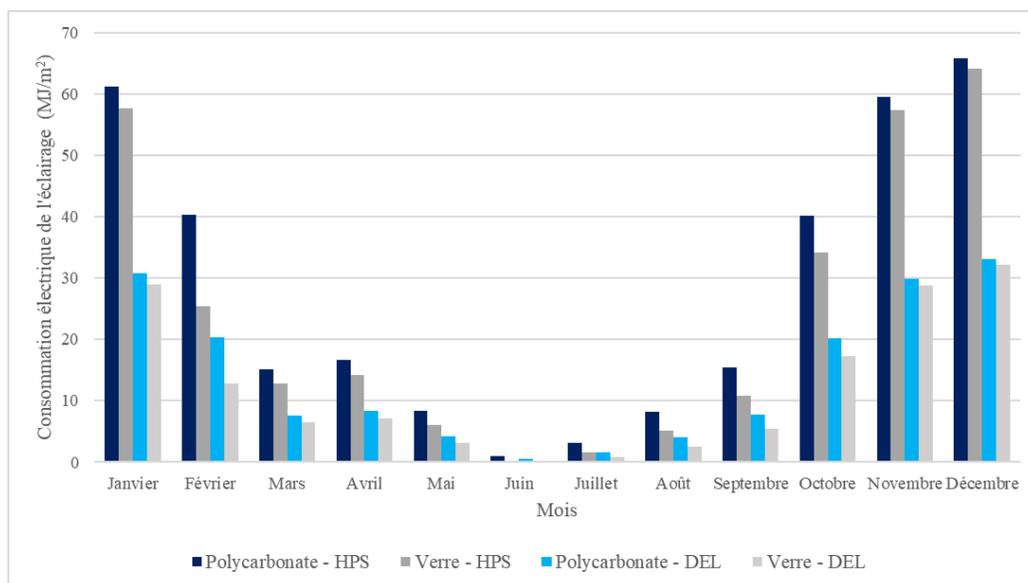


Figure 5.6 – Consommation électrique mensuelle de l'éclairage de la serre froide selon le matériau de recouvrement et le type d'éclairage

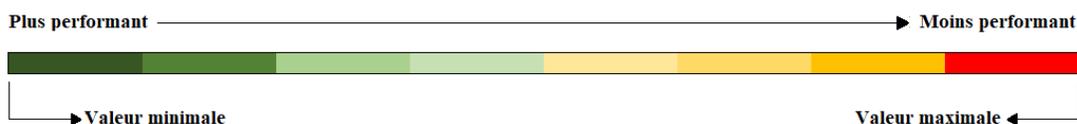
5.2 Impacts énergétiques sur la serre

La consommation énergétique, les émissions de GES et les coûts énergétiques annuels des scénarios de la serre chaude et de la serre froide sont présentés respectivement aux tableaux 5.1 et 5.2. On y indique également, pour chacune des trois variables à l'étude, la différence avec les scénarios de référence respectifs (C-SS-PHG et F-SS-PHG), ainsi qu'un indice de performance (IP) relatif à l'ensemble des scénarios (voir la légende sous les tableaux). L'IP permet d'identifier les scénarios les plus performants pour chacune des variables, ces derniers étant répartis également en huit gammes de valeurs entre le minimum et le maximum observés. Pour chaque scénario, des graphiques présentent respectivement pour la serre chaude et la serre froide les profils annuels de consommation énergétique aux figures 5.7 et 5.8, d'émissions de GES aux figures 5.9 et 5.10 et des coûts énergétiques aux figures 5.11 et 5.12. Il est à noter que les résultats des simulations sont aussi illustrés en graphiques de coordonnées parallèles à l'Annexe E, ainsi que de manière détaillée à l'Annexe F, sous forme de tableaux. L'Annexe G présente, quant à elle, les scénarios classés selon les différents critères de performance.

Tableau 5.2 – Performances annuelles de la serre froide

Scénario	Consommation énergétique			Émissions de gaz à effet de serre			Coûts énergétiques		
	MJ/m ²	Différence scénario référence	IP	kgCO ₂ eq/m ²	Différence scénario référence	IP	\$/m ²	Différence scénario référence	IP
F-SS-PHG (référence)	2645	0 %		114,1	0 %		30 \$	0 %	
F-STIF-PHG	2355	-11 %		99,8	-13 %		27 \$	-10 %	
F-STIM-PHG	2349	-11 %		99,5	-13 %		27 \$	-11 %	
F-STIE-PHG	2349	-11 %		99,5	-13 %		27 \$	-11 %	
F-SS-VHG	3175	20 %		142,8	25 %		35 \$	18 %	
F-STIF-VHG	2949	11 %		131,7	15 %		33 \$	10 %	
F-STIM-VHG	2950	12 %		131,7	15 %		33 \$	10 %	
F-STIE-VHG	2952	12 %		131,8	16 %		33 \$	10 %	
F-SS-PLG	2570	-3 %		118,5	4 %		28 \$	-5 %	
F-STIF-PLG	2295	-13 %		104,9	-8 %		25 \$	-15 %	
F-STIM-PLG	2297	-13 %		105,0	-8 %		25 \$	-15 %	
F-STIE-PLG	2297	-13 %		105,0	-8 %		25 \$	-15 %	
F-SS-VLG	3099	17 %		146,1	28 %		34 \$	13 %	
F-STIF-VLG	2885	9 %		135,5	19 %		31 \$	5 %	
F-STIM-VLG	2892	9 %		135,8	19 %		31 \$	6 %	
F-STIE-VLG	2894	9 %		135,9	19 %		31 \$	6 %	
F-SS-PHE	2189	-17 %		1,2	-99 %		34 \$	14 %	
F-STIF-PHE	1955	-26 %		1,1	-99 %		30 \$	2 %	
F-STIM-PHE	1951	-26 %		1,1	-99 %		30 \$	2 %	
F-STIE-PHE	1951	-26 %		1,1	-99 %		30 \$	2 %	
F-SS-VHE	2603	-2 %		1,5	-99 %		40 \$	36 %	
F-STIF-VHE	2421	-8 %		1,4	-99 %		38 \$	27 %	
F-STIM-VHE	2423	-8 %		1,4	-99 %		38 \$	27 %	
F-STIE-VHE	2424	-8 %		1,4	-99 %		38 \$	27 %	
F-SS-PLE	2095	-21 %		1,2	-99 %		33 \$	9 %	
F-STIF-PLE	1875	-29 %		1,1	-99 %		29 \$	-2 %	
F-STIM-PLE	1876	-29 %		1,1	-99 %		29 \$	-2 %	
F-STIE-PLE	1876	-29 %		1,1	-99 %		29 \$	-2 %	
F-SS-VLE	2513	-5 %		1,4	-99 %		39 \$	31 %	
F-STIF-VLE	2342	-11 %		1,3	-99 %		36 \$	22 %	
F-STIM-VLE	2347	-11 %		1,3	-99 %		36 \$	23 %	
F-STIE-VLE	2349	-11 %		1,3	-99 %		36 \$	23 %	

Légende de l'indice de performance des scénarios:



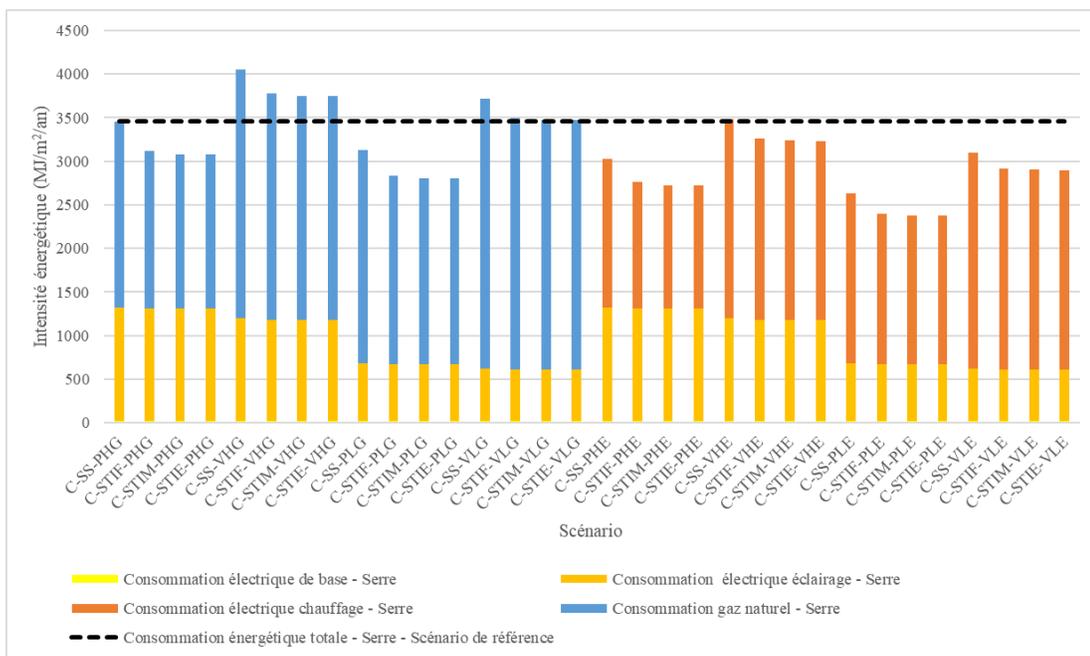


Figure 5.7 – Consommation énergétique annuelle par scénario de la serre chaude

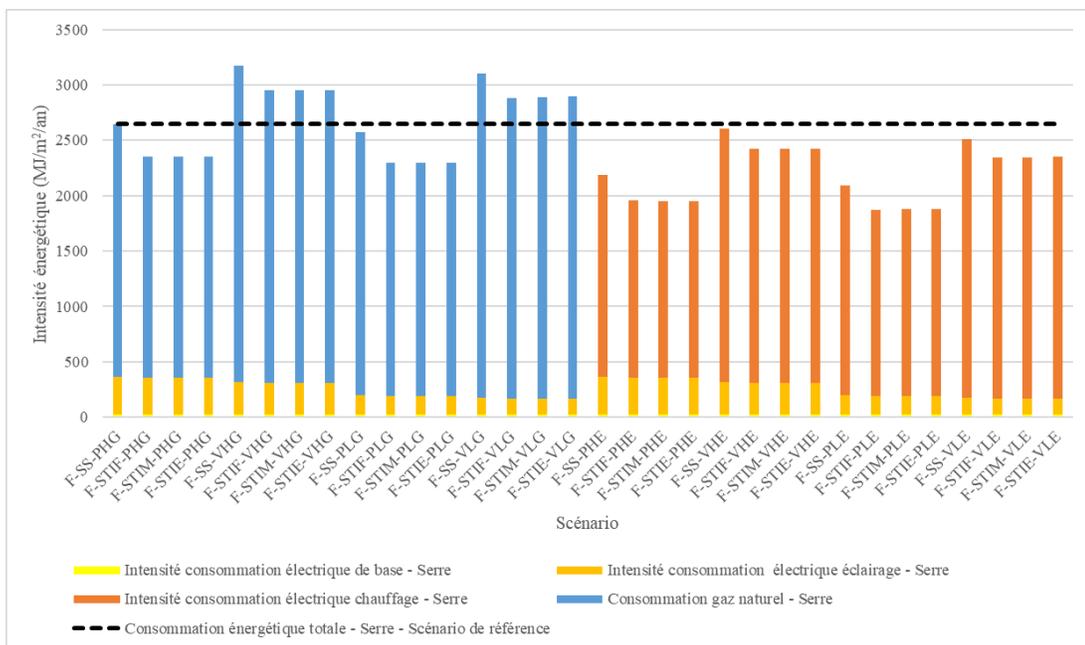


Figure 5.8 – Consommation énergétique annuelle par scénario de la serre froide

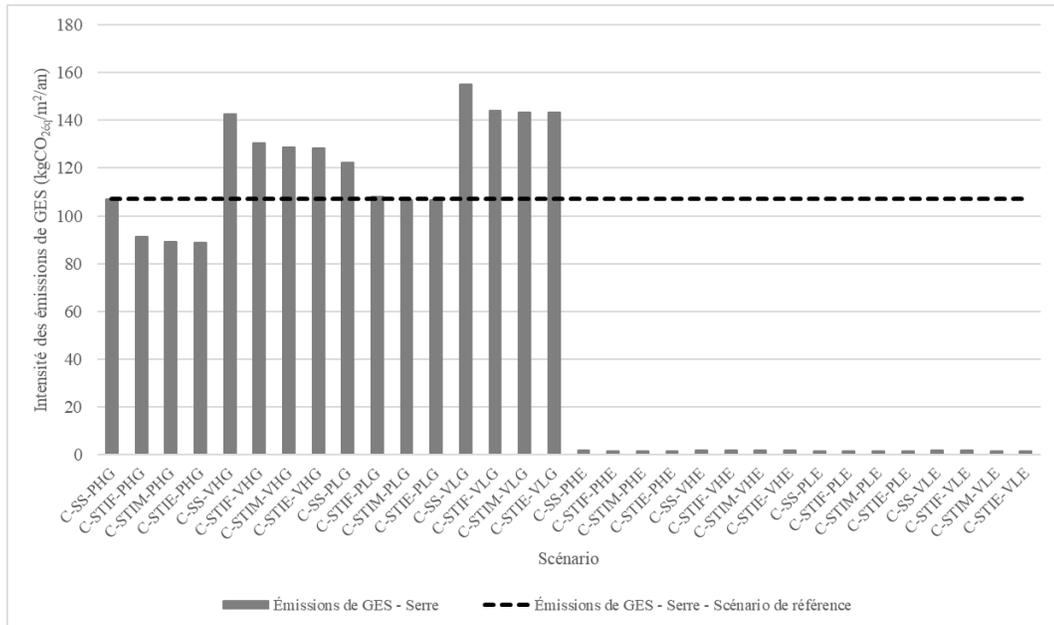


Figure 5.9 – Émissions de GES annuelles par scénario de la serre chaude

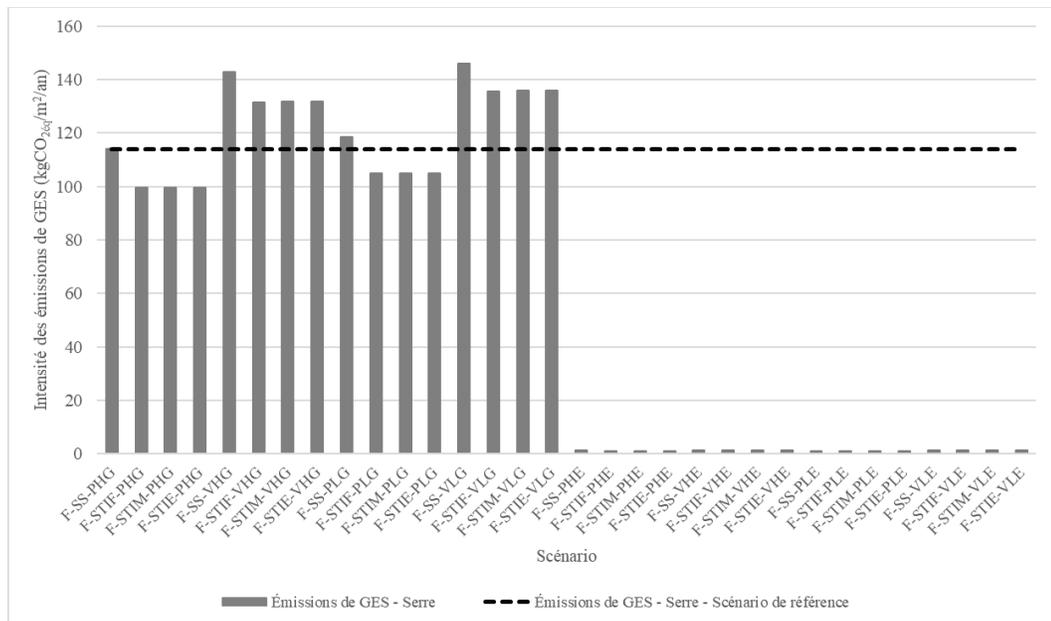


Figure 5.10 – Émissions de GES annuelles par scénario de la serre froide

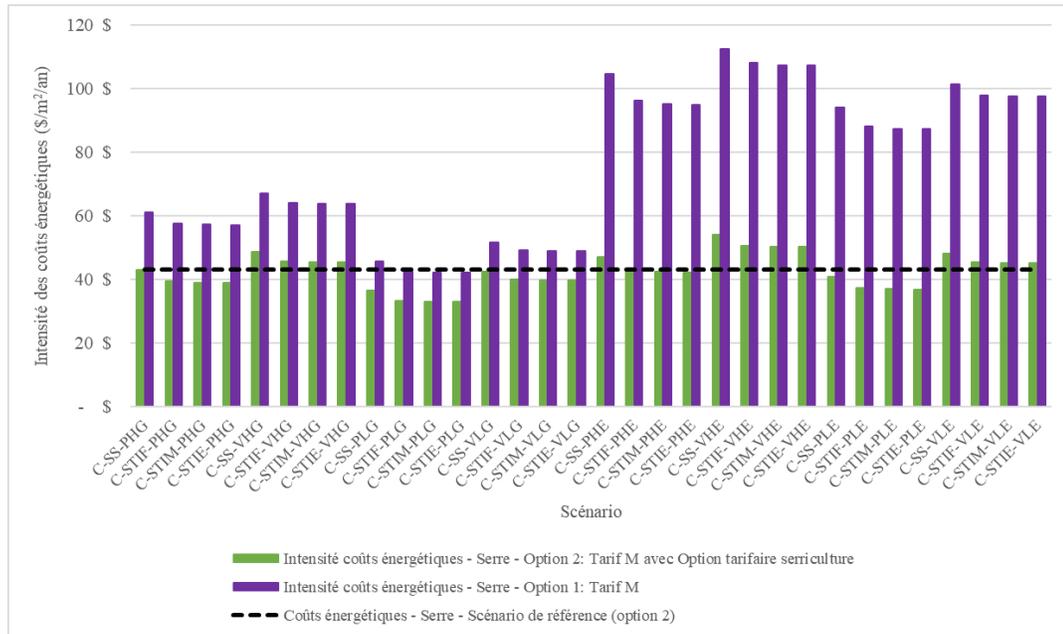


Figure 5.11 – Coûts énergétiques annuels par scénario de la serre chaude

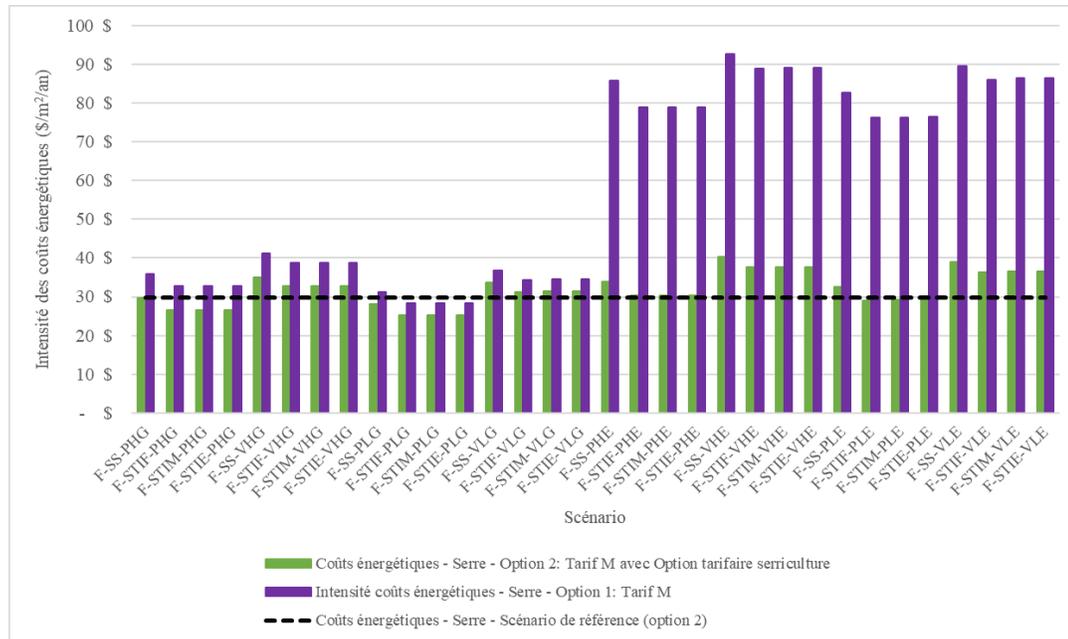


Figure 5.12 – Coûts énergétiques annuels par scénario de la serre froide

5.2.1 Consommation énergétique de la serre

Les valeurs de consommation énergétique pour la serre chaude varient entre 2 374 MJ/m² et 4 050 MJ/m², soit une différence de -31 % à 17 % par rapport à leur scénario de référence (3 456 MJ/m²). Les valeurs de consommation énergétique pour la serre froide varient entre 1 875 MJ/m² et 3 175 MJ/m², soit une différence de -29 % à 20 % par rapport à leur scénario de référence (2 645 MJ/m²). Les scénarios avec une serre chaude ont une consommation énergétique totale entre 17 % et 29 % supérieure par rapport aux scénarios avec une serre froide de caractéristiques équivalentes, outre le type de culture (p. ex. C-STIF-PHG et F-STIF-PHG), ce qui est notamment dû à des températures de consigne et des besoins en éclairage plus élevés. Dans tous les cas, la majorité de la consommation énergétique de la serre est associée à ses besoins en chauffage, bien que les profils de consommation soient légèrement différents pour la serre chaude et la serre froide. La consommation énergétique associée aux appareils de chauffage de la serre chaude représente entre 52 % à 83 % de sa consommation d'énergie totale, alors que celle de la serre froide représente entre 82 % à 94 % de sa consommation d'énergie totale. Les proportions supérieures observées pour la serre froide s'expliquent, entre autres, par des besoins en éclairage supérieurs pour la culture de la tomate, que celle de la laitue. En effet, les pertes thermiques associées aux appareils d'éclairage participent au chauffage de l'espace de culture, réduisant ainsi la consommation énergétique des appareils de chauffage. La consommation énergétique associée aux appareils d'éclairage représente entre 17 % et 47 % de la consommation totale de la serre chaude et entre 6 % à 17 % de la consommation totale de la serre froide.

De manière générale, l'utilisation de polycarbonate à double paroi plutôt que d'un vitrage à simple paroi, l'utilisation d'appareils d'éclairage de type LED plutôt que HPS, l'utilisation de chauffage de source électrique plutôt qu'au gaz naturel et l'intégration de la serre au toit du bâtiment, sont des facteurs permettant des économies d'énergie

significatives pour la serre. Un niveau d'isolation supérieur du toit du bâtiment a, quant à lui, des bénéfices plus marginaux d'un point de vue énergétique.

5.2.2 Émissions de GES de la serre

Les valeurs d'émissions de GES pour la serre chaude varient entre 1 kg CO₂éq/m² et 155 kg CO₂éq/m², soit une différence de -99 % à 45 % par rapport à leur scénario de référence (107 kg CO₂éq/m²). Les valeurs d'émissions de GES pour la serre froide varient entre 1 kg CO₂éq/m² et 146 kg CO₂éq/m², soit une différence de -99 % à 28 % par rapport à leur scénario de référence (114 kg CO₂éq/m²).

Les émissions de GES des scénarios avec une serre chaude sont entre 12 % inférieures et 29 % supérieures à celles des scénarios avec une serre froide de caractéristiques équivalentes, outre le type de culture (p. ex. C-SS-PHG et F-SS-PHG). Plus précisément, les émissions de GES de la serre chaude sont entre 12 % inférieures et 6 % supérieures en comparaison avec les émissions de GES de la serre froide pour les scénarios équivalents utilisant le gaz naturel comme source d'énergie de chauffage (p. ex. C-STIF-PHG et F-STIF-PHG), alors qu'elles sont de 19 % à 29 % supérieures pour les scénarios équivalents utilisant l'électricité (p. ex. C-STIF-PHE et F-STIF-PHE). Il est ainsi possible d'observer que, dans certains cas, les émissions de GES de la serre chaude utilisant du gaz naturel comme énergie de chauffage sont inférieures à celles de la serre froide de caractéristiques équivalentes, et ce, malgré des besoins en chauffage supérieurs. Ceci s'explique du fait que les besoins en éclairage sont inférieurs pour la serre froide. Ainsi, une plus grande portion des besoins en chauffage doit être assurée par les appareils de chauffage plutôt que par les appareils d'éclairage.

De manière générale, le principal paramètre affectant les émissions de GES est la source d'énergie de chauffage. En effet, dans le contexte à l'étude, l'utilisation d'électricité plutôt que de gaz naturel est largement moins émettrice de GES, étant donné l'accès au réseau électrique particulièrement propre. À titre indicatif, lorsque

seuls les scénarios utilisant le gaz naturel comme énergie de chauffage sont considérés, les émissions de GES de la serre chaude varient entre 89 kg CO₂éq/m² et 155 kg CO₂éq/m², soit une différence de -17 % à 45 % par rapport à leur scénario de référence (107 kg CO₂éq/m²), alors que celles de la serre froide varient entre 99 kg CO₂éq/m² et 146 kg CO₂éq/m², soit une différence de -13 % à 28 % par rapport à leur scénario de référence (114 kg CO₂éq/m²). Les scénarios utilisant l'électricité comme énergie de chauffage, tant pour la serre chaude que la serre froide, ont tous des émissions de GES de l'ordre de 1 à 2 kg CO₂éq/m². Lorsque ces derniers sont comparés à leur scénario de référence, les réductions observées sont toutes supérieures à 98 %.

Comme pour la consommation énergétique, l'utilisation de polycarbonate à double paroi plutôt que d'un vitrage à simple paroi, l'intégration de la serre au toit du bâtiment et dans une moindre mesure, un niveau d'isolation supérieur du toit du bâtiment, permettent de réduire les besoins en chauffage et, par le fait même, les émissions de GES. Ces bénéfices sont largement supérieurs pour les scénarios utilisant le gaz naturel comme énergie de chauffage. L'utilisation d'appareils d'éclairage de type LED s'avère, quant à elle, désavantageuse en comparaison à l'utilisation d'appareils de type HPS pour les scénarios utilisant le gaz naturel comme source d'énergie de chauffage. En effet, l'efficacité énergétique accrue des appareils LED résulte en moins de pertes de chaleur et, ainsi, une plus grande consommation des appareils de chauffage.

5.2.3 Coûts énergétiques de la serre

Deux options de tarification électrique ont été évaluées et incluses aux précédents graphiques (voir figures 5.11 et 5.12) afin de déterminer l'option la plus avantageuse (option 1 : Tarif M et option 2 : Tarif M avec l'Option tarifaire serriculture). La première option propose une tarification inférieure de l'énergie électrique consommée mensuellement (\$/kWh), mais des frais associés à la puissance appelée maximale à chaque mois (\$/kW_{max}). L'évaluation des coûts pour les deux options, basée sur les profils mensuels de consommation énergétique, a permis d'établir que l'option 2 était

la plus avantageuse pour l'ensemble des scénarios, et ce, particulièrement lorsque l'électricité est utilisée comme source de chauffage. Ainsi, le scénario de référence et l'analyse des résultats se basent sur l'option tarifaire 2 (colonnes en vert), plutôt que sur l'option tarifaire 1 (colonnes en mauve). Les valeurs pour la serre chaude varient entre 33 \$/m² et 54 \$/m², soit une différence de respectivement -24 % à 25 % par rapport au scénario de référence (43 \$/m²). Les valeurs pour la serre froide varient entre 25 \$/m² et 40 \$/m², une différence de respectivement -15 % à 36 % par rapport au scénario de référence (30 \$/m²).

Les scénarios avec une serre chaude ont des coûts énergétiques entre 19 % et 33 % supérieurs par rapport aux scénarios avec une serre froide de caractéristiques équivalentes, outre le type de culture (p. ex. C-STIF-PHG et F-STIF-PHG). Ceci s'explique, notamment, par des besoins énergétiques typiquement plus élevés tant en chauffage qu'en éclairage. Il est aussi intéressant de noter que les coûts sont largement influencés par le mix énergétique de chacun des scénarios, les coûts de l'électricité étant supérieurs à ceux du gaz naturel. Ainsi, bien que les appareils de chauffage électriques profitent d'une efficacité énergétique accrue par rapport à ceux au gaz naturel, les scénarios utilisant le gaz naturel comme source d'énergie de chauffage ont des coûts significativement inférieurs, et ce, malgré une tarification électrique particulièrement avantageuse.

De plus, de manière générale, l'utilisation de polycarbonate à double paroi plutôt que d'un vitrage à simple paroi, l'utilisation d'appareils d'éclairage de type LED plutôt que HPS et l'intégration de la serre au toit du bâtiment permettant des économies monétaires non négligeables pour la serre. Un niveau d'isolation supérieur du toit du bâtiment apporte également certains bénéfices financiers, mais de moindre envergure.

5.2.4 Impacts individuels des paramètres à l'étude sur la serre

Afin de mieux évaluer l'influence de chacun des paramètres sur la serre, une analyse de leurs impacts individuels a été effectuée. Les performances de chacun des scénarios ont été comparées à celles d'un scénario de caractéristiques identiques, à l'exception du paramètre analysé. Les figures 5.13 et 5.14 illustrent les gammes de variations (%) observées pour chaque variable en fonction de la mesure d'efficacité énergétique considérée, respectivement pour la serre chaude et la serre froide. Ils classent les différentes mesures évaluées en ordre, selon leur impact sur la réduction de la consommation d'énergie. Il est à noter qu'une valeur négative signifie une augmentation de l'indicateur concerné. Les résultats de cette analyse sont, quant à eux, présentés de manière détaillée à l'Annexe I.

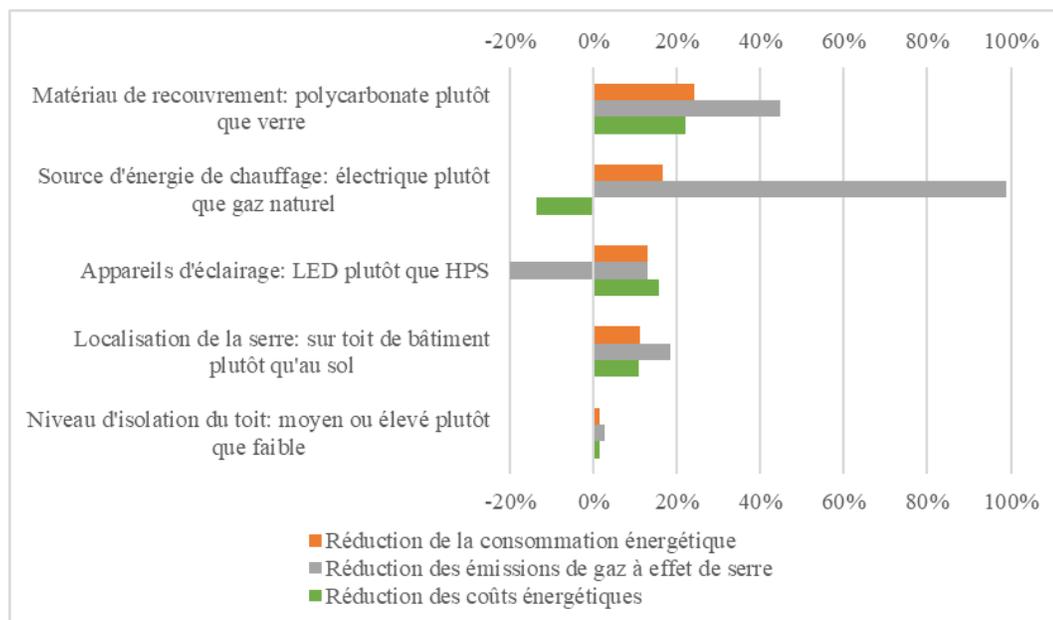


Figure 5.13 – Gammes de réductions observées de la consommation énergétique, des émissions de GES et des coûts énergétiques de la serre chaude par paramètres

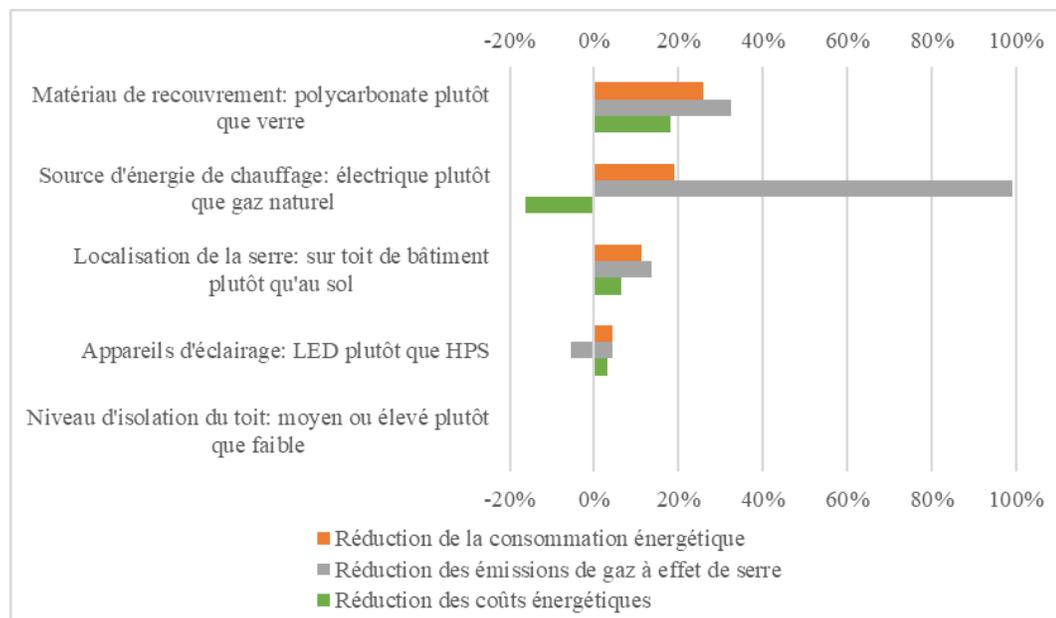


Figure 5.14 – Gammes de réductions observées de la consommation énergétique, des émissions de GES et des coûts énergétiques de la serre froide par paramètres

5.2.4.1 Intégration de la serre au bâtiment et niveau d'isolation du toit

Pour l'ensemble des scénarios, l'intégration de la serre au toit du bâtiment entraîne une réduction non négligeable de tous les indicateurs. Lorsque les scénarios de serre chaude sur toit sont comparés à leur scénario équivalent au sol (p. ex. C-STIF-PHG et C-SS-PHG), des réductions de 6 % à 11 % de la consommation énergétique, de 6 % à 19 % des émissions de GES et de 6 % à 11 % des coûts énergétiques sont observées. Lorsque les scénarios de serre froide sur toit sont comparés à leur équivalent au sol (p. ex. F-STIF-PHG et F-SS-PHG), des réductions de 7 % à 11 % de la consommation énergétique, de 7 % à 14 % des émissions de GES et de 7 % à 11 % des coûts énergétiques sont observées. Dans tous les cas, le niveau d'isolation du toit du bâtiment n'a qu'un faible impact sur l'ensemble des variables. Ces gains de performances s'expliquent principalement par les échanges thermiques entre le plancher de la serre et le toit du bâtiment en saison de chauffage, la serre sur sol étant plus affectée par les conditions météorologiques extérieures.

Il est cependant à noter que les réductions de la consommation énergétique calculées pour les scénarios de serre intégrée au toit, par rapport à ceux de serre au sol, sont sujettes aux hypothèses de modélisation initiales liées à la température moyenne sous le plancher de la serre sur sol. En effet, pour la serre sur sol, plus la température moyenne sous la dalle est basse, plus les pertes thermiques par le plancher sont élevées, augmentant par le fait même les besoins en chauffage. Afin de mieux évaluer l'influence de ce paramètre, une analyse de sensibilité a été faite pour les scénarios de référence (C-SS-PHG et F-SS-PHG). Comme expliqué dans la section 4.3.2, la température moyenne mensuelle sous la dalle est estimée en fonction de la température de consigne moyenne de la serre et de la température moyenne mensuelle du sol à une profondeur de 0,5 m. Ainsi, un impact de 0 % signifie que la température sous la dalle est considérée égale à celle du sol à une profondeur de 0,5 mètre, alors qu'un impact de 100 % signifie que la température sous la dalle est considérée égale à la température

de consigne moyenne de la serre. L'analyse a été faite pour 0 %, 25 %, 50 %, 75 % (référence) et 100 % et les résultats sont résumés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 – Consommation énergétique des scénarios de référence de la serre pour différentes températures moyennes mensuelles sous la dalle

% entre la température du sol à 0,5 m et la température de consigne moyenne à l'intérieur de la serre	Scénario de référence serre chaude (C-SS-PHG)		Scénario de référence serre froide (F-SS-PHG)	
	Consommation énergétique de la serre (MJ/m ²)	Différence avec scénario de référence (%)	Consommation énergétique de la serre (MJ/m ²)	Différence avec scénario de référence (%)
0 %	4 071	18 %	3 174	20 %
25 %	3 856	12 %	2 989	13 %
50 %	3 651	6 %	2 811	6 %
75 % (référence)	3 456	0 %	2 645	0 %
100 %	3 263	-6 %	2 483	-6 %

Ces résultats montrent que les températures moyennes sous le plancher de la serre peuvent avoir un impact non négligeable sur la consommation d'énergie calculée. Dans l'éventualité où les températures moyennes sous le plancher ne seraient aucunement affectées par les conditions extérieures (100 %), une réduction de la consommation d'énergie d'au plus 6 % par rapport aux scénarios de référence est observée, signifiant notamment une réduction des bénéfices associés à l'intégration de la serre au toit du bâtiment. À l'inverse, lorsque l'influence des conditions extérieures est supérieure, soit de 75 % à 0 %, une augmentation de la consommation énergétique allant jusqu'à 18 % et 20 % est observée, respectivement pour la serre chaude et la serre froide, signifiant que l'intégration de la serre au toit du bâtiment est d'autant plus bénéfique. L'hypothèse utilisée pour la modélisation dans cette étude s'avère ainsi conservatrice, la température du sol étant considérée n'avoir qu'un impact limité.

5.2.4.2 Matériau de recouvrement

Pour l'ensemble des scénarios, l'utilisation de polycarbonate à double paroi plutôt que de verre à simple paroi entraîne une réduction significative de tous les indicateurs. Lorsque les scénarios de serre chaude en polycarbonate sont comparés avec leur scénario équivalent en verre (p. ex. C-STIF-PHG et C-STIF-VHG), des réductions de 15 % à 24 % de la consommation énergétique, de 15 % à 45 % des émissions de GES et de 13 % à 22 % des coûts énergétiques sont observées. Lorsque les scénarios de serre froide en polycarbonate sont comparés avec leur scénario équivalent en verre (p. ex. F-STIF-PHG et F-STIF-VHG), des réductions de 19 % à 26 % de la consommation énergétique, de 19 % à 33 % des émissions de GES et de 18 % à 25 % des coûts énergétiques sont observées. Ces différences s'expliquent principalement par les propriétés thermiques inférieures du verre (plus grande valeur U), menant à de plus grandes pertes thermiques en saison de chauffage. Il est toutefois à rappeler que l'utilisation du verre plutôt que du polycarbonate entraînent certains bénéfices associés à la quantité de lumière naturelle reçue dans la serre, comme discuté précédemment.

5.2.4.3 Type d'appareils d'éclairage artificiel

Pour l'ensemble des scénarios, l'utilisation d'appareils d'éclairage de type LED plutôt que de type HPS entraîne une variation significative de tous les indicateurs. Lorsque les scénarios de serre chaude avec des appareils LED sont comparés à leur scénario équivalent avec des appareils HPS (p. ex. C-STIF-PHG et C-STIF-PLG), des variations de -13 % à -7 % de la consommation énergétique, de -13 % à 20 % des émissions de GES et de -16 % à -10 % des coûts énergétiques sont observées. Lorsque les scénarios de serre froide avec des appareils LED sont comparés à leur scénario équivalent (p. ex. F-STIF-PHG et F-STIF-PLG), des variations de -4 % à -2 % de la consommation énergétique, de -4 % à 6 % des émissions de GES et de -6 % à -3 % des coûts énergétiques sont observées. Ainsi, bien que les appareils d'éclairage LED sont plus performants énergétiquement, menant ainsi à une réduction de la consommation

d'électricité et des coûts associés, les pertes thermiques des appareils d'éclairage sont en grande partie valorisées pour le chauffage de l'espace, la majorité des besoins en éclairage artificiel étant en périodes nécessitant du chauffage. Ainsi, comme mentionné précédemment, pour certains scénarios, l'augmentation des émissions de GES lorsqu'il y a utilisation d'appareils de type LED plutôt que HPS s'explique par une plus grande consommation de gaz naturel plutôt que d'électricité, les pertes thermiques des appareils d'éclairage étant moins importantes.

5.2.4.4 Source d'énergie de chauffage

Pour l'ensemble des scénarios, l'utilisation d'électricité comme source d'énergie de chauffage plutôt que de gaz naturel entraîne une réduction non négligeable de la consommation énergétique, une importante réduction des émissions de GES et une augmentation des coûts énergétiques. Lorsque les scénarios de serre chaude avec chauffage électrique sont comparés avec leur scénario équivalent avec chauffage au gaz naturel (p. ex. C-STIF-PHG et C-STIF-PHE), des réductions de 12 % à 17 % de la consommation énergétique et d'au moins 98 % des émissions de GES, ainsi que des augmentations de 9 % à 14 % des coûts énergétiques sont observées. Lorsque les scénarios de serre froide avec chauffage électrique sont comparés avec leur scénario équivalent avec chauffage au gaz naturel (p. ex. F-STIF-PHG et F-STIF-PHE), des réductions de 17 % à 19 % de la consommation énergétique et d'au moins 98 % des émissions de GES, ainsi que des augmentations de 14 % à 16 % des coûts énergétiques sont observées. Ainsi, dans le contexte à l'étude, bien que le chauffage électrique occasionne d'importants bénéfices en matière de consommation énergétique et, surtout, d'émissions de GES, il induit une augmentation des coûts énergétiques, étant donné sa tarification moins avantageuse que celle du gaz naturel.

5.3 Impacts énergétiques sur le bâtiment

La consommation énergétique, les émissions de GES et les coûts énergétiques annuels du bâtiment pour chacun des scénarios avec une serre chaude et avec une serre froide intégrée au toit sont présentés respectivement aux tableaux 5.4 et 5.5. Les tableaux indiquent également, pour chacune des trois variables à l'étude, la différence avec le scénario de référence (BIF), ainsi qu'un indice de performance (IP) relatif à l'ensemble des scénarios (voir la légende sous les tableaux). L'IP permet d'identifier les scénarios les plus performants pour chacune des variables, ces derniers étant répartis également en huit gammes de valeurs entre le minimum et le maximum observés. Il est à noter que les scénarios BIM et BIE, soit le bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation respectivement moyen et élevé, y sont également présentés. Pour chaque scénario, des graphiques présentent respectivement pour le bâtiment avec une serre chaude et avec une serre froide les profils annuels de consommation énergétique aux figures 5.15 et 5.16, des émissions de GES aux figures 5.17 et 5.18 et des coûts énergétiques aux figures 5.19 et 5.20. Il est à noter que les résultats des simulations sont également illustrés en graphiques de coordonnées parallèles à l'Annexe E, ainsi que de manière détaillée, sous forme de tableaux, à l'Annexe F. L'Annexe G présente, quant à elle, les scénarios classés selon les différents critères de performance.

Tableau 5.4 – Résumé des performances annuelles du bâtiment avec une serre chaude intégrée au toit

Scénario	Consommation énergétique			Émissions de gaz à effet de serre			Coûts énergétiques		
	MJ/m ²	Différence scénario référence	IP	kgCO ₂ éq/m ²	Différence scénario référence	IP	\$/m ²	Différence scénario référence	IP
BIF (référence)	759	0 %		26,9	0 %		11,80 \$	0 %	
* BIM	671	-12 %		22,6	-16 %		10,87 \$	-8 %	
* BIE	655	-14 %		21,8	-19 %		10,70 \$	-9 %	
C-STIF-PHG	650	-14 %		21,5	-20 %		10,64 \$	-10 %	
C-STIM-PHG	647	-15 %		21,4	-21 %		10,61 \$	-10 %	
C-STIE-PHG	647	-15 %		21,4	-21 %		10,61 \$	-10 %	
C-STIF-VHG	658	-13 %		21,9	-19 %		10,72 \$	-9 %	
C-STIM-VHG	649	-15 %		21,5	-20 %		10,63 \$	-10 %	
C-STIE-VHG	648	-15 %		21,4	-21 %		10,62 \$	-10 %	
C-STIF-PLG	658	-13 %		21,9	-19 %		10,72 \$	-9 %	
C-STIM-PLG	649	-14 %		21,5	-20 %		10,63 \$	-10 %	
C-STIE-PLG	648	-15 %		21,4	-20 %		10,62 \$	-10 %	
C-STIF-VLG	665	-12 %		22,2	-17 %		10,80 \$	-8 %	
C-STIM-VLG	651	-14 %		21,6	-20 %		10,66 \$	-10 %	
C-STIE-VLG	649	-15 %		21,5	-20 %		10,63 \$	-10 %	
C-STIF-PHE	650	-14 %		21,5	-20 %		10,64 \$	-10 %	
C-STIM-PHE	647	-15 %		21,4	-21 %		10,61 \$	-10 %	
C-STIE-PHE	647	-15 %		21,4	-21 %		10,61 \$	-10 %	
C-STIF-VHE	658	-13 %		21,9	-19 %		10,72 \$	-9 %	
C-STIM-VHE	649	-15 %		21,5	-20 %		10,63 \$	-10 %	
C-STIE-VHE	648	-15 %		21,4	-21 %		10,62 \$	-10 %	
C-STIF-PLE	658	-13 %		21,9	-19 %		10,72 \$	-9 %	
C-STIM-PLE	649	-14 %		21,5	-20 %		10,63 \$	-10 %	
C-STIE-PLE	648	-15 %		21,4	-20 %		10,62 \$	-10 %	
C-STIF-VLE	665	-12 %		22,2	-17 %		10,80 \$	-8 %	
C-STIM-VLE	651	-14 %		21,6	-20 %		10,66 \$	-10 %	
C-STIE-VLE	649	-15 %		21,5	-20 %		10,63 \$	-10 %	

Légende de l'indice de performance des scénarios:

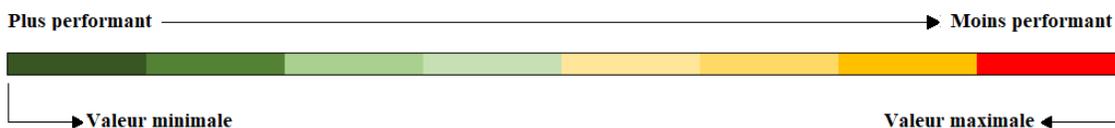


Tableau 5.5 – Résumé des performances annuelles du bâtiment avec une serre froide intégrée au toit

Scénario	Consommation énergétique			Émissions de gaz à effet de serre			Coûts énergétiques		
	MJ/m ²	Différence scénario référence	IP	kgCO ₂ eq/m ²	Différence scénario référence	IP	\$/m ²	Différence scénario référence	IP
BIF (référence)	759	0 %		26,9	0 %		11,80 \$	0 %	
* BIM	671	-12 %		22,6	-16 %		10,87 \$	-8 %	
* BIE	655	-14 %		21,8	-19 %		10,70 \$	-9 %	
F-STIF-PHG	665	-12 %		22,2	-17 %		10,80 \$	-8 %	
F-STIM-PHG	652	-14 %		21,6	-20 %		10,66 \$	-10 %	
F-STIE-PHG	650	-14 %		21,5	-20 %		10,64 \$	-10 %	
F-STIF-VHG	671	-12 %		22,6	-16 %		10,86 \$	-8 %	
F-STIM-VHG	654	-14 %		21,7	-20 %		10,68 \$	-9 %	
F-STIE-VHG	650	-14 %		21,5	-20 %		10,65 \$	-10 %	
F-STIF-PLG	667	-12 %		22,4	-17 %		10,82 \$	-8 %	
F-STIM-PLG	653	-14 %		21,6	-20 %		10,67 \$	-10 %	
F-STIE-PLG	650	-14 %		21,5	-20 %		10,64 \$	-10 %	
F-STIF-VLG	673	-11 %		22,7	-16 %		10,89 \$	-8 %	
F-STIM-VLG	654	-14 %		21,7	-19 %		10,69 \$	-9 %	
F-STIE-VLG	651	-14 %		21,5	-20 %		10,65 \$	-10 %	
F-STIF-PHE	665	-12 %		22,2	-17 %		10,80 \$	-8 %	
F-STIM-PHE	652	-14 %		21,6	-20 %		10,66 \$	-10 %	
F-STIE-PHE	650	-14 %		21,5	-20 %		10,64 \$	-10 %	
F-STIF-VHE	671	-12 %		22,6	-16 %		10,86 \$	-8 %	
F-STIM-VHE	654	-14 %		21,7	-20 %		10,68 \$	-9 %	
F-STIE-VHE	650	-14 %		21,5	-20 %		10,65 \$	-10 %	
F-STIF-PLE	667	-12 %		22,4	-17 %		10,82 \$	-8 %	
F-STIM-PLE	653	-14 %		21,6	-20 %		10,67 \$	-10 %	
F-STIE-PLE	650	-14 %		21,5	-20 %		10,64 \$	-10 %	
F-STIF-VLE	673	-11 %		22,7	-16 %		10,89 \$	-8 %	
F-STIM-VLE	654	-14 %		21,7	-19 %		10,69 \$	-9 %	
F-STIE-VLE	651	-14 %		21,5	-20 %		10,65 \$	-10 %	

Légende de l'indice de performance des scénarios:



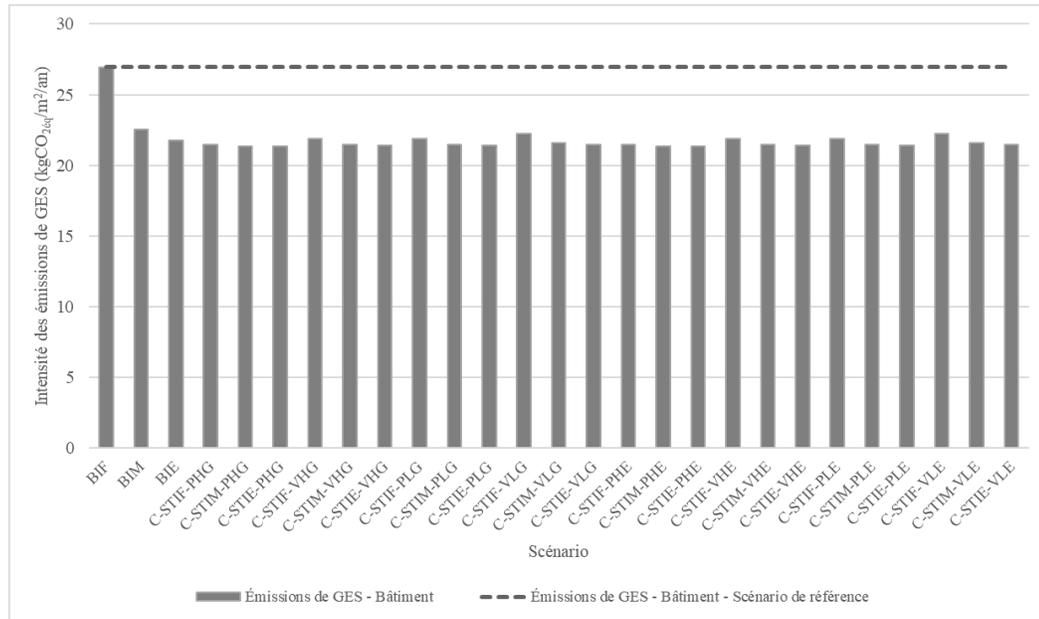


Figure 5.17 – Émissions de GES annuelles par scénario du bâtiment avec une serre chaude au toit

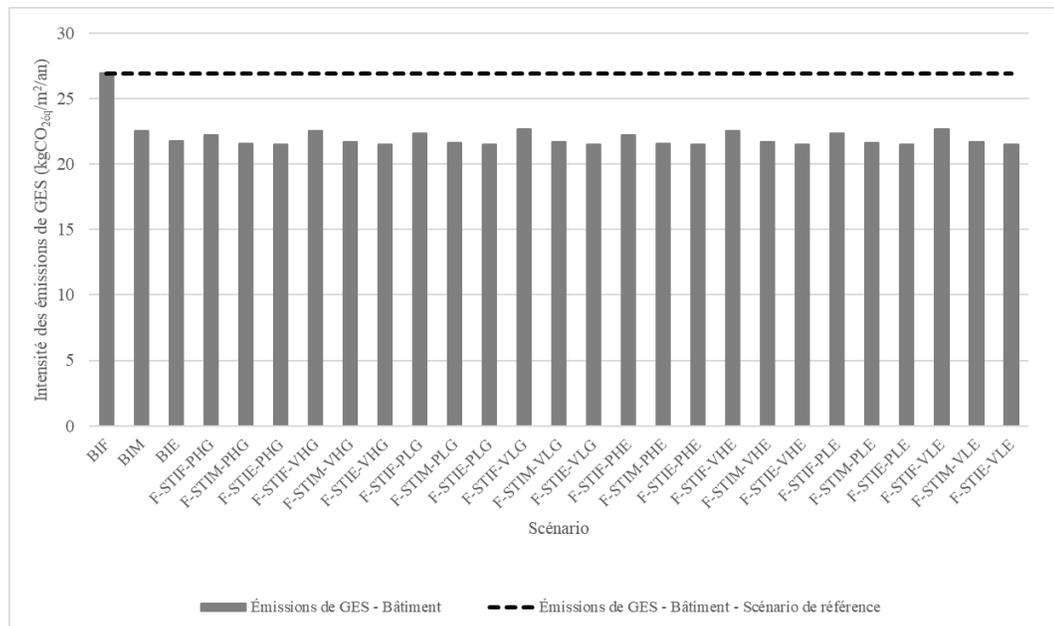


Figure 5.18 – Émissions de GES annuelles par scénario du bâtiment avec une serre froide au toit

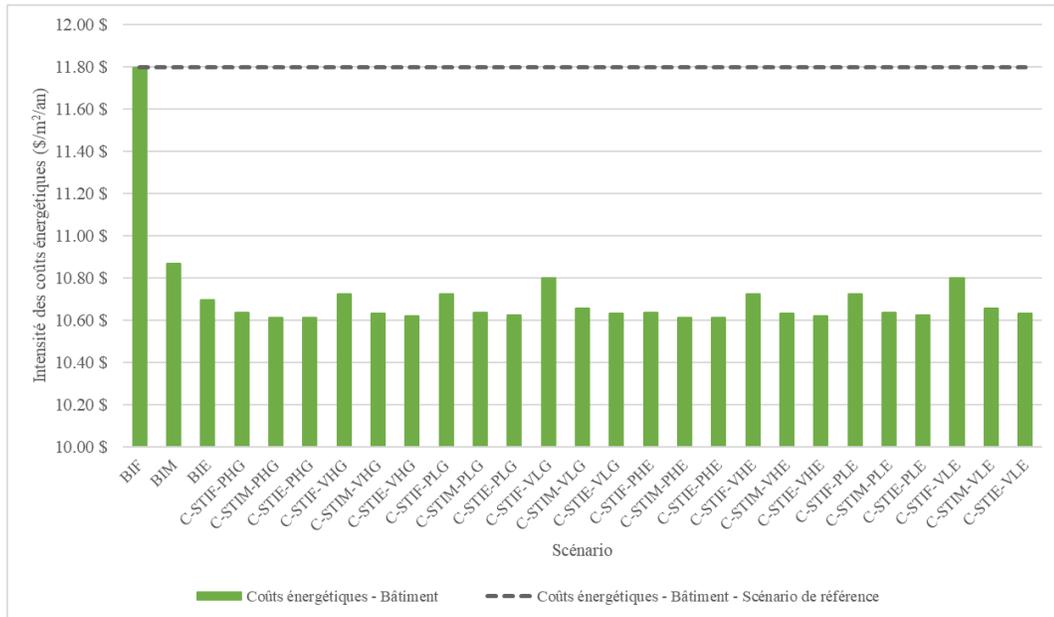


Figure 5.19 – Coûts énergétiques annuels par scénario du bâtiment avec une serre chaude au toit

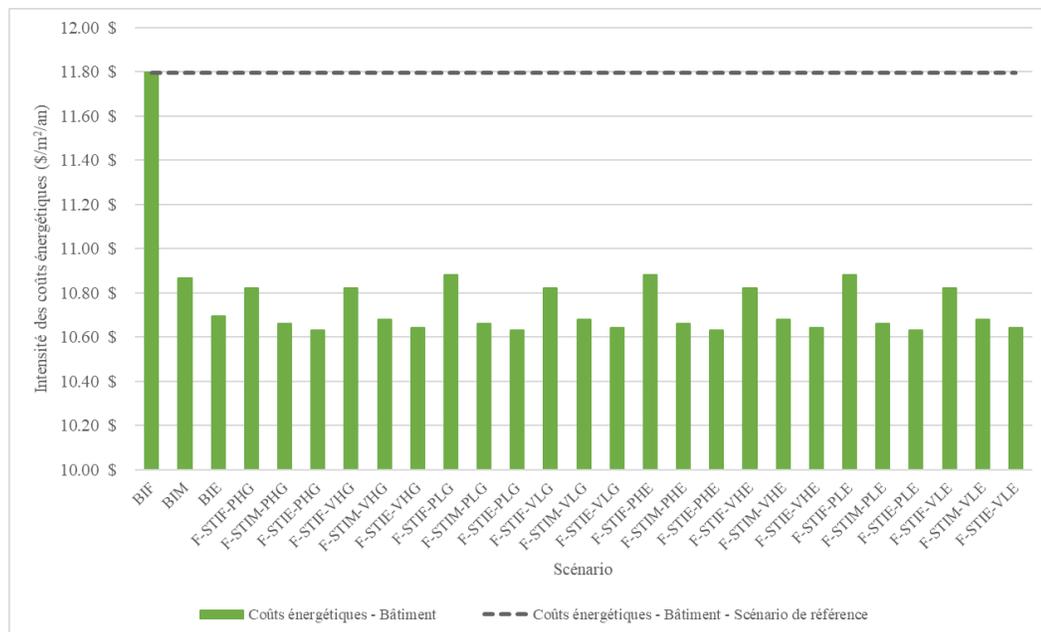


Figure 5.20 – Coûts énergétiques annuels par scénario du bâtiment avec une serre froide au toit

5.3.1 Consommation énergétique du bâtiment

Les valeurs de consommation énergétique pour le bâtiment avec une serre chaude intégrée au toit varient entre 647 MJ/m² et 673 MJ/m², soit des réductions de respectivement 15 % et 12 % par rapport au scénario de référence (759 MJ/m²). Les valeurs pour le bâtiment avec une serre froide intégrée au toit varient entre 648 MJ/m² et 673 MJ/m², soit une réduction de respectivement 15 % et 11 % par rapport au scénario de référence (759 MJ/m²). De plus, les valeurs pour le bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation moyen (BIM) et pour le bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation élevé (BIE) sont de respectivement 671 MJ/m² et 655 MJ/m², soit des réductions de 12 % et 14 % par rapport au scénario de référence.

L'intégration de la serre au toit du bâtiment permet ainsi une réduction non négligeable de la consommation énergétique par rapport au scénario de référence. Ces bénéfices sont similaires à l'amélioration du niveau d'isolation du toit (moyen ou élevé plutôt que faible) pour un bâtiment sans serre intégrée à son toit. Ceci s'explique par une réduction des pertes thermiques par le toit. En effet, la serre intégrée au toit, maintenue constamment à des températures plus élevées que les températures extérieures en saison de chauffage, réduit les écarts de températures entre l'intérieur du bâtiment et le toit, alors que l'augmentation du niveau d'isolation du toit réduit la transmission de chaleur vers l'extérieur. Il est à noter que les réductions de la consommation d'énergie associées à l'intégration de la serre au toit sont plus importantes pour les scénarios avec un niveau d'isolation de toit faible que les scénarios avec des niveaux d'isolation de toit moyen ou élevé, qui profitent déjà des bénéfices de propriétés thermiques supérieures. De manière générale, les caractéristiques de la serre n'ont, quant à elles, qu'un faible impact sur l'amplitude de réduction de la consommation énergétique du bâtiment.

5.3.2 Émissions de GES du bâtiment

Les valeurs d'émissions de GES pour le bâtiment avec une serre chaude intégrée au toit varient entre 21 kg CO₂éq/m² et 22 kg CO₂éq/m², soit des réductions de respectivement 21 % et 17 % par rapport au scénario de référence (27 kg CO₂éq/m²). Les valeurs d'émissions de GES pour le bâtiment avec une serre froide intégrée au toit varient entre 21 kg CO₂éq/m² et 23 kg CO₂éq/m², soit une réduction de respectivement 20 % et 16 % par rapport au scénario de référence (27 kg CO₂éq/m²). De plus, les valeurs pour le bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation moyen (BIM) et pour le bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation élevé (BIE) sont de respectivement de l'ordre de 23 kg CO₂éq/m² et 22 kg CO₂éq/m², soit des réductions de 16 % et 19 % par rapport au scénario de référence.

L'intégration de la serre au toit du bâtiment permet ainsi des réductions des émissions de GES, étant donné la réduction de ses besoins en chauffage. Il est également à noter que l'ordre de grandeur des impacts sur les émissions de GES est fortement dépendant de la source d'énergie de chauffage utilisée par le bâtiment. Ainsi, les bénéfices s'en trouveraient largement réduits dans le cas d'un système de chauffage fonctionnant à l'électricité de source renouvelable plutôt qu'au gaz naturel.

5.3.3 Coûts énergétiques du bâtiment

Les valeurs des coûts énergétiques pour le bâtiment avec une serre chaude intégrée au toit varient entre 10,61 \$/m² et 10,80 \$/m², soit des réductions de respectivement 10 % et 8 % par rapport au scénario de référence (11,80 \$/m²). Les valeurs des coûts énergétiques pour le bâtiment avec une serre froide intégrée au toit varient entre 10,64 \$/m² et 10,89 \$/m², soit une réduction de respectivement 10 % et 8 % par rapport au scénario de référence (11,80 \$/m²). De plus, les valeurs pour le bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation moyen (BIM) et pour le bâtiment sans serre

intégrée au toit de niveau d'isolation élevé (BIE) sont de respectivement 10,87 \$/m² et 10,70 \$/m², soit des réductions de 8 % et 9 % par rapport au scénario de référence.

L'intégration de la serre au toit du bâtiment permet ainsi des réductions des coûts énergétiques associées à une baisse de ses besoins en chauffage. Il est également à noter que les impacts sur les coûts pourraient varier avec l'utilisation d'une source d'énergie de chauffage alternative ayant un structure tarifaire différente.

5.3.4 Impacts de l'intégration de la serre au bâtiment et du niveau d'isolation du toit du bâtiment

5.3.4.1 Impacts énergétiques

Afin de mieux évaluer l'influence de certains paramètres sur le bâtiment, une analyse de leurs impacts énergétiques individuels a été effectuée. Les performances de chacun des scénarios ont été comparées à celles d'un scénario de caractéristiques identiques, à l'exception du paramètre analysé. La figure 5.21 présente, pour chaque variable, les gammes de variations (%) observées en fonction des différentes mesures évaluées et les classe en ordre, selon leur impact sur la réduction de la consommation d'énergie. Les résultats de cette analyse sont présentés de manière détaillée à l'Annexe I.

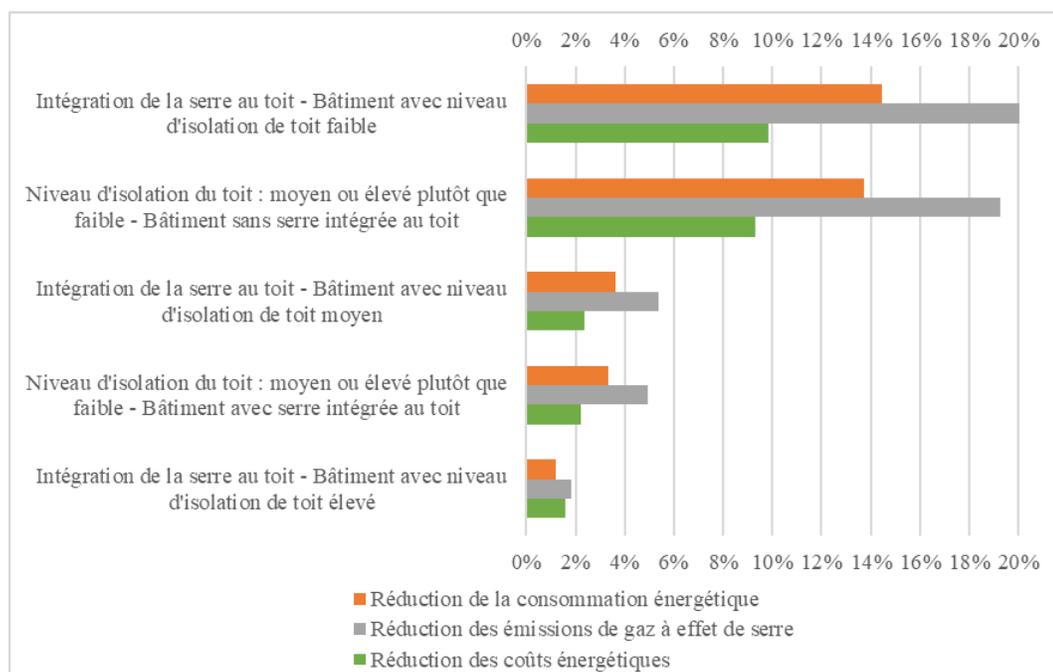


Figure 5.21 – Gammes des réductions observées pour différents paramètres sur la consommation énergétique, les émissions de GES et les coûts du bâtiment

En premier lieu, il est possible d'observer que l'intégration de la serre au toit du bâtiment entraîne des réductions pour l'ensemble des indicateurs. Ces dernières sont toutefois significativement plus élevées lorsqu'il s'agit d'un bâtiment avec un niveau d'isolation de toit faible. En effet, lorsque les scénarios de bâtiment avec une serre intégrée au toit de niveau d'isolation faible (STIF) sont comparés avec le scénario d'un bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation de toit faible (BIF), des réductions de 11 % à 14 % de la consommation énergétique, de 16 % à 20 % des émissions de GES et de 8 % à 10 % des coûts énergétiques sont observées. Lorsque les scénarios de bâtiment avec une serre intégrée au toit de niveau d'isolation moyen (STIM) sont comparés avec le scénario d'un bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation de toit moyen (BIM), des réductions de 3 % à 4 % de la consommation énergétique, de 4 % à 5 % des émissions de GES et de l'ordre de 2 % des coûts énergétiques sont observées. Finalement, lorsque les scénarios de bâtiment avec une serre intégrée au toit de niveau d'isolation élevé (STIE) sont comparés avec

le scénario d'un bâtiment sans serre intégrée au toit de niveau d'isolation de toit élevé (BIE), des réductions de l'ordre de 1 % de la consommation d'énergie, de 1 % à 2 % des émissions de GES et de moins de 2 % des coûts énergétiques sont observées.

De plus, il est également possible d'observer que, pour l'ensemble des scénarios, l'augmentation du niveau d'isolation du toit du bâtiment entraîne également des réductions de l'ensemble des indicateurs. En effet, lorsque les scénarios de bâtiment avec une serre intégrée au toit de niveaux d'isolation moyen et élevé sont comparés avec leur scénario équivalent de niveau d'isolation faible, des réductions de l'ordre de 1 % à 3 % de la consommation d'énergie, de 1 % à 5 % des émissions de GES et de 1 % à 2 % des coûts énergétiques sont observées. On dénote également que les impacts associés à l'augmentation du niveau d'isolation du toit du bâtiment, passant de faible à moyen ou élevé, sont d'un ordre de grandeur similaire à l'intégration de la serre au toit du bâtiment de faible niveau d'isolation. En effet, pour le bâtiment sans serre intégrée au toit, des niveaux d'isolation de toit moyen (BIM) et élevé (BIE) entraînent des réductions de 12 % et 14 % de la consommation énergétique, de 16 % et 19 % des émissions de GES et de 8 % et 9 % des coûts énergétiques par rapport au bâtiment avec un niveau d'isolation de toit faible (BIM).

Finalement, il est à noter que les gains énergétiques pour le bâtiment de l'intégration d'une serre à son toit sont principalement liés au dernier étage, sous-jacent à la serre. En effet, c'est celui qui profite principalement d'une réduction de ses pertes thermiques par l'enveloppe. Cela suggère que la géométrie d'un bâtiment affecte la pertinence, d'un point de vue énergétique, d'installer une serre à son toit. En effet, la réduction des besoins en chauffage globaux s'en trouvera augmentée pour un bâtiment ayant une superficie de toit supérieure et ayant nombre d'étages réduit, la surface du toit représentant une proportion plus élevée par rapport à la superficie totale de l'enveloppe.

5.3.4.2 Impacts sur les températures du dernier étage du bâtiment

Le bâtiment à l'étude ne comporte aucun système de climatisation, autre que la ventilation naturelle. Une analyse sommaire a toutefois été effectuée afin de vérifier les impacts du niveau d'isolation du toit et de l'intégration de la serre au toit sur les différentes zones thermiques du bâtiment, plus particulièrement la zone centrale et les quatre zones périmétriques du dernier étage, étant celles principalement affectées. Le tableau 5.6 présente les températures moyennes annuelles pour le bâtiment sans serre intégrée pour les différents niveaux d'isolation de toit considérés (BIF, BIM et BIE), ainsi que la moyenne des températures moyennes annuelles de l'ensemble des scénarios du bâtiment avec une serre, chaude ou froide, intégrée au toit pour ces mêmes niveaux d'isolation de toit (STIF, STIM et STIE). Le tableau 5.7 présente, quant à lui, les moyennes du nombre d'heures annuelles où la température des zones thermiques est égale ou supérieure à 26 °C, pour chacun des groupes de scénarios décrits précédemment.

Tableau 5.6 – Températures moyennes annuelles des zones thermiques du dernier étage du bâtiment

Zone thermique	Température moyenne annuelle (°C)					
	BIF	BIM	BIE	STIF	STIM	STIE
<i>Core - 3rd floor</i>	22,6	22,8	22,8	23,6	23,3	23,2
<i>East perimeter - 3rd floor</i>	22,6	22,7	22,7	23,1	23,0	23,0
<i>North perimeter - 3rd floor</i>	22,5	22,6	22,6	23,0	22,9	22,9
<i>South perimeter - 3rd floor</i>	22,6	22,7	22,7	23,1	23,0	23,0
<i>West perimeter - 3rd floor</i>	22,6	22,7	22,7	23,1	22,9	22,9

Tableau 5.7 – Moyennes d'heures annuelles où la température est égale ou supérieure à 26°C dans les zones thermiques du dernier étage du bâtiment

Zone thermique	Nombre d'heures annuelles égales ou supérieures à 26°C					
	BIF	BIM	BIE	STIF	STIM	STIE
<i>Core - 3rd floor</i>	476	597	647	1320	865	794
<i>East perimeter - 3rd floor</i>	494	564	579	860	687	651
<i>North perimeter - 3rd floor</i>	430	454	454	661	529	499
<i>South perimeter - 3rd floor</i>	495	548	579	779	684	656
<i>West perimeter - 3rd floor</i>	486	524	532	755	626	571

Il est possible d'observer que l'intégration de la serre au toit du bâtiment et, dans une moindre mesure, l'augmentation du niveau d'isolation du toit, induisent globalement une hausse des températures annuelles moyennes, mais surtout un nombre d'heures significativement plus élevé où les températures sont égales ou supérieures à 26 °C, soit le seuil de confort considéré à des fins d'analyse. De manière générale, la zone centrale est la plus affectée, la totalité de la superficie de son plafond étant en contact avec la serre sur toit. L'intégration de la serre au toit d'un bâtiment peut ainsi avoir des impacts non négligeables quant au niveau de confort des occupants du dernier étage. Les périodes de surchauffe de ces zones sont observables essentiellement de la fin du printemps au début de l'automne, lorsque les températures extérieures et niveaux d'ensoleillement sont plus élevés. Il est à noter que, dans le cas d'un bâtiment utilisant un système de climatisation mécanique, il pourrait en découler des besoins augmentés, affectant par le fait même la consommation énergétique et le dimensionnement des équipements associés.

CHAPITRE VI

DISCUSSION

6.1 Interprétation des résultats

La modélisation a permis d'estimer les impacts de divers paramètres sur la consommation énergétique, les émissions de GES et les coûts énergétiques d'une serre urbaine, de même que, pour certains scénarios, d'un bâtiment hôte. Quelques observations et remarques, tirées des résultats, sont discutées dans cette section.

6.1.1 Bénéfices et impacts de l'intégration de la serre au toit du bâtiment

Il a été montré que l'intégration d'une serre commerciale au toit d'un bâtiment permet une réduction non négligeable des besoins en chauffage et des coûts énergétiques de cette dernière. Des bénéfices sont également observés pour le bâtiment hôte. Ainsi, la serre réduit les pertes thermiques par le toit et permet une réduction de la consommation énergétique, de même que des émissions de GES et des coûts associés. Les bénéfices observés en matière de réduction des besoins en chauffage, tant pour la serre que le bâtiment hôte, abondent dans le même sens que ceux d'autres études effectuées en contextes de climats chauds (Montero *et al.*, 2017; Nadal *et al.*, 2017; Piezer *et al.*, 2019; Pons *et al.*, 2015; Sanjuan-Delmás *et al.*, 2018). Ces gains s'en trouvent potentiellement d'autant plus intéressants en climats froids, où les besoins en chauffage d'une serre sont largement augmentés en comparaison aux climats plus tempérés. Il est toutefois à rappeler que ces bénéfices sont grandement supérieurs pour un toit de faible

niveau d'isolation. Un bâtiment avec un toit de niveau d'isolation répondant aux normes de construction actuelles n'en bénéficiera donc que peu d'un point de vue énergétique. Un parallèle peut d'ailleurs ici être effectué quant aux conclusions similaires d'études s'intéressant aux bénéfices énergétiques de l'implantation de toits végétalisés sur des bâtiments en climats tempérés (Castleton *et al.*, 2010) ou froids (Erlend *et al.*, 2018). Il est aussi à noter que l'intégration d'une serre au toit d'un bâtiment pourrait occasionner une surchauffe ou des besoins en climatisation supplémentaires de l'étage adjacent pendant les périodes chaudes et ensoleillées. Bien qu'au Québec les besoins en chauffage soient typiquement supérieurs à ceux en climatisation, ces impacts devraient être évalués en phase de conception de tels projets.

L'intégration de la serre au toit du bâtiment réduit sa consommation énergétique, particulièrement lorsque le toit a un faible niveau d'isolation, mais elle ne permet pas de répondre à elle seule à l'ensemble des besoins en chauffage de la serre. Il est d'autant plus intéressant de rappeler que les Fermes Lufa (2020b) affirment que leurs serres urbaines, installées sur les toits de divers bâtiments dans la région de Montréal, consomment environ 50 % moins d'énergie que les serres conventionnelles sur sol. Au regard des résultats de l'étude, l'atteinte de telles performances semble difficilement atteignable lorsque seule la récupération passive des pertes de chaleur du toit de bâtiments hôtes est considérée. D'autres facteurs, associés aux spécificités de leurs serres *high-tech*, pourraient cependant expliquer les performances suggérées (p. ex. l'utilisation de technologies hautement efficaces et de dernière génération, une optimisation des opérations, une mise en place de mesures d'efficacité énergétique additionnelles et/ou non conventionnelles, des conditions climatiques urbaines plus favorables par rapport au reste du Québec, etc.).

Finalement, bien que l'intégration d'une serre au toit d'un bâtiment offre certains bénéfices énergétiques, pouvant par le fait même réduire les coûts d'exploitation, elle mène généralement à des investissements initiaux beaucoup plus élevés qu'au sol

(Seguin *et al.*, 2021; Syndicat des producteurs en serre du Québec, 2013). Il semble ainsi que l'installation d'une serre sur toit ne s'avère pas une mesure d'efficacité énergétique rentable en elle-même. Comme le rappelle certaines études, les bénéfices ne sont toutefois pas limités qu'à l'aspect énergétique. Un ensemble d'autres bénéfices sociaux et environnementaux (Benis *et al.*, 2017; Benis *et al.*, 2018; Montero *et al.*, 2012; Sanyé-Mengual *et al.*, 2013), de même que la possibilité d'accroître de manière non négligeable la capacité de production alimentaire des villes sur des espaces autrement inutilisés (Devi et Ranka, 2016; Haberman *et al.*, 2014; Nadal *et al.*, 2018; Sanyé-Mengual *et al.*, 2015; Sanyé-Mengual *et al.*, 2018) sont des facteurs qui doivent aussi être pris en considération quant à la pertinence de telles installations.

6.1.2 Choix de conception pour une efficacité énergétique accrue en serre

Comme l'a montré l'étude, certains choix de conception d'une serre peuvent exercer une importante influence sur ses performances. En premier lieu, le matériau de recouvrement de la serre a un impact non négligeable sur ses performances énergétiques, ainsi que sur les émissions de GES et les coûts associés à l'opération. Dans le contexte étudié, le polycarbonate à double paroi s'est montré significativement plus performant énergétiquement que le verre à simple paroi, les pertes de chaleur en saison de chauffage étant réduite avec son utilisation. Il a toutefois été estimé que, l'utilisation du verre plutôt que du polycarbonate permet d'augmenter la quantité de lumière totale reçue par les cultures sur une base mensuelle, et ce, malgré l'utilisation d'éclairage artificiel (pour des capacités d'éclairage installées identiques). Il pourrait s'avérer intéressant, lors de futurs travaux, d'évaluer les potentiels impacts sur les rendements de production associés à l'un ou l'autre des matériaux, ou encore d'évaluer l'impact sur la capacité d'éclairage artificiel installée en fonction de différents matériaux pour l'atteinte de performances équivalentes. De plus, plusieurs facteurs, autres qu'énergétiques et sortant du cadre de cette étude, devraient être pris en considération lors de la sélection du matériau de recouvrement de la serre, tant sur le

plan légal (p. ex. les normes de construction locales), financier (p. ex. les coûts d'installation et la durée de vie), agronomique (p. ex. les impacts sur les rendements de production et/ou sur les besoins en éclairage artificiel), qu'environnemental (p. ex. l'analyse de cycle de vie du matériau). Il serait d'ailleurs pertinent pour certaines instances gouvernementales, qui désirent que plus de serres urbaines voient le jour sur leur territoire, de revoir certaines contraintes associées aux normes de construction et règlements d'urbanisme locaux. Par exemple, certains allègements réglementaires associés aux matériaux de construction autorisés pourraient potentiellement faciliter l'implantation de tels projets.

En ce qui a trait au type d'appareils d'éclairage artificiel, il a été montré que ce dernier peut avoir un impact non négligeable sur la consommation énergétique totale, bien qu'une grande partie des pertes de chaleur soient valorisés pour le chauffage de l'espace, les besoins en éclairage concordant typiquement avec les besoins en chauffage lors de périodes froides et non ensoleillées, comme relaté par Dorais *et al.* (2002). L'utilisation d'appareils d'éclairage plus performants, et ainsi de la consommation énergétique associée à l'éclairage, n'entraîne ainsi pas une réduction proportionnelle de la consommation énergétique totale de la serre, car il y a une augmentation des besoins en chauffage. L'utilisation d'appareils d'éclairage plus performants peut même entraîner une augmentation des émissions de GES de la serre lorsque son chauffage est assuré par du gaz naturel. Il est toutefois à noter que ces conclusions pourraient s'en trouver différentes dans l'éventualité où l'impact des plantes serait inclus au modèle, le type d'appareil d'éclairage ayant un impact, notamment, sur la transpiration de ces dernières (Katzin *et al.*, 2021). Ultimement, la sélection du type d'éclairage devrait se baser sur un ensemble de facteurs techniques et financiers, de même que sur les effets croisés potentiels, comme ceux en lien avec les besoins en chauffage, et non seulement sur les performances énergétiques spécifiques aux appareils. Les avancées récentes et la baisse constante des coûts de la technologie LED, qui offre certains avantages en comparaison au HPS (p. ex. une durée de vie

supérieure, des coûts de maintenance réduits, des dimensions inférieures, etc.), rendant cette dernière de plus en plus compétitive, devraient aussi être prises en considération.

6.1.3 Source d'énergie de chauffage : facteur environnemental décisif

Dans le cadre de cette étude, le facteur le plus déterminant sur les émissions de GES de la serre est la source d'énergie de chauffage. En effet, l'utilisation d'une énergie de chauffage de source propre et renouvelable permet d'importants gains de performances environnementaux, en comparaison à l'utilisation d'une énergie fossile. Plusieurs autres études arrivent d'ailleurs à cette même conclusion (Devi et Ranka, 2016; Goldstein *et al.*, 2016a; Piezer *et al.*, 2019). Le chauffage au gaz naturel s'avère toutefois plus compétitif que l'électricité d'un point de vue financier, et ce, malgré une tarification électrique particulièrement intéressante dans le contexte à l'étude. Des programmes gouvernementaux d'aides financières, visant à compenser les surcoûts d'exploitation associés au chauffage électrique, pourraient ainsi s'avérer pertinents d'un point de vue environnemental. Il est cependant à rappeler que les tarifs énergétiques, tant pour l'électricité que le gaz naturel, sont évolutifs et dépendent fortement du contexte énergétique, tant local que mondial. Ils pourraient ainsi changer aux cours des prochaines années, influençant par le fait même les présentes conclusions. Finalement, il est à noter que les réductions des émissions de GES associées aux mesures d'efficacité énergétique décrites précédemment sont grandement dépendantes de la source d'énergie de chauffage. En effet, une mesure d'efficacité énergétique menant à la réduction de la consommation d'énergie fossile, comme le gaz naturel, s'avère beaucoup plus bénéfique qu'une mesure menant à la réduction de la consommation d'électricité, si elle est de source renouvelable.

6.2 Limites de l'étude et potentielles améliorations à la modélisation

La présente étude avait pour but d'estimer les impacts de différents paramètres sur une serre urbaine commerciale théorique, afin de comparer divers scénarios semblables entre eux. Bien que les intensités énergétiques calculées pour les différents scénarios étaient d'un ordre de grandeur réaliste, une approche simplifiée a été utilisée pour la modélisation de la serre et certaines améliorations pourraient être apportées pour en améliorer la fiabilité pour l'étude de cas particuliers. En effet, les résultats obtenus par modélisation énergétique dépendent en grande partie des hypothèses utilisées. Par exemple, des conditions de culture (p. ex. la température, la luminosité, le taux de ventilation mécanique, etc.) relativement constantes ont été maintenues tout au long de l'année dans le cadre de cette étude alors, qu'en réalité, des variations seront typiquement observées selon certains facteurs (p. ex. le stade de croissance des végétaux, le calendrier de culture, l'utilisation d'un système de supplémentation en CO₂, etc.), ce qui pourrait impacter l'ordre de grandeur de la consommation énergétique calculée. Il est également à noter que certains facteurs peuvent avoir une grande incidence sur les besoins en chauffage, notamment les taux d'infiltration d'air naturel et de ventilation en périodes de chauffage. Des taux de ventilation mécanique plus optimaux que ceux utilisés pour cette étude pourraient réduire de manière non négligeable les besoins en chauffage. Une attention particulière devrait ainsi être portée à ces paramètres lorsque l'objectif est la modélisation détaillée d'un cas réel. De plus, à des fins de simplifications, étant donné la nature comparative de l'étude, la géométrie et l'orientation de la serre au sol et de la serre sur toit ont été considérées identiques et basées sur les limitations spatiales de cette dernière. Cependant, une serre sur sol profite normalement d'une plus grande flexibilité quant à l'optimisation de ces paramètres, ce qui permet, notamment, de maximiser la lumière naturelle reçue. Finalement, d'autres améliorations pourraient être apportées à la modélisation, afin de rendre cette dernière plus précise, notamment :

- Ajouter des zones thermiques verticales dans la serre, soit pour la partie haute et pour la partie basse, afin d'évaluer les impacts associés à la stratification thermique et d'améliorer la modélisation des rideaux thermiques;
- Inclure les interactions des plantes avec leur environnement (p. ex. les échanges thermiques, l'absorption d'une portion de l'énergie radiative d'éclairage, etc.) et des calendriers de culture afin d'en vérifier les impacts, et ce, selon le type et la densité de culture;
- Ajouter un système de supplémentation en CO₂ et en vérifier l'impact énergétique, notamment en ce qui concerne l'optimisation du taux de ventilation mécanique maintenu dans la serre.

Tout projet visant la modélisation énergétique d'une serre urbaine spécifique devrait utiliser une approche et des paramètres propres aux particularités de celle-ci, afin d'obtenir des résultats d'une meilleure fiabilité. Il pourrait d'ailleurs être intéressant, dans le cadre d'une étude paramétrique ultérieure de nature similaire, de modéliser un scénario de référence se basant sur une serre existante, afin de permettre la calibration du modèle et de réduire l'incertitude relative aux hypothèses et résultats obtenus.

6.3 Perspectives de développement de la serriculture urbaine en climats froids

Au regard des résultats et de la littérature, il semble qu'il existe plusieurs opportunités permettant d'améliorer l'efficacité énergétique de serres urbaines commerciales et de réduire drastiquement leurs émissions de GES, notamment par la valorisation de divers types de rejets thermiques et l'utilisation d'énergie renouvelable. Dans cette étude, étant donné les caractéristiques du bâtiment, seuls les gains énergétiques associés aux échanges thermiques entre le toit de ce dernier et le plancher de la serre ont été considérés. Il a été montré que ces échanges, bien qu'ils les réduisent, ne peuvent répondre à eux seuls aux besoins en chauffage de la serre. Cependant, en ville, plusieurs bâtiments possèdent d'importants systèmes de ventilation et de climatisation. Ces

derniers peuvent s'avérer être une source d'importants rejets thermiques qui pourraient être valorisés énergétiquement avec une serre sur toit et potentiellement offrir des apports bénéfiques en air enrichi en CO₂ (Devi et Ranka, 2016; Goldstein *et al.*, 2016b; Il-Seok *et al.*, 2018; O'Sullivan *et al.*, 2019). La récupération de rejets thermiques d'un bâtiment pourrait s'en trouver d'autant plus intéressante lorsque des activités énergivores prennent place au sein du bâtiment, et ce, tout au long de l'année. Ces gains, bien qu'entraînant une complexité technique supplémentaire, notamment par la modification ou l'ajout de systèmes mécaniques, pourraient mener à une demande en chauffage largement réduite pour la serre, selon les caractéristiques du projet.

L'une des situations prometteuses en climats froids pourrait être la récupération de la chaleur provenant de centre de données (*data centers*), comme suggéré par l'étude de Ljungqvist *et al.* (2020). En effet, ces derniers, en plus d'émettre une importante quantité de chaleur de manière relativement constante, typiquement rejetée à l'extérieur, peuvent s'intégrer facilement et de manière modulaire à des bâtiments existants. Des partenariats stratégiques, entre producteurs en serre et exploitants de centres de données, pourraient s'avérer potentiellement mutuellement profitables. De plus, tout semble indiquer que le nombre de centres de données augmentera exponentiellement au cours des prochaines années.

En ce qui a trait aux serres urbaines sur sol, d'autres avenues visant à réduire en partie ou en totalité leurs besoins en chauffage seraient à explorer. Bien que plusieurs études suggèrent le fort potentiel de symbiose entre l'agriculture et la ville, peu d'entre elles identifient clairement les opportunités de valorisation de rejets thermiques urbains autres que celles provenant de l'intégration d'une serre à un bâtiment, ni ne font l'évaluation du potentiel et de l'applicabilité de telles mesures. Il serait pertinent d'identifier et d'étudier de manière détaillée certaines de ces opportunités lors de futurs travaux, afin d'évaluer la faisabilité de mieux profiter des diverses sources thermiques urbaines, commerciales ou industrielles (p. ex. les centrales thermiques, les raffineries,

les réseaux de chaleur urbains, etc.), pour répondre en partie ou en totalité aux besoins en chauffage de serres. L'un des enjeux avec les serres urbaines sur sol demeure toutefois l'accès à des espaces abordables et adaptés à l'implantation de tels projets.

L'intégration de projets agricoles sur les toits de bâtiments s'avère répondre à la problématique du manque d'espace en contexte urbain et offre un intéressant potentiel de production grâce aux méthodes intensives, comme la serriculture, tant à Montréal (Haberman *et al.*, 2014) que dans d'autres régions du monde (Benis *et al.*, 2018; Nadal *et al.*, 2018; Sanyé-Mengual *et al.*, 2015; Sanyé-Mengual *et al.*, 2018). La récupération passive des pertes de chaleur des toits de bâtiments peut être intéressante sur le plan énergétique en climats froids, lorsque leur niveau d'isolation est faible, mais ne semble pas justifier à elle seule l'adoption de telles pratiques. Des travaux futurs pourraient viser à effectuer un inventaire de bâtiments propices à l'intégration de serres sur leur toit dans certaines villes, comme Montréal, basé sur certains critères techniques (p. ex. le niveau d'isolation et la capacité portante du toit, les caractéristiques architecturales, le type d'activités ou d'industrie, etc.) et urbanistiques (p. ex. la réglementation et le zonage), qui permettraient d'en minimiser les investissements initiaux et d'en maximiser les performances énergétiques.

CONCLUSION

L'analyse paramétrique effectuée dans le cadre de cette étude a permis d'estimer les impacts énergétiques, environnementaux et financiers de différents paramètres techniques d'une serre urbaine commerciale opérée en climat froid. Pour ce faire, le logiciel OpenStudio a été utilisé pour effectuer la modélisation énergétique. Les résultats ont permis de comparer chacun des scénarios en fonction de scénarios de référence et de classer ces derniers en fonction des catégories de performances à l'étude. Une analyse des impacts individuels de chacun des paramètres a également été effectuée, afin de mieux identifier les mesures les plus prometteuses.

Dans le contexte à l'étude, les résultats ont montré que l'intégration d'une serre au toit d'un bâtiment permet une réduction non négligeable de ses besoins en chauffage, ainsi que de ceux du bâtiment, lorsque le toit du bâtiment a un faible niveau d'isolation. Une serre intégrée au toit d'un bâtiment peut cependant mener à des températures supérieures ou des besoins en climatisation augmentés à l'étage sous-jacent, particulièrement en saison estivale. En ce qui a trait au matériau de recouvrement de la serre, l'utilisation de polycarbonate à double paroi montre des performances énergétiques globales plus intéressantes, mais le verre à simple paroi permet toutefois d'augmenter la quantité de lumière totale reçue par les cultures, lorsque les capacités d'éclairage installées sont identiques, ce qui peut s'avérer être bénéfique pour les rendements de production. En ce qui a trait à l'éclairage artificiel, l'utilisation d'appareils plus performants, bien qu'ils permettent une réduction de la consommation d'électricité, peut induire une certaine augmentation des émissions de GES lorsque le chauffage de la serre est assuré par une énergie fossile. De plus, bien que le chauffage à l'électricité de source renouvelable soit plus efficace énergétiquement et qu'il

permette une importante réduction des émissions de GES, comparativement au chauffage au gaz naturel, il s'avère désavantageux d'un point de vue financier. Finalement, au regard de cette étude, il serait pertinent que des travaux futurs:

- Améliorent l'approche utilisée pour la modélisation de la serre, notamment en y intégrant l'impact des plantes et en se basant sur des cas réels pour développer des scénarios de référence, facilitant ainsi le choix des paramètres et permettant d'effectuer une calibration pour en améliorer la fiabilité.
- Effectuent une analyse financière avancée, pour la durée de vie complète d'un projet, comparant les bénéfices énergétiques aux surcoûts initiaux des différentes mesures d'efficacité énergétique évaluées.
- Évaluent la récupération de rejets thermiques supplémentaires provenant de bâtiments ayant des systèmes de ventilation et/ou de climatisation, surtout si des activités énergivores y prennent place (p. ex. un centre de données). Dans le cas de serres urbaines sur sol, l'évaluation de la récupération de rejets thermiques provenant de diverses sources à fort potentiel (p. ex. les centrales thermiques et les centres industriels) serait également pertinente.
- Effectuent, pour des villes en climats froids, un inventaire de bâtiments propices à l'intégration d'une serre à leur toit selon certains critères établis (p. ex. le niveau d'isolation et la capacité portante du toit, les règlements d'urbanisme applicables, etc.) et évaluent le potentiel d'implantation de tels projets à grande échelle.

Bien que cette étude s'intéresse à un cas particulier dans la ville de Montréal, les résultats obtenus permettent d'identifier des scénarios particulièrement prometteurs pour les villes situées en climats froids visant à gagner en autosuffisance alimentaire et peuvent servir d'indicateurs quant à la pertinence écologique et financière de certaines mesures d'efficacité énergétique et lors de l'analyse préliminaire de projets de vocations similaires. De plus, ils peuvent aider à orienter la création de meilleures politiques encourageant le développement de l'agriculture urbaine commerciale.

ANNEXE A

PARAMÈTRES DE MODÉLISATION DU BÂTIMENT

Tableau 1 – Caractéristiques générales et architecturales du bâtiment modélisé

Caractéristiques générales	
Nombre d'étages	4
Horaire des activités principales	8h à 18h, du lundi au vendredi
Caractéristiques générales	
Réseau de chauffage	Chaudières au gaz naturel et réseau à l'eau chaude avec radiateurs à l'eau
Période de chauffage	Début septembre à fin mai
Climatisation	Aucune climatisation centralisée Refroidissement par ventilation naturelle (fenêtres ouvrantes)
Ventilation	Aucune ventilation centralisée Ventilateurs d'extraction aux étages (toilettes)
Dimensions	
Façades orientées sud-sud-ouest à nord-nord-est	71,9 m
Façades orientées est-sud-est à ouest-nord-ouest	51,5 m
Superficies	
Superficie de plancher d'étage et du toit	3 716 m ²
Superficie de plancher totale	14 865 m ²
Hauteurs des étages (plancher à plancher)	
Sous-sol	4 m
1 ^{er} étage	4,6 m
2 ^e étage	4,3 m
3 ^e étage	3,7 m
Ratio de superficie de la fenestration par rapport la superficie totale de façade (incluant sous-sol)	
Sud-sud-ouest	30 %
Nord-nord-est	31 %
Est-sud-est	32 %
Ouest-nord-ouest	22 %
Total	28 %
Ratio de superficie de portes par rapport à la superficie des façades (incluant sous-sol)	
Total	2 %
Ratio de superficie de façade enfouie (sous-sol) par rapport à la superficie des façades (incluant sous-sol)	
Total	17 %

Tableau 2 – Propriétés de l'enveloppe du bâtiment modélisé

Description	Propriété	Valeur	Source
* Toit – Scénarios toit niveau d'isolation faible (existant)	Valeur U globale	1,55 W/m ² .K	-
* Toit – Scénarios toit niveau d'isolation moyen		0,36 W/m ² .K	OSL (DOE pre-1980)
* Toit – Scénarios toit niveau d'isolation élevé		0,18 W/m ² .K	Code de construction du Québec (Loi sur le bâtiment)
Murs extérieurs - étages		1,87 W/m ² .K	-
Murs extérieurs du sous-sol – air libre		5,19 W/m ² .K	-
Murs extérieurs du sous-sol – enfouis		6,40 W/m ² .K	-
Plafonds / planchers		1,54 W/m ² .K	-
Portes		1,18 W/m ² .K	-
Dalle du sous-sol		6,45 W/m ² .K	-
Fenêtres		Valeur U globale	5,84 W/m ² .K
	Coefficient de gain solaire thermique (SHGC)	0,54	
	Transmittance	0,38	

Note 1 : Les éléments avec astérisques (*) sont des valeurs variables étudiées dans l'analyse comparative.

Note 2: Sauf sous indication contraire, les valeurs ont été déterminées ou calculées par l'assemblage d'éléments provenant des bibliothèques d'OpenStudio – *OpenStudio Library* (OSL) et/ou *Building Component Library* (BCL) – basées sur les plans, relevés, informations disponibles et hypothèses relatives au bâtiment.

Tableau 3 – Caractéristiques opérationnelles par types d'espace du bâtiment modélisé

	<i>Warehouse – Basement</i>	<i>Warehouse and Workshop – Floors</i>	<i>Warehouse Offices and Workshop</i>	Source si valeur typique provenant de références (non relevée ou estimée)
	(Sous-sol)	(Zones centrales étages 1 et 2)	(Zones périmétriques étages 1, 2 et 3 et zone centrale étage 3)	
Charges thermiques internes				
Occupation	0,001 occ./m ²	0,001 occ./m ²	0,021 occ./m ²	OSL (DOE pre-1980)
Éclairage	6,8 W/m ²	17,1 W/m ²	17,1 W/m ²	Hydro-Québec (2013)
Équipements électriques	2,7 W/m ²	2,7 W/m ²	8,1 W/m ²	OSL (DOE pre-1980)
Infiltration d'air	1,13 L/s/m ² de surfaces verticales extérieures			OSL (DOE pre-1980)
Points de consigne en chauffage et refroidissement				
Température (chauffage)	20°C	22,2°C	22,2°C	-
Température (refroidissement)	-	-	-	-
Température de l'eau de chauffage	82,2°C			-
Efficacité des chaudières au gaz naturel	80 %			-
Période de chauffage	1 ^{er} septembre au 31 mai			-
Température du sol				
Température	Température constante de 18°C (-2 °C sous la température des espaces du sous-sol)			EnergyPlus (2014c)
Ventilation mécanique				
Débit des évacuateurs	0,25 L/s/m ²			-
Ventilation naturelle				
Débit de ventilation naturelle de conception	5 CAH			Débit de conception standard proposé par OS et débit typique tiré de CIBSE (2005)
Température intérieure minimale	24°C			-
Température extérieure minimale	15°C			-
Eau chaude sanitaire (pour l'ensemble du bâtiment)				
Température eau chaude	60°C			-
Consommation journalière moyenne	3,8 L/personne			ASHRAE (2011)

Note: Sauf indication contraire, les caractéristiques et horaires d'opération du bâtiment proviennent d'hypothèses basées sur les plans, relevés, observations ou sur des valeurs d'opération standards de bâtiments. Comme indiqué, certaines valeurs typiques proviennent de la *OpenStudio Library* (OSL) – DOE pre-1980, du guide de référence du logiciel SIMEB (Hydro-Québec, 2013) ou de ASHRAE (2011).

ANNEXE B

PARAMÈTRES DE MODÉLISATION DE LA SERRE

Tableau 1 – Principales caractéristiques générales et architecturales de la serre modélisée

Caractéristiques générales	
Modèle	Luminosa Serie 8, 21' - 4''
Type	Jumelée (7 chapelles)
Vocation	Commerciale
Type de culture	Hydroponique, fruits et légumes
Orientation (sens des gouttières de toit)	Sud-Sud-Ouest – Nord-Nord-Est
Horaire des opérations (occupation)	De 8h à 18h, tous les jours
Éclairage artificiel	Oui
Chauffage	Oui
Système de refroidissement	Non
Ventilation mécanique	Oui (ventilateurs d'extraction)
Ventilation naturelle	Oui (ouvertures au toit)
Recirculation de l'air	Oui (ventilateurs à débit horizontal / HAF)
Dimensions	
Longueur	64 m
Largeur d'une chapelle	6,5 m
Largeur totale (7 chapelles)	45,5 m
Hauteur à la gouttière	4,27 m
Hauteur au pignon	6,3 m
Superficies	
Superficie de plancher par chapelle	416 m ²
Superficie de plancher totale	2 914 m ²
Volume	
Volume d'une chapelle	2 216 m ³
Volume total	15 513 m ³
Ratio de superficie de la fenestration (<i>window-to-wall ratio</i>)	
Façades	90 %
Toit	85 %

Tableau 2 – Propriétés de l'enveloppe de la serre modélisée

Description	Propriété	Valeur	Source
* Murs et toits (polycarbonate double paroi)	Valeur U globale de l'enveloppe	3,42 W/m ² ·K	Données du manufacturier pour modèle Lexan Thermoclear LT2UV82RS15 (Sabic, 2020). Facteur de correction de la valeur U du vitrage = 1,05 appliqué pour tenir compte des éléments structuraux opaques (ASHRAE, 2011).
	Coefficient de gain solaire thermique du vitrage (SHGC)	0,82	
	Transmittance du vitrage	0,81	
* Murs et toits (vitrage simple paroi)	Valeur U globale de l'enveloppe	6,22 W/m ² ·K	Données pour verre clair simple paroi typique tirées de BCL. Facteur de correction de la valeur U du vitrage = 1,05 appliqué pour tenir compte des éléments structuraux opaques (ASHRAE, 2011).
	Coefficient de gain solaire thermique du vitrage (SHGC)	0,84	
	Transmittance du vitrage	0,90	
* Plancher (serre au sol)		6,45 W/m ² ·K	BCL
* Plancher / toit du bâtiment (serre sur toit) – scénario toit existant – niveau d'isolation faible	Valeur U	6,45 W/m ² ·K	-
* Plancher / toit du bâtiment (serre sur toit) – scénarios toit niveau d'isolation moyen		0,36 W/m ² ·K	
* Plancher / toit du bâtiment (serre sur toit) – scénarios toit niveau d'isolation élevé		0,18 W/m ² ·K	

Note 1 : Les éléments avec astérisques (*) sont des paramètres variables selon les scénarios.

Note 2: Sauf sous indication contraire, les valeurs ont été déterminées ou calculées par l'assemblage de composantes provenant des bibliothèques d'OpenStudio – *OpenStudio Library* (OSL) et/ou *Building Component Library* (BCL).

Tableau 3 – Caractéristiques opérationnelles communes à tous les scénarios de la serre

Description	Valeur	Source
Charges internes		
Occupation	0,01 occ./m ²	Estimé avec valeurs de Turcotte <i>et al.</i> (2015)
Ventilateurs d'extraction – Puissance nominale installée	0,42 W/m ²	Estimé avec recommandations et catalogue d'équipements de Serres Harnois (2017)
Ventilateurs horizontaux de recirculation (HAF) – Puissance nominale installée	0,55 W/m ²	
Infiltration d'air	0,6 CAH	ASHRAE (2011) et (ASAE, 2003)
Ventilation mécanique		
Débit d'air ventilateurs d'évacuation	Jour : 2 CAH Nuit : 0 CAH	Basé sur recommandations de Turcotte <i>et al.</i> (2015), Watson <i>et al.</i> (2019), ASAE (2003) et Serres Harnois (2017)
Débit d'air de recirculation (HAF)	20 L/s/m ² de plancher	Basé sur recommandations Serres Harnois (2017) (Note : Le débit est utilisé afin de calculer la puissance des ventilateurs)
Ventilation naturelle		
Débit de ventilation naturelle maximale	60 CAH	Basé sur recommandations de Turcotte <i>et al.</i> (2015), Watson <i>et al.</i> (2019) et ASHRAE (2011) (Note: Les valeurs par défaut des paramètres A (0.606), B (0.03636), C (0.1177) et D (0) de <i>zone ventilation design flow rate</i> ont été utilisés (EnergyPlus, 2014d))
Rideaux thermiques		
Épaisseur	3,5 mm	Basé sur Rasheed <i>et al.</i> (2019)
Conductivité thermique	0,0037 W/m·K	
Émissivité thermique (ϵ) / Transmissivité thermique (τ)	0,9 / 0	
Horaire d'utilisation	Nuit	-
Définition des périodes		
Jour	6h à 22h (16 heures/jour)	-
Nuit	22h à 6 h (8 heures/jour)	-
Hiver	15 octobre au 14 avril	-
Été	15 avril au 14 octobre	-

Tableau 4 – Conditions environnementales visées selon le type de culture

	Tomates (chaud)	Laitue (froid)	Source
Températures			
Température minimale de jour (chauffage)	20°C	18°C	Basées sur diverses sources (OMAFRA, 2010; Turcotte <i>et al.</i> , 2015; Wees <i>et al.</i> , 1996)
Température maximale de jour (ventilation)	24°C	21°C	
Température minimale de nuit (chauffage)	18°C	Été: 18°C Hiver: 15°C	
Température maximale de nuit (ventilation)	22°C	21°C	
Température du sol (serre au sol seulement)	75 % entre la température de consigne de la serre (tomate) et température 0,5 m sol	75 % entre la température de consigne de la serre (laitue) et température 0,5 m sol	Méthode de calcul basée sur Léveillé-Guillemette et Monfet (2018)
Lumière et éclairage			
Quantité optimale de rayonnement photosynthétique actif (PAR) journalier (DLI) considérée optimale	30 mol/m ² /jour	17 mol/m ² /jour	Basées sur diverses sources (ASHRAE, 2011; Dorais, 2003; OMAFRA, 2010; Torres et Lopez, 2010; Turcotte <i>et al.</i> , 2015)
Intensité de lumière artificielle	150 µmol/m ² /s	50 µmol/m ² /s	
Photopériode	16 h	16 h	
Période d'autorisation d'éclairage	6h à 22h	6h à 22h	Basé sur Runkle (2013)
Condition d'autorisation éclairage	Si DLI moyen mesuré dans la serre < 30 mol/m ² /jour	Si DLI moyen mesuré dans la serre < 17 mol/m ² /jour	
Condition de modulation de l'éclairage pour atteinte de DLI	Si DLI moyen mesuré dans la serre < 30 et > 20 mol/m ² /jour	Si DLI moyen mesuré dans la serre < 17 et > 12 mol/m ² /jour	
Aucune modulation de l'éclairage	Si DLI moyen mesuré dans la serre < 20 mol/m ² /jour	Si DLI moyen mesuré dans la serre < 12 mol/m ² /jour	
Condition d'autorisation éclairage en fonction de l'intensité lumineuse naturelle instantanée	Si FPPD moyen mesuré dans la serre < 400 µmol/m ² /s	Si FPPD moyen mesuré dans la serre < 400 µmol/m ² /s	

Tableau 5 – Caractéristiques des appareils d'éclairage artificiel

	HPS	LED	Source
Efficacité	1,3 $\mu\text{mol/s/W}_{\text{elec}}$	2,6 $\mu\text{mol/s/W}_{\text{elec}}$	HPS : Basé sur ASHRAE (2011) LED : Basé sur Liu <i>et al.</i> (2017)
Fractions des gains thermiques ($F_{\text{convection}} / F_{\text{radiation}} / F_{\text{visible}}$)	0,28 / 0,46 / 0,26	0,37 / 0,11 / 0,52	
Puissance équivalente installée dans la serre	Tomate : 115 W/m^2 Laitue : 38 W/m^2	Tomate : 58 W/m^2 Laitue : 19 W/m^2	-

Note : Il est considéré que 100 % de l'énergie consommée par les appareils d'éclairage est transformée en chaleur (par conduction, convection et rayonnement) et transférée à la serre. À des fins de simplifications, la portion de l'énergie radiative absorbée par les plantes est négligée dans le bilan thermique.

Tableau 6 – Caractéristiques des sources d'énergie de chauffage

Paramètre	Gaz naturel	Électricité	Source
Puissance de chauffage nette installée	400 W/m^2	400 W/m^2	-
Efficacité des appareils de chauffage	80 %	100 %	Valeur par défaut OS
Facteur de conversion énergétique	37,9 MJ / m^3	3,6 MJ / kWh	MERN (2020)
Facteur d'émission de GES	49,863 $\text{kg CO}_{2\text{eq}} / \text{GJ}$ (0,0020 $\text{kg CO}_{2\text{eq}} / \text{unité}$)	0,567 $\text{kg CO}_{2\text{eq}} / \text{GJ}$ (1,8893 $\text{kg CO}_{2\text{eq}} / \text{unité}$)	

ANNEXE C

TARIFS ÉNERGÉTIQUES

Tableau 1 – Tarifs énergétiques utilisés pour l'étude (avant taxes)

Structure du tarif d'électricité – option 1 ¹	
Énergie : Première tranche mensuelle de 210 000 kWh	0,0503 \$/kWh
Énergie : Reste de l'énergie mensuelle consommée	0,0373 \$/kWh
Puissance appelée maximale mensuelle	14,58 \$/kW
Structure du tarif d'électricité – option 2 ²	
Énergie	0,0559 \$/kWh
Tarif du gaz naturel ³	
Énergie	0,40 \$/m ³ de gaz naturel

Note 1 : Tarif basé sur le Tarif M d'Hydro-Québec: tarif général clientèle de moyenne puissance. Il est à noter que la puissance à facturer mensuellement correspond à minimalement 65 % de la puissance maximale appelée au cours d'un mois compris dans la période d'hiver (Hydro-Québec, 2020c).

Note 2 : Tarif basé sur l'Option d'électricité pour l'éclairage de photosynthèse ou le chauffage des espaces destinés à la culture de végétaux d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2020b).

Note 3 : Comme les tarifs du principal fournisseur de gaz naturel au Québec (Énergir) sont variables en fonction du marché et du volume de consommation du client, le tarif utilisé est basé sur le prix moyen pour le secteur commercial au Québec, entre 2010 et 2017 (Transition Énergétique Québec, 2018).

ANNEXE D

ANALYSE DE LA QUANTITÉ DE LUMIÈRE NATURELLE REÇUE ET DES BESOINS EN ÉCLAIRAGE DE LA SERRE

Tableau 1 – Quantité de lumière naturelle reçue dans la serre en polycarbonate et dans la serre en verre

Mois	Extérieur		Serre en polycarbonate			Serre en verre			Différence du DLI moyen mensuel de la serre en verre VS en polycarbonate
	Densité de flux photonique quotidienne moyenne ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	DLI moyen mensuel ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$) - Surface horizontale	Densité de flux photonique quotidienne moyenne ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	DLI moyen mensuel ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$) - Surface horizontale	Différence par rapport à l'extérieur	Densité de flux photonique quotidienne moyenne ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) - Serre en verre	DLI moyen mensuel ($\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$) - Surface horizontale - Serre en verre	Différence par rapport à l'extérieur	
Janvier	136	12	84	7	-38 %	96	8	-29 %	14 %
Février	235	20	141	12	-40 %	163	14	-31 %	14 %
Mars	364	31	239	21	-34 %	269	23	-26 %	12 %
Avril	381	33	266	23	-30 %	297	26	-22 %	11 %
Mai	482	42	337	29	-30 %	376	32	-22 %	11 %
Juin	533	46	367	32	-31 %	407	35	-24 %	10 %
Juillet	507	44	357	31	-30 %	397	34	-22 %	11 %
Août	439	38	306	26	-30 %	341	29	-22 %	11 %
Septembre	349	30	226	19	-35 %	254	22	-27 %	12 %
Octobre	214	19	146	13	-32 %	166	14	-23 %	13 %
Novembre	122	11	75	6	-38 %	87	8	-28 %	15 %
Décembre	103	9	63	5	-39 %	72	6	-30 %	14 %
Moyenne	322	28	217	19	-34 %	244	21	-25 %	12 %

Tableau 2 – Répartition mensuelle du nombre de jours n'atteignant pas la valeur optimale de DLI sans éclairage artificiel

Mois	Nombre de jours n'atteignant pas la valeur optimale de DLI sans éclairage artificiel			
	Serre en polycarbonate – Tomate ($<30 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)	Serre en verre – Tomate ($<30 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)	Serre en polycarbonate – Laitue ($<17 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)	Serre en verre – Laitue ($<17 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)
Janvier	31	31	31	31
Février	28	26	28	20
Mars	31	9	25	8
Avril	21	10	20	9
Mai	16	5	12	4
Juin	14	1	9	0
Juillet	13	2	8	2
Août	17	7	16	3
Septembre	30	11	26	8
Octobre	31	24	31	21
Novembre	30	30	30	30
Décembre	31	31	31	31
Total	293	187	267	167

Tableau 3 – Répartition mensuelle du nombre de jours n'atteignant pas la valeur optimale de DLI avec éclairage artificiel

Mois	Nombre de jours n'atteignant pas la valeur optimale de DLI avec éclairage artificiel			
	Serre en polycarbonate – Tomate ($<30 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)	Serre en verre – Tomate ($<30 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)	Serre en polycarbonate – Laitue ($<17 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)	Serre en verre – Laitue ($<17 \text{ mol/m}^2/\text{jour}$)
Janvier	31	30	31	27
Février	28	18	28	11
Mars	13	7	10	6
Avril	15	7	12	6
Mai	9	4	8	2
Juin	6	0	4	0
Juillet	5	1	4	0
Août	10	3	9	2
Septembre	17	7	12	5
Octobre	29	21	26	16
Novembre	30	30	30	28
Décembre	31	31	31	31
Total	224	159	205	134

Tableau 4 – Besoins en éclairage annuels pour les différentes cultures et matériaux de recouvrement à l'étude

Description	Serre en polycarbonate - Tomate	Serre en verre - Tomate	Serre en polycarbonate - Laitue	Serre en verre - Laitue
Nombre de jours par année n'atteignant pas la valeur optimale du DLI sans éclairage artificiel	293	267	187	167
Nombre de jours par année n'atteignant pas la valeur optimale du DLI avec éclairage artificiel	224	205	159	134

Tableau 5 – Consommation électrique associée à l'éclairage de la serre pour différents scénarios

Consommation électrique de l'éclairage – Serre sur sol (MJ/m ²)													
Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Total
Polycarbonate – HPS – Tomate (PPFD = 150 µmol/m ² /s)	184	139	94	87	48	31	28	60	101	153	178	197	1300
Verre – HPS – Tomate (PPFD = 150 µmol/m ² /s)	179	133	71	75	38	22	21	49	80	141	173	192	1175
Polycarbonate – DEL – Tomate (PPFD = 150 µmol/m ² /s)	93	70	47	44	24	15	14	30	51	77	90	99	655
Verre – DEL – Tomate (PPFD = 150 µmol/m ² /s)	90	67	36	38	19	11	11	25	40	71	87	97	592
Polycarbonate – HPS – Laitue (PPFD = 50 µmol/m ² /s)	61	40	15	17	8	1	3	8	15	40	60	66	335
Verre – HPS – Laitue (PPFD = 50 µmol/m ² /s)	58	25	13	14	6	0	2	5	11	34	57	64	289
Polycarbonate – DEL – Laitue (PPFD = 50 µmol/m ² /s)	31	20	8	8	4	0	2	4	8	20	30	33	168
Verre – DEL – Laitue (PPFD = 50 µmol/m ² /s)	29	13	6	7	3	0	1	3	5	17	29	32	145

ANNEXE E

RÉSULTATS DES SIMULATIONS ÉNERGÉTIQUES – SOMMAIRES GRAPHIQUES DES RÉSULTATS

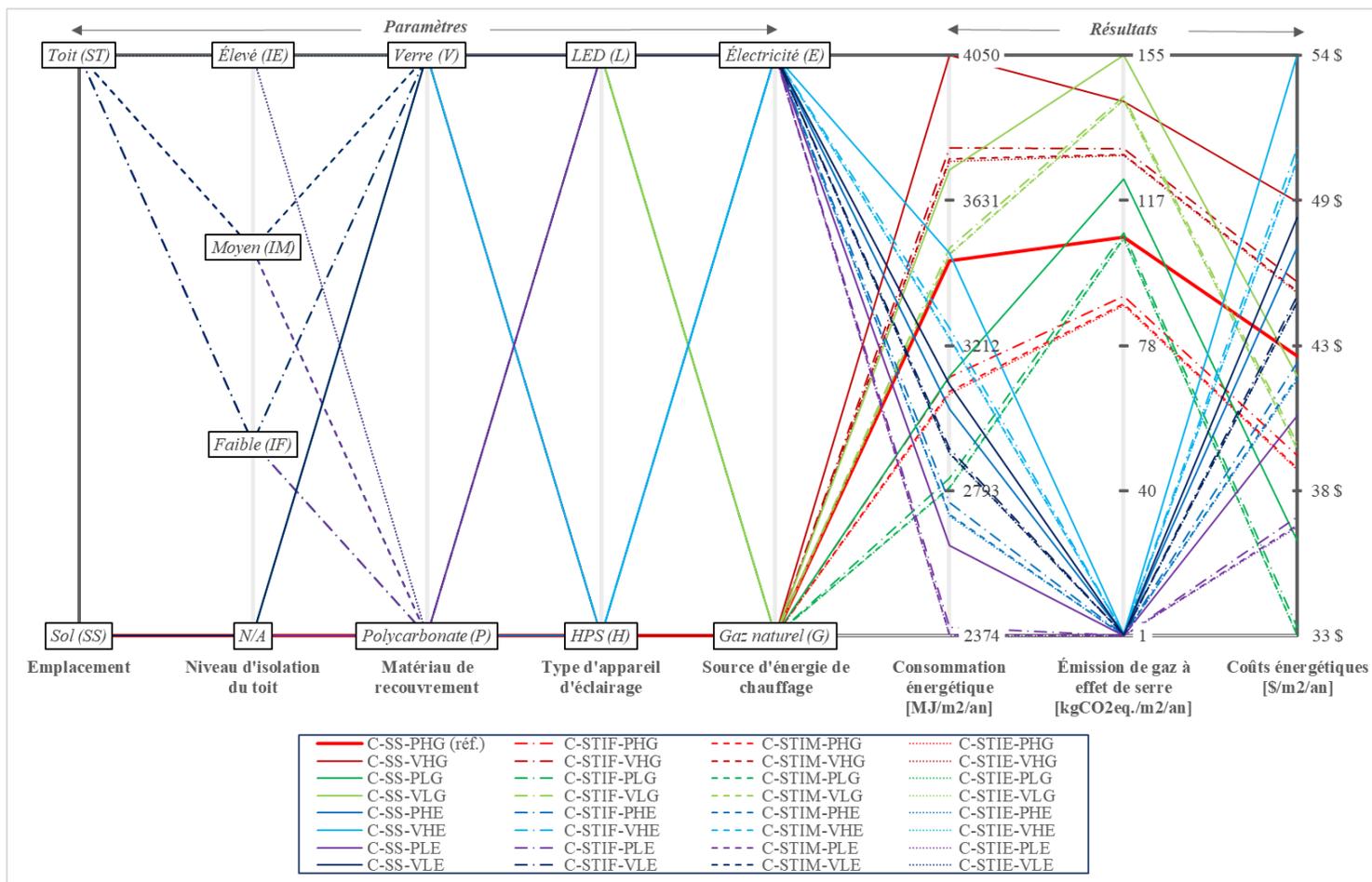


Figure 1 – Consommation énergétique, émissions de gaz à effet de serre et coûts énergétiques totaux annuels de la serre chaude (tomate) en fonction des différents paramètres à l'étude

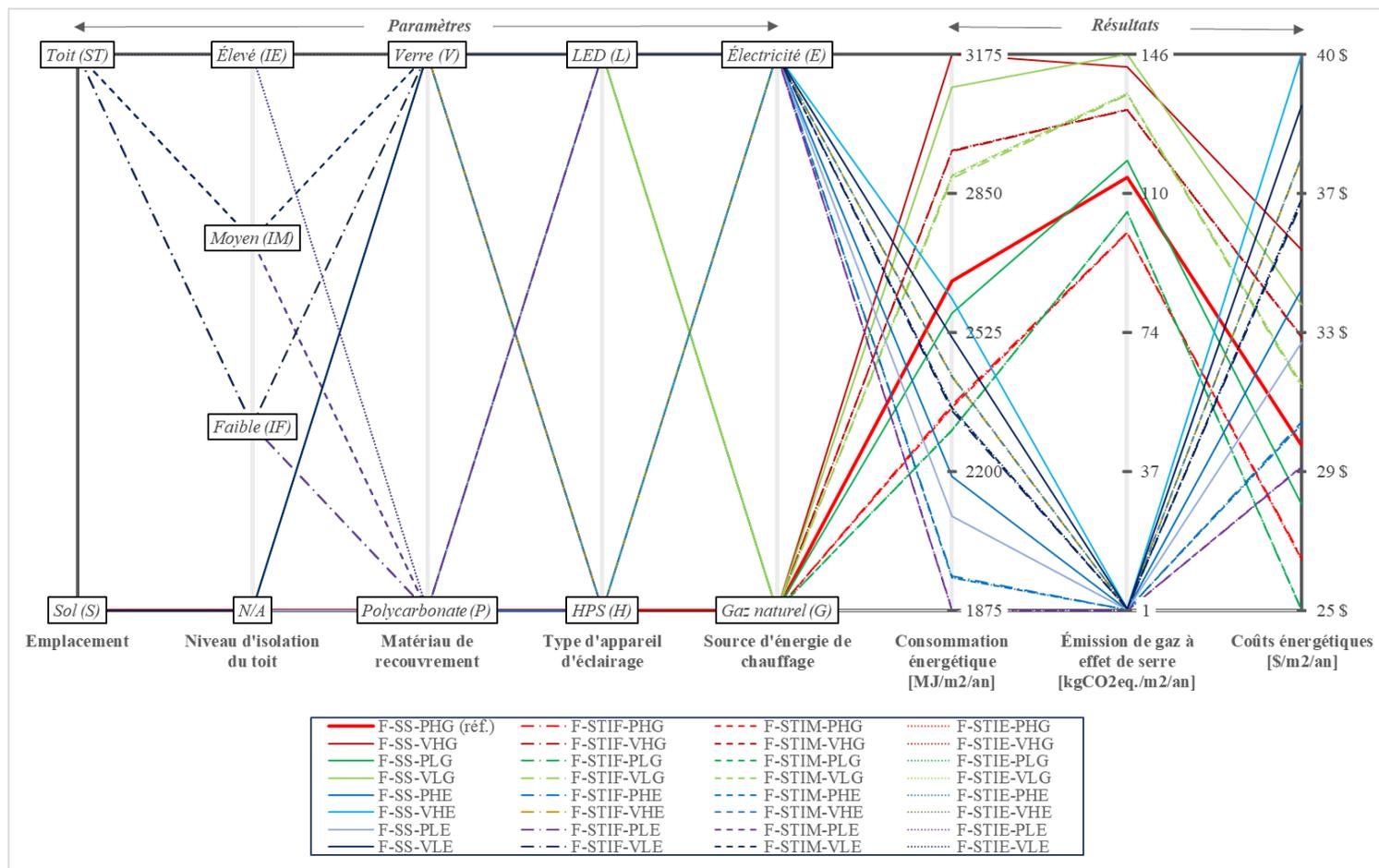


Figure 2 – Consommation énergétique, émissions de gaz à effet de serre et coûts énergétiques totaux annuels de la serre froide (laitue) en fonction des différents paramètres à l'étude

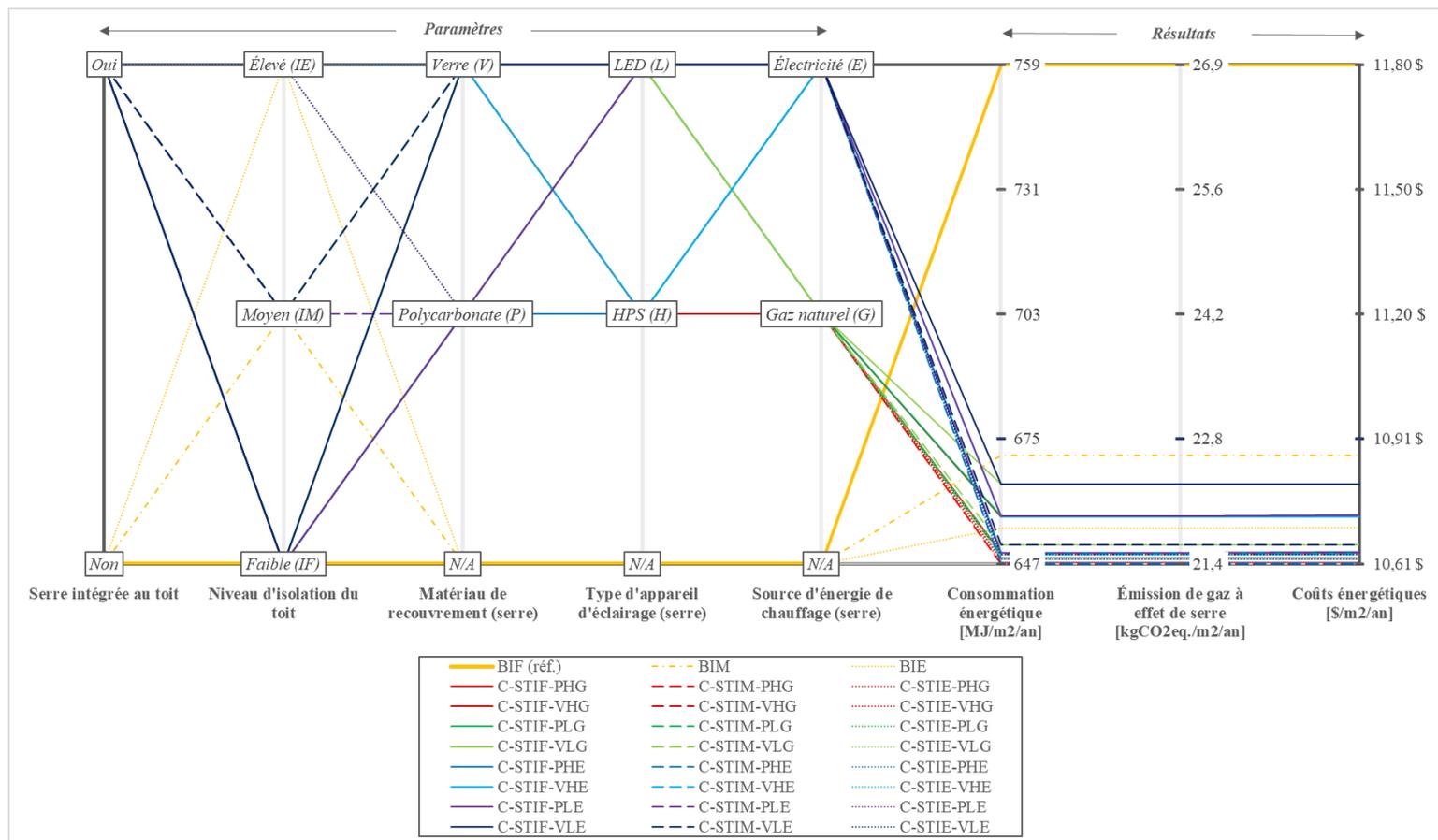


Figure 3 – Consommation énergétique, émissions de gaz à effet de serre et coûts énergétiques totaux annuels du bâtiment avec serre chaude (tomate) intégrée au toit en fonction des différents paramètres à l'étude

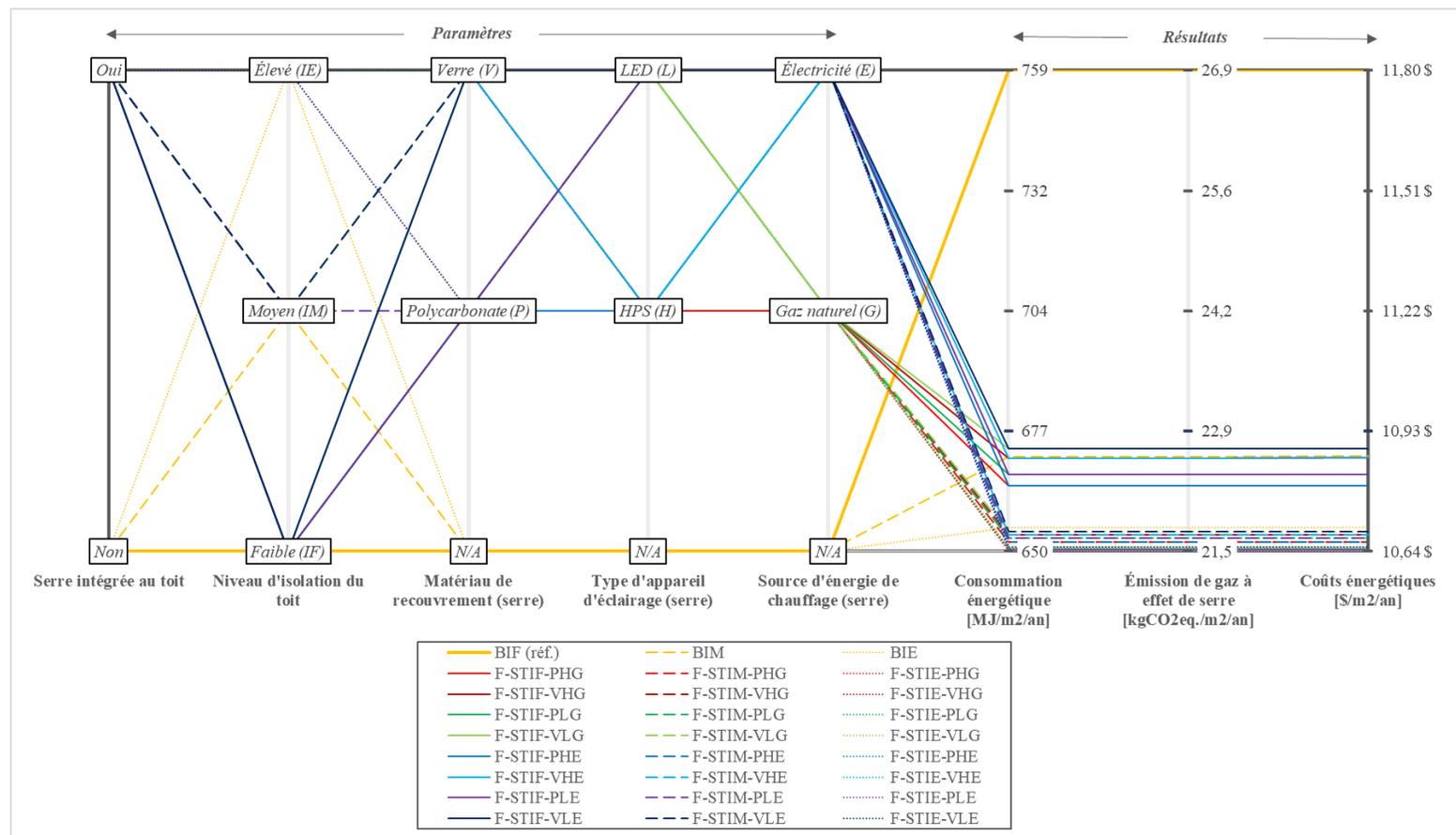


Figure 4 – Consommation énergétique, émissions de gaz à effet de serre et coûts énergétiques totaux annuels du bâtiment avec serre froide (laitue) intégrée au toit en fonction des différents paramètres à l'étude

ANNEXE F

COMPILATION DES RÉSULTATS DES SIMULATIONS ÉNERGÉTIQUES – SOMMAIRES ANNUELS DÉTAILLÉS

Tableau 1 – Résultats des simulations : Sommaire annuel détaillé du bâtiment sans serre au toit

Scénario	Consommation électricité – Total (MJ/m ²)	Consommation gaz naturel – Total (MJ/m ²)	Consommation énergie – Total (MJ/m ²)	Puissance instantanée – Maximum (kW)	Émissions de gaz à effet de serre – Total (kg CO ₂ éq/m ²)	Coûts énergétiques – Total (\$/m ²)
BIF (référence)	221	538	759	257	26,9	11,80 \$
BIM	221	450	671	257	22,6	10,87 \$
BIE	221	434	655	257	21,8	10,70 \$

Tableau 2 – Résultats de simulations : Sommaire annuel détaillé du bâtiment avec serre chaude (tomate) intégrée au toit

Scénario	Consommation électrique totale (MJ/m ²)	Consommation gaz naturel totale (MJ/m ²)	Consommation énergétique totale (MJ/m ²)	Puissance instantanée – Maximum (kW)	Émissions de gaz à effet de serre – Total (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques – Total (\$/m ²)
C-STIF-PHG	221	428	257	650	21,5	10,64 \$
C-STIF-VHG	221	436	257	658	21,9	10,72 \$
C-STIF-PLG	221	437	257	658	21,9	10,72 \$
C-STIF-VLG	221	444	257	665	22,2	10,80 \$
C-STIF-PHE	221	428	257	650	21,5	10,64 \$
C-STIF-VHE	221	436	257	658	21,9	10,72 \$
C-STIF-PLE	221	437	257	658	21,9	10,72 \$
C-STIF-VLE	221	444	257	665	22,2	10,80 \$
C-STIM-PHG	221	426	257	647	21,4	10,61 \$
C-STIM-VHG	221	428	257	649	21,5	10,63 \$
C-STIM-PLG	221	428	257	649	21,5	10,63 \$
C-STIM-VLG	221	430	257	651	21,6	10,66 \$
C-STIM-PHE	221	426	257	647	21,4	10,61 \$
C-STIM-VHE	221	428	257	649	21,5	10,63 \$
C-STIM-PLE	221	428	257	649	21,5	10,63 \$
C-STIM-VLE	221	430	257	651	21,6	10,66 \$
C-STIE-PHG	221	426	257	647	21,4	10,61 \$
C-STIE-VHG	221	427	257	648	21,4	10,62 \$
C-STIE-PLG	221	427	257	648	21,4	10,62 \$
C-STIE-VLG	221	428	257	649	21,5	10,63 \$
C-STIE-PHE	221	426	257	647	21,4	10,61 \$
C-STIE-VHE	221	427	257	648	21,4	10,62 \$
C-STIE-PLE	221	427	257	648	21,4	10,62 \$
C-STIE-VLE	221	428	257	649	21,5	10,63 \$

Tableau 3 – Résultats des simulations : Sommaire annuel détaillé du bâtiment avec serre froide (laitue) intégrée au toit

Scénario	Consommation électrique totale (MJ/m ²)	Consommation gaz naturel totale (MJ/m ²)	Consommation énergétique totale (MJ/m ²)	Puissance instantanée – Maximum (kW)	Émissions de gaz à effet de serre – Total (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques – Total (\$/m ²)
F-STIF-PHG	221	443	257	665	22,2	10,80 \$
F-STIF-VHG	221	450	257	671	22,6	10,86 \$
F-STIF-PLG	221	446	257	667	22,4	10,82 \$
F-STIF-VLG	221	452	257	673	22,7	10,89 \$
F-STIF-PHE	221	443	257	665	22,2	10,80 \$
F-STIF-VHE	221	450	257	671	22,6	10,86 \$
F-STIF-PLE	221	446	257	667	22,4	10,82 \$
F-STIF-VLE	221	452	257	673	22,7	10,89 \$
F-STIM-PHG	221	431	257	652	21,6	10,66 \$
F-STIM-VHG	221	432	257	654	21,7	10,68 \$
F-STIM-PLG	221	432	257	653	21,6	10,67 \$
F-STIM-VLG	221	433	257	654	21,7	10,69 \$
F-STIM-PHE	221	431	257	652	21,6	10,66 \$
F-STIM-VHE	221	432	257	654	21,7	10,68 \$
F-STIM-PLE	221	432	257	653	21,6	10,67 \$
F-STIM-VLE	221	433	257	654	21,7	10,69 \$
F-STIE-PHG	221	429	257	650	21,5	10,64 \$
F-STIE-VHG	221	429	257	650	21,5	10,65 \$
F-STIE-PLG	221	429	257	650	21,5	10,64 \$
F-STIE-VLG	221	430	257	651	21,5	10,65 \$
F-STIE-PHE	221	429	257	650	21,5	10,64 \$
F-STIE-VHE	221	429	257	650	21,5	10,65 \$
F-STIE-PLE	221	429	257	650	21,5	10,64 \$
F-STIE-VLE	221	430	257	651	21,5	10,65 \$

Tableau 4 – Résultats des simulations : Sommaire annuel détaillé de la serre chaude (tomate)

Scénario	Consommation électricité (MJ/m ²)				Consommation gaz naturel (MJ/m ²)	Énergie (MJ/m ²)	Puissance instantanée (kW)	Émissions de gaz à effet de serre (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	
	De base	Éclairage	Chauffage	Total	Chauffage	Total	Maximum	Total	Total - Option 1	Total - Option 2
C-SS-PHG (référence)	26	1300	0	1326	2130	3456	336	107,0	61,2 \$	43,07 \$
C-SS-VHG	26	1175	0	1201	2848	4050	336	142,7	67,0 \$	48,71 \$
C-SS-PLG	26	655	0	681	2443	3124	171	122,2	45,6 \$	36,36 \$
C-SS-VLG	26	592	0	618	3102	3720	171	155,0	51,6 \$	42,34 \$
C-SS-PHE	26	1300	1704	3030	0	3030	1475	1,7	104,6 \$	47,05 \$
C-SS-VHE	26	1175	2279	3480	0	3480	1502	2,0	112,5 \$	54,04 \$
C-SS-PLE	26	655	1954	2636	0	2636	1336	1,5	94,2 \$	40,92 \$
C-SS-VLE	26	592	2481	3100	0	3100	1336	1,8	101,2 \$	48,13 \$
C-STIF-PHG	26	1281	0	1307	1815	3122	336	91,2	57,6 \$	39,45 \$
C-STIF-VHG	26	1155	0	1181	2602	3783	336	130,4	64,2 \$	45,80 \$
C-STIF-PLG	26	646	0	672	2158	2830	171	108,0	42,4 \$	33,21 \$
C-STIF-VLG	26	582	0	608	2885	3493	171	144,2	49,2 \$	39,89 \$
C-STIF-PHE	26	1281	1452	2759	0	2759	1386	1,6	96,2 \$	42,84 \$
C-STIF-VHE	26	1155	2081	3262	0	3262	1493	1,8	108,1 \$	50,66 \$
C-STIF-PLE	26	646	1727	2398	0	2398	1293	1,4	88,0 \$	37,24 \$
C-STIF-VLE	26	582	2308	2916	0	2916	1340	1,7	97,9 \$	45,28 \$
C-STIM-PHG	26	1281	0	1307	1773	3081	336	89,2	57,2 \$	39,02 \$
C-STIM-VHG	26	1155	0	1181	2569	3750	336	128,8	63,8 \$	45,45 \$
C-STIM-PLG	26	646	0	672	2131	2803	171	106,7	42,1 \$	32,93 \$
C-STIM-VLG	26	582	0	608	2868	3476	171	143,3	49,0 \$	39,71 \$
C-STIM-PHE	26	1281	1419	2726	0	2726	1369	1,5	95,0 \$	42,33 \$
C-STIM-VHE	26	1155	2055	3236	0	3236	1490	1,8	107,4 \$	50,25 \$
C-STIM-PLE	26	646	1705	2377	0	2377	1289	1,3	87,3 \$	36,91 \$
C-STIM-VLE	26	582	2294	2902	0	2902	1343	1,6	97,6 \$	45,06 \$
C-STIE-PHG	26	1281	0	1307	1766	3074	336	88,8	57,1 \$	38,94 \$
C-STIE-VHG	26	1155	0	1181	2564	3745	336	128,5	63,8 \$	45,40 \$
C-STIE-PLG	26	646	0	672	2128	2800	171	106,5	42,1 \$	32,89 \$
C-STIE-VLG	26	582	0	608	2865	3473	171	143,2	49,0 \$	39,68 \$
C-STIE-PHE	26	1281	1413	2720	0	2720	1366	1,5	94,8 \$	42,24 \$
C-STIE-VHE	26	1155	2051	3232	0	3232	1489	1,8	107,2 \$	50,18 \$
C-STIE-PLE	26	646	1702	2374	0	2374	1288	1,3	87,2 \$	36,87 \$
C-STIE-VLE	26	582	2292	2900	0	2900	1344	1,6	97,6 \$	45,03 \$

Tableau 5 – Résultats des simulations : Sommaire annuel détaillé de la serre froide (laitue)

Scénario	Consommation électricité (MJ/m ²)				Consommation gaz naturel (MJ/m ²)	Énergie (MJ/m ²)	Puissance instantanée (kW)	Émissions de gaz à effet de serre (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	
	De base	Éclairage	Chauffage	Total	Chauffage	Total	Maximum	Total	Total – Option 1	Total – Option 2
F-SS-PHG (référence)	26	335	0	361	2284	2645	114	114,1	35,81 \$	29,72 \$
F-SS-VHG	26	289	0	315	2860	3175	114	142,8	41,13 \$	35,08 \$
F-SS-PLG	26	168	0	194	2375	2570	59	118,5	31,21 \$	28,09 \$
F-SS-VLG	26	145	0	172	2927	3099	59	146,1	36,66 \$	33,56 \$
F-SS-PHE	26	335	1827	2189	0	2189	1278	1,2	85,78 \$	33,98 \$
F-SS-VHE	26	289	2288	2603	0	2603	1279	1,5	92,58 \$	40,42 \$
F-SS-PLE	26	168	1900	2095	0	2095	1224	1,2	82,60 \$	32,53 \$
F-SS-VLE	26	145	2342	2513	0	2513	1224	1,4	89,52 \$	39,03 \$
F-STIF-PHG	26	332	0	358	1997	2355	114	99,8	32,73 \$	26,63 \$
F-STIF-VHG	26	286	0	312	2637	2949	114	131,7	38,73 \$	32,67 \$
F-STIF-PLG	26	167	0	193	2102	2295	59	104,9	28,31 \$	25,18 \$
F-STIF-VLG	26	144	0	170	2715	2885	59	135,5	34,40 \$	31,30 \$
F-STIF-PHE	26	332	1597	1955	0	1955	1224	1,1	78,82 \$	30,36 \$
F-STIF-VHE	26	286	2109	2421	0	2421	1275	1,4	88,92 \$	37,60 \$
F-STIF-PLE	26	167	1682	1875	0	1875	1180	1,1	76,23 \$	29,11 \$
F-STIF-VLE	26	144	2172	2342	0	2342	1223	1,3	86,02 \$	36,37 \$
F-STIM-PHG	26	332	0	358	1991	2349	114	99,5	32,67 \$	26,58 \$
F-STIM-VHG	26	286	0	312	2639	2950	114	131,7	38,75 \$	32,69 \$
F-STIM-PLG	26	167	0	193	2104	2297	59	105,0	28,33 \$	25,20 \$
F-STIM-VLG	26	144	0	170	2722	2892	59	135,8	34,47 \$	31,36 \$
F-STIM-PHE	26	332	1593	1951	0	1951	1226	1,1	78,78 \$	30,30 \$
F-STIM-VHE	26	286	2111	2423	0	2423	1282	1,4	89,09 \$	37,62 \$
F-STIM-PLE	26	167	1683	1876	0	1876	1185	1,1	76,27 \$	29,13 \$
F-STIM-VLE	26	144	2177	2347	0	2347	1236	1,3	86,41 \$	36,45 \$
F-STIE-PHG	26	332	0	358	1991	2349	114	99,5	32,67 \$	26,57 \$
F-STIE-VHG	26	286	0	312	2640	2952	114	131,8	38,76 \$	32,70 \$
F-STIE-PLG	26	167	0	193	2104	2297	59	105,0	28,33 \$	25,21 \$
F-STIE-VLG	26	144	0	170	2724	2894	59	135,9	34,49 \$	31,39 \$
F-STIE-PHE	26	332	1593	1951	0	1951	1227	1,1	78,80 \$	30,29 \$
F-STIE-VHE	26	286	2112	2424	0	2424	1284	1,4	89,15 \$	37,63 \$
F-STIE-PLE	26	167	1683	1876	0	1876	1187	1,1	76,35 \$	29,14 \$
F-STIE-VLE	26	144	2179	2349	0	2349	1239	1,3	86,52 \$	36,48 \$

ANNEXE G

CLASSEMENTS DES SCÉNARIOS EN FONCTION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE, ÉMISSIONS DE
GAZ À EFFET DE SERRE ET COÛTS

Classements des scénarios en fonction de la consommation énergétique

Tableau 1 – Classement des scénarios en fonction de la consommation énergétique de la serre chaude (tomate)

Classement	Scénario	Consommation énergétique annuelle (MJ/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	C-STIE-PLE	2374	-31 %
2	C-STIM-PLE	2377	-31 %
3	C-STIF-PLE	2398	-31 %
4	C-SS-PLE	2636	-24 %
5	C-STIE-PHE	2720	-21 %
6	C-STIM-PHE	2726	-21 %
7	C-STIF-PHE	2759	-20 %
8	C-STIE-PLG	2800	-19 %
9	C-STIM-PLG	2803	-19 %
10	C-STIF-PLG	2830	-18 %
11	C-STIE-VLE	2900	-16 %
12	C-STIM-VLE	2902	-16 %
13	C-STIF-VLE	2916	-16 %
14	C-SS-PHE	3030	-12 %
15	C-STIE-PHG	3074	-11 %
16	C-STIM-PHG	3081	-11 %
17	C-SS-VLE	3100	-10 %
18	C-STIF-PHG	3122	-10 %
19	C-SS-PLG	3124	-10 %
20	C-STIE-VHE	3232	-6 %
21	C-STIM-VHE	3236	-6 %
22	C-STIF-VHE	3262	-6 %
23	C-SS-PHG (référence)	3456	0 %
24	C-STIE-VLG	3473	0 %
25	C-STIM-VLG	3476	1 %
26	C-SS-VHE	3480	1 %
27	C-STIF-VLG	3493	1 %
28	C-SS-VLG	3720	8 %
29	C-STIE-VHG	3745	8 %
30	C-STIM-VHG	3750	8 %
31	C-STIF-VHG	3783	9 %
32	C-SS-VHG	4050	17 %

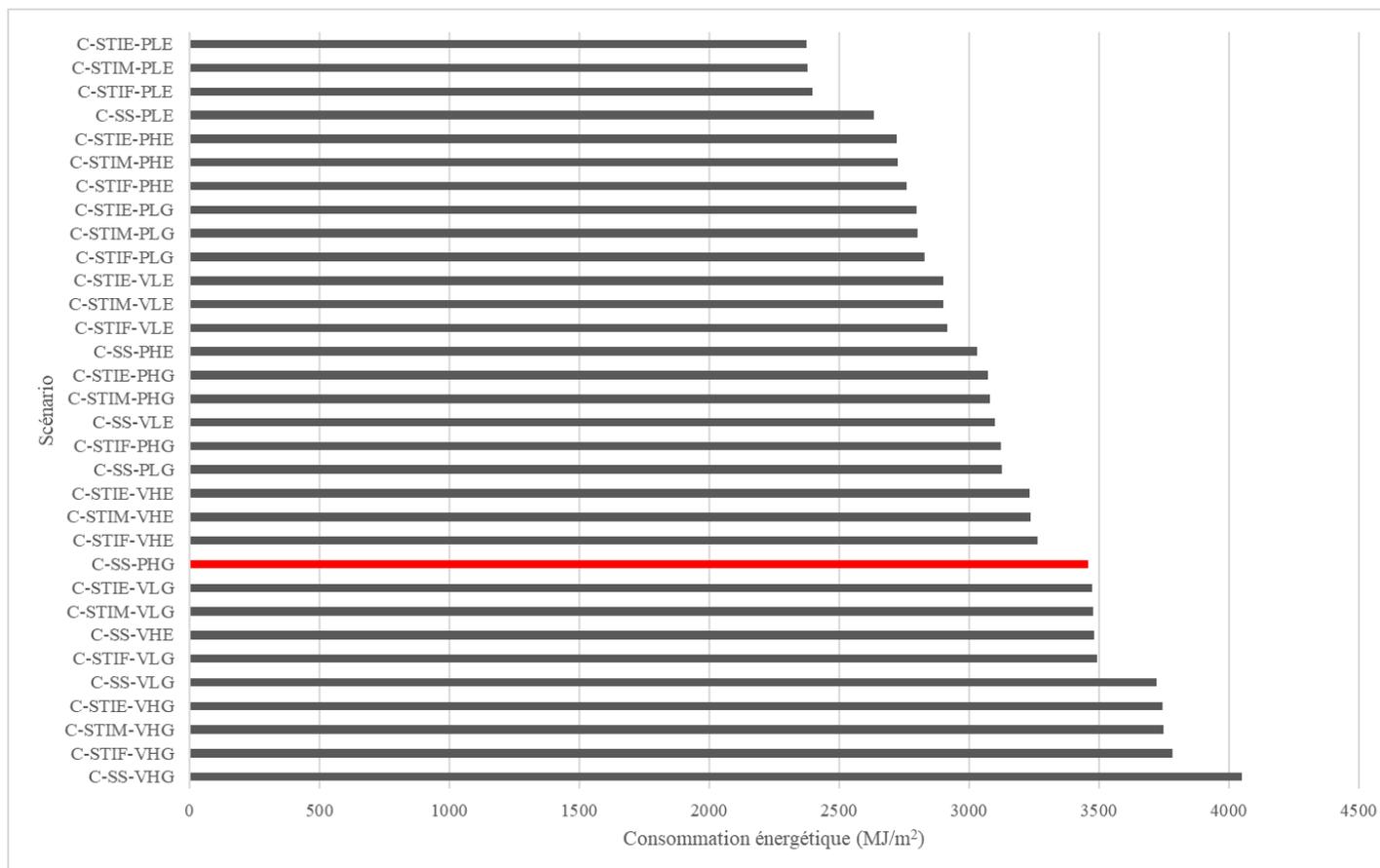


Figure 1 – Classement des scénarios en fonction de la consommation énergétique de la serre chaude (tomate)

Tableau 2 – Classement des scénarios en fonction de la consommation énergétique de la serre froide (laitue)

Classement	Scénario	Consommation énergétique annuelle (MJ/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	F-STIF-PLE	1875	-29 %
2	F-STIM-PLE	1876	-29 %
3	F-STIE-PLE	1876	-29 %
4	F-STIE-PHE	1951	-26 %
5	F-STIM-PHE	1951	-26 %
6	F-STIF-PHE	1955	-26 %
7	F-SS-PLE	2095	-21 %
8	F-SS-PHE	2189	-17 %
9	F-STIF-PLG	2295	-13 %
10	F-STIM-PLG	2297	-13 %
11	F-STIE-PLG	2297	-13 %
12	F-STIF-VLE	2342	-11 %
13	F-STIM-VLE	2347	-11 %
14	F-STIE-PHG	2349	-11 %
15	F-STIE-VLE	2349	-11 %
16	F-STIM-PHG	2349	-11 %
17	F-STIF-PHG	2355	-11 %
18	F-STIF-VHE	2421	-8 %
19	F-STIM-VHE	2423	-8 %
20	F-STIE-VHE	2424	-8 %
21	F-SS-VLE	2513	-5 %
22	F-SS-PLG	2570	-3 %
23	F-SS-VHE	2603	-2 %
24	F-SS-PHG (référence)	2645	0 %
25	F-STIF-VLG	2885	9 %
26	F-STIM-VLG	2892	9 %
27	F-STIE-VLG	2894	9 %
28	F-STIF-VHG	2949	11 %
29	F-STIM-VHG	2950	12 %
30	F-STIE-VHG	2952	12 %
31	F-SS-VLG	3099	17 %
32	F-SS-VHG	3175	20 %

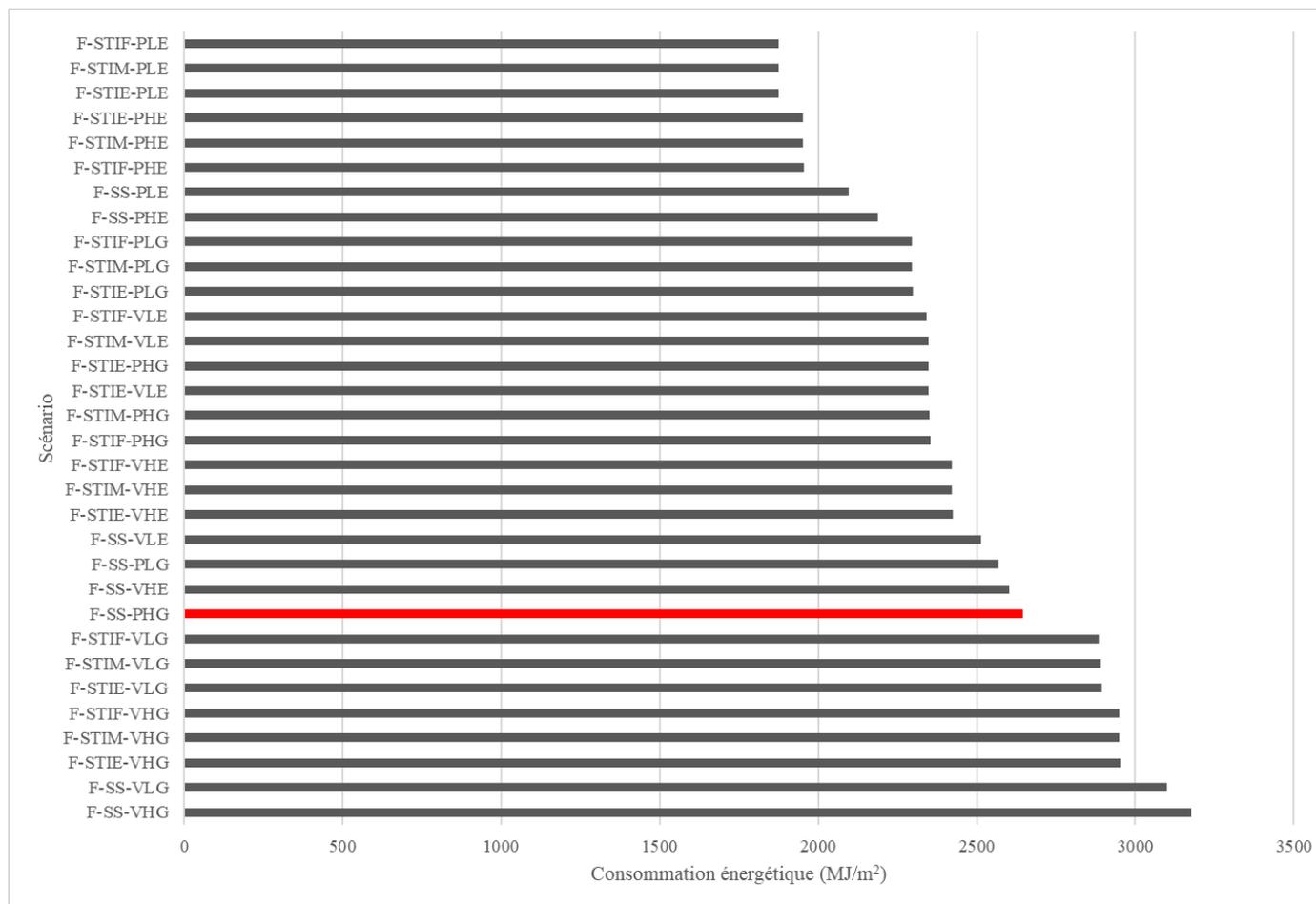


Figure 2 – Classement des scénarios en fonction de la consommation énergétique de la serre froide (laitue)

Tableau 3 – Classement des scénarios en fonction de la consommation énergétique du bâtiment avec une serre chaude (tomate) intégrée au toit

Classement	Scénario	Consommation énergétique annuelle (MJ/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	C-STIM-PHG	647	-15 %
2	C-STIM-PHE	647	-15 %
3	C-STIE-PHG	647	-15 %
4	C-STIE-PHE	647	-15 %
5	C-STIE-VHG	648	-15 %
6	C-STIE-VHE	648	-15 %
7	C-STIE-PLG	648	-15 %
8	C-STIE-PLE	648	-15 %
9	C-STIM-VHG	649	-15 %
10	C-STIM-VHE	649	-15 %
11	C-STIE-VLG	649	-15 %
12	C-STIE-VLE	649	-15 %
13	C-STIM-PLG	649	-14 %
14	C-STIM-PLE	649	-14 %
15	C-STIF-PHG	650	-14 %
16	C-STIF-PHE	650	-14 %
17	C-STIM-VLG	651	-14 %
18	C-STIM-VLE	651	-14 %
19	BIE	655	-14 %
20	C-STIF-VHG	658	-13 %
21	C-STIF-VHE	658	-13 %
22	C-STIF-PLG	658	-13 %
23	C-STIF-PLE	658	-13 %
24	C-STIF-VLG	665	-12 %
25	C-STIF-VLE	665	-12 %
26	BIM	671	-12 %
27	BIF (référence)	759	0 %

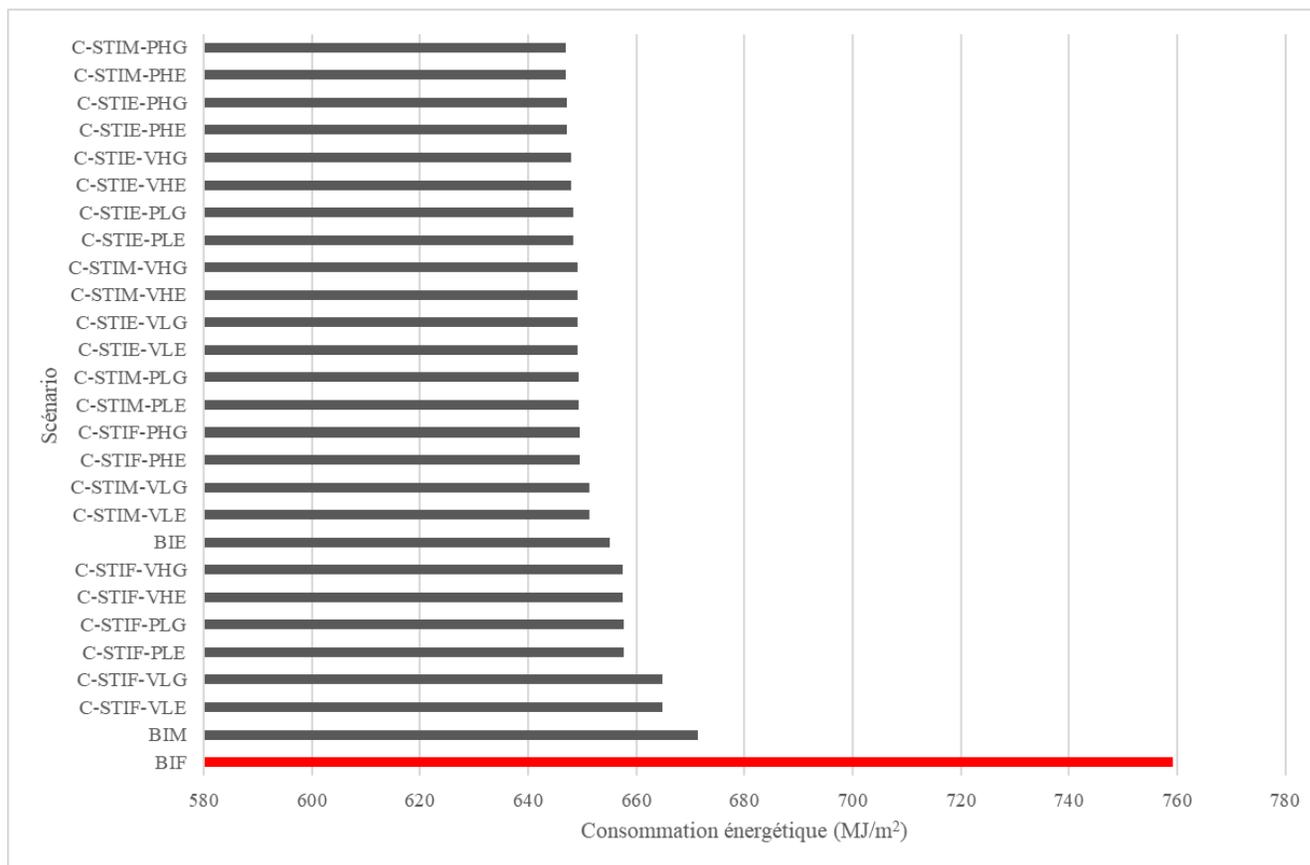


Figure 3 – Classement de performances des scénarios en fonction de la consommation énergétique du bâtiment avec une serre chaude (tomate) intégrée au toit

Tableau 4 – Classement des scénarios en fonction de la consommation énergétique du bâtiment avec une serre froide (laitue) intégrée au toit

Classement	Scénario	Consommation énergétique annuelle (MJ/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	F-STIE-PHG	650	-14 %
2	F-STIE-PHE	650	-14 %
3	F-STIE-PLG	650	-14 %
4	F-STIE-PLE	650	-14 %
5	F-STIE-VHG	650	-14 %
6	F-STIE-VHE	650	-14 %
7	F-STIE-VLG	651	-14 %
8	F-STIE-VLE	651	-14 %
9	F-STIM-PHG	652	-14 %
10	F-STIM-PHE	652	-14 %
11	F-STIM-PLG	653	-14 %
12	F-STIM-PLE	653	-14 %
13	F-STIM-VHG	654	-14 %
14	F-STIM-VHE	654	-14 %
15	F-STIM-VLG	654	-14 %
16	F-STIM-VLE	654	-14 %
17	BIE	655	-14 %
18	F-STIF-PHG	665	-12 %
19	F-STIF-PHE	665	-12 %
20	F-STIF-PLG	667	-12 %
21	F-STIF-PLE	667	-12 %
22	F-STIF-VHG	671	-12 %
23	F-STIF-VHE	671	-12 %
24	BIM	671	-12 %
25	F-STIF-VLG	673	-11 %
26	F-STIF-VLE	673	-11 %
27	BIF (référence)	759	0 %

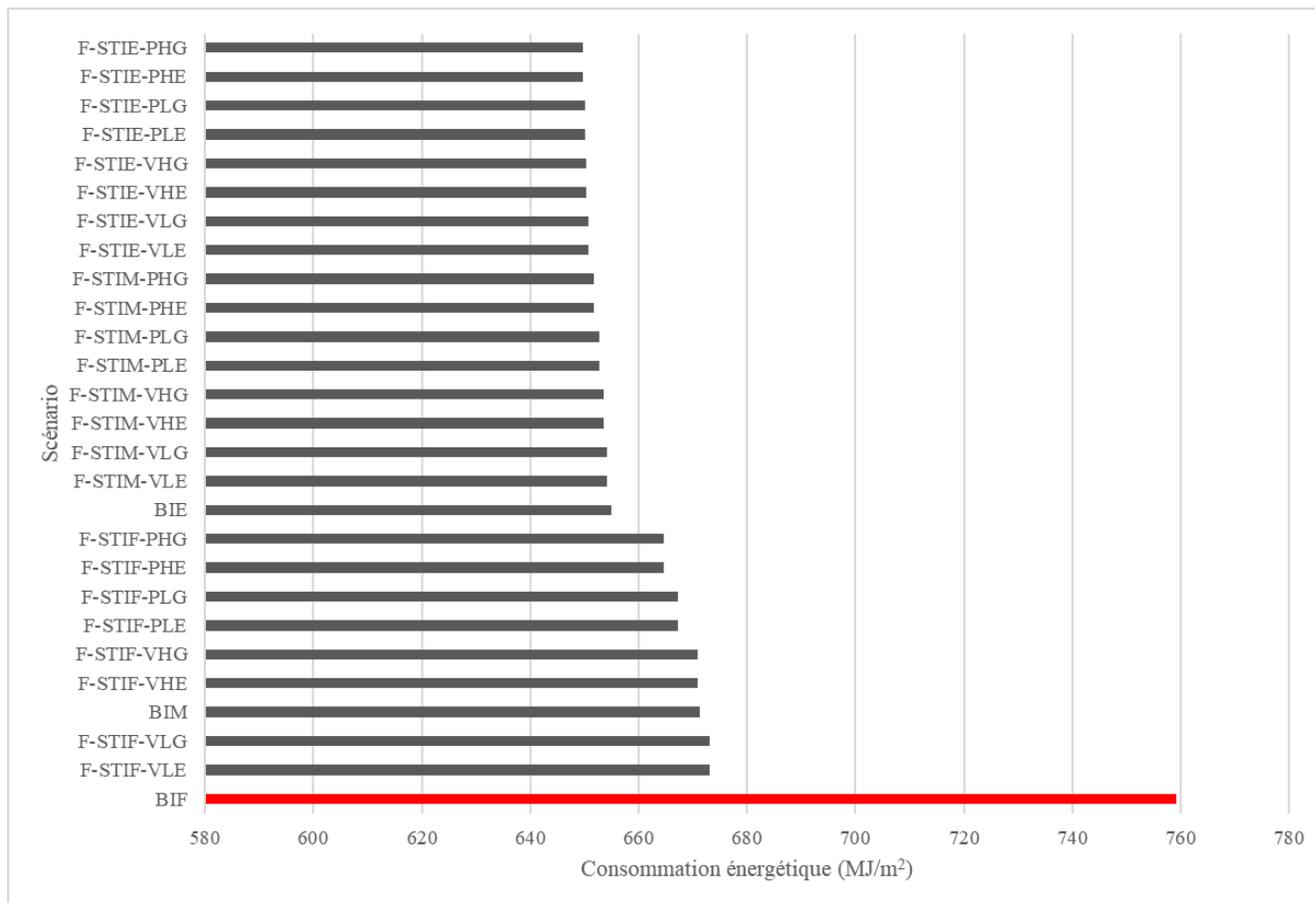


Figure 4 – Classement des scénarios en fonction de la consommation énergétique du bâtiment avec une serre chaude (tomate) intégrée au toit

Classements des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre

Tableau 5 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre de la serre chaude (tomate)

Classement	Scénario	Émissions de GES annuelles (kg CO ₂ eq/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	C-STIE-PLE	1,3	-99 %
2	C-STIM-PLE	1,3	-99 %
3	C-STIF-PLE	1,4	-99 %
4	C-SS-PLE	1,5	-99 %
5	C-STIE-PHE	1,5	-99 %
6	C-STIM-PHE	1,5	-99 %
7	C-STIF-PHE	1,6	-99 %
8	C-STIE-VLE	1,6	-98 %
9	C-STIM-VLE	1,6	-98 %
10	C-STIF-VLE	1,7	-98 %
11	C-SS-PHE	1,7	-98 %
12	C-SS-VLE	1,8	-98 %
13	C-STIE-VHE	1,8	-98 %
14	C-STIM-VHE	1,8	-98 %
15	C-STIF-VHE	1,8	-98 %
16	C-SS-VHE	2,0	-98 %
17	C-STIE-PHG	88,8	-17 %
18	C-STIM-PHG	89,2	-17 %
19	C-STIF-PHG	91,2	-15 %
20	C-STIE-PLG	106,5	0 %
21	C-STIM-PLG	106,7	0 %
22 (référence)	C-SS-PHG	107,0	0 %
23	C-STIF-PLG	108,0	1 %
24	C-SS-PLG	122,2	14 %
25	C-STIE-VHG	128,5	20 %
26	C-STIM-VHG	128,8	20 %
27	C-STIF-VHG	130,4	22 %
28	C-SS-VHG	142,7	33 %
29	C-STIE-VLG	143,2	34 %
30	C-STIM-VLG	143,3	34 %
31	C-STIF-VLG	144,2	35 %
32	C-SS-VLG	155,0	45 %

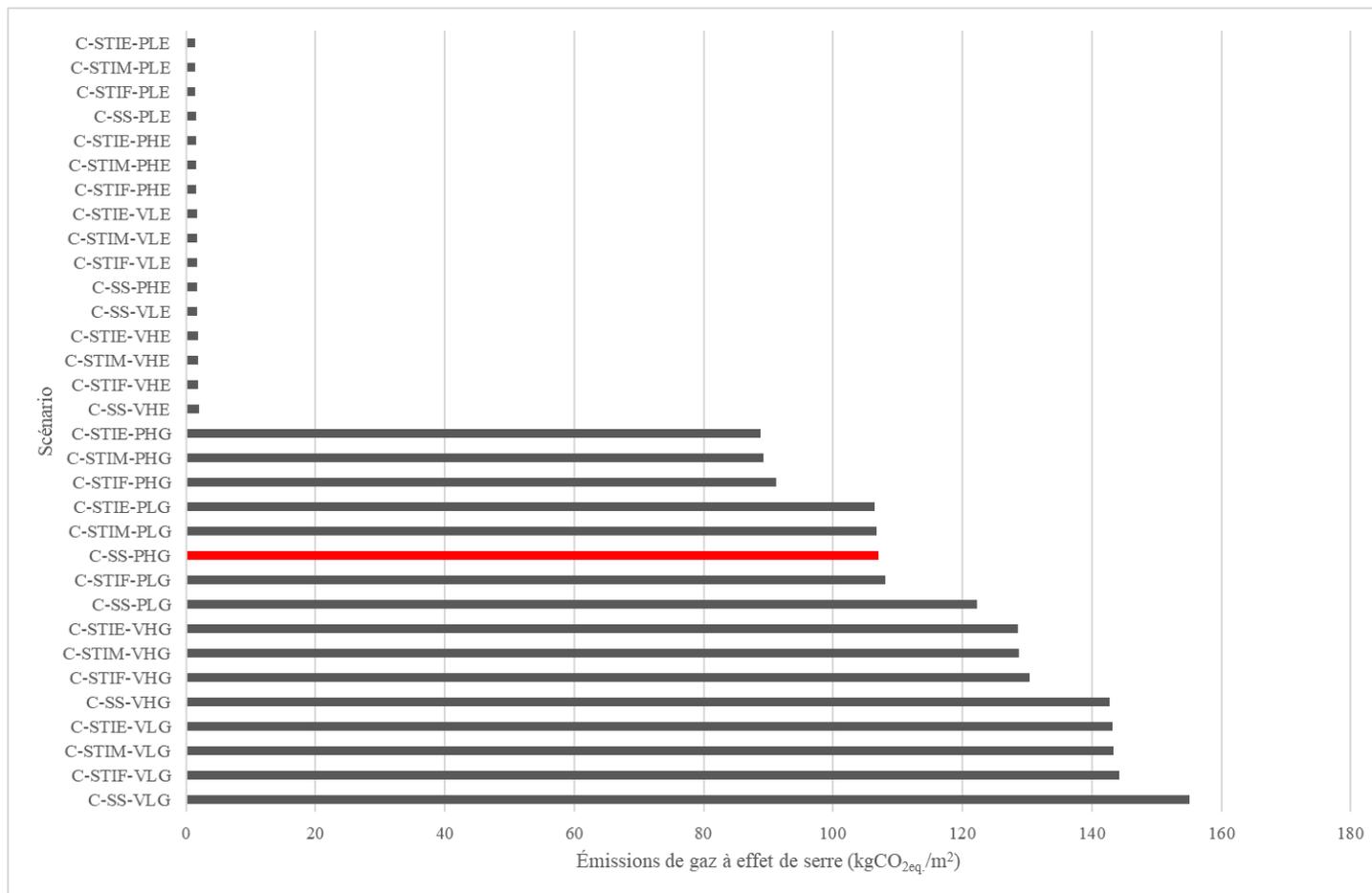


Figure 5 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre de la serre chaude (tomate)

Tableau 6 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre de la serre froide (laitue)

Classement	Scénario	Émissions de GES annuelles (kg CO _{2éq} /m ²)	Différence avec scénario de référence
1	F-STIF-PLE	1,1	-99 %
2	F-STIM-PLE	1,1	-99 %
3	F-STIE-PLE	1,1	-99 %
4	F-STIE-PHE	1,1	-99 %
5	F-STIM-PHE	1,1	-99 %
6	F-STIF-PHE	1,1	-99 %
7	F-SS-PLE	1,2	-99 %
8	F-SS-PHE	1,2	-99 %
9	F-STIF-VLE	1,3	-99 %
10	F-STIM-VLE	1,3	-99 %
11	F-STIE-VLE	1,3	-99 %
12	F-STIF-VHE	1,4	-99 %
13	F-STIM-VHE	1,4	-99 %
14	F-STIE-VHE	1,4	-99 %
15	F-SS-VLE	1,4	-99 %
16	F-SS-VHE	1,5	-99 %
17	F-STIE-PHG	99,5	-13 %
18	F-STIM-PHG	99,5	-13 %
19	F-STIF-PHG	99,8	-13 %
20	F-STIF-PLG	104,9	-8 %
21	F-STIM-PLG	105,0	-8 %
22	F-STIE-PLG	105,0	-8 %
23	F-SS-PHG (référence)	114,1	0 %
24	F-SS-PLG	118,5	4 %
25	F-STIF-VHG	131,7	15 %
26	F-STIM-VHG	131,7	15 %
27	F-STIE-VHG	131,8	16 %
28	F-STIF-VLG	135,5	19 %
29	F-STIM-VLG	135,8	19 %
30	F-STIE-VLG	135,9	19 %
31	F-SS-VHG	142,8	25 %
32	F-SS-VLG	146,1	28 %

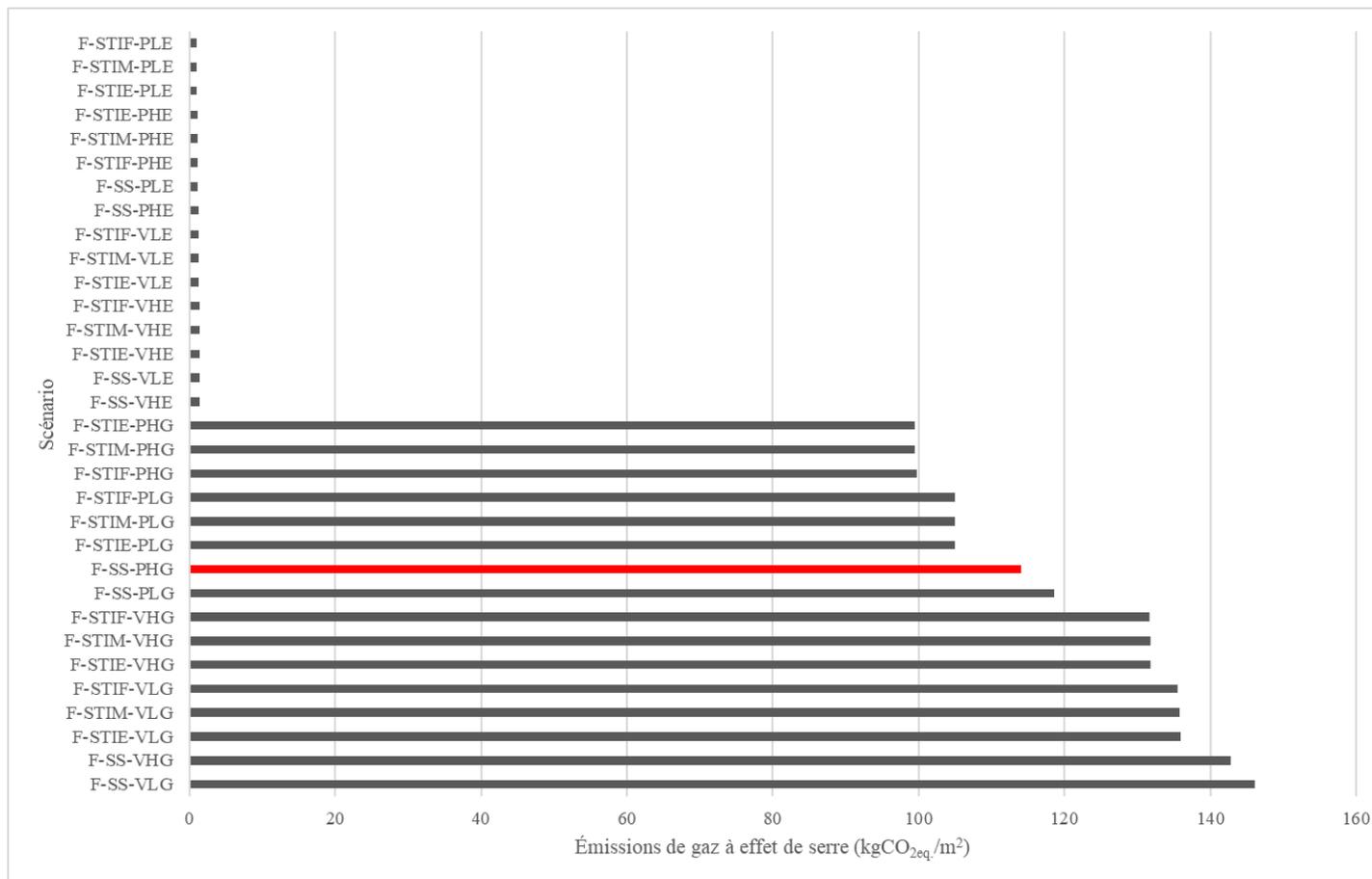


Figure 6 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre de la serre froide (laitue)

Tableau 7 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment avec une serre chaude (tomate) intégrée au toit

Classement	Scénario	Émissions de GES annuelles (kg CO _{2eq} /m ²)	Différence avec scénario de référence
1	C-STIM-PHG	21.4	-21 %
2	C-STIM-PHE	21.4	-21 %
3	C-STIE-PHG	21.4	-21 %
4	C-STIE-PHE	21.4	-21 %
5	C-STIE-VHG	21.4	-21 %
6	C-STIE-VHE	21.4	-21 %
7	C-STIE-PLG	21.4	-20 %
8	C-STIE-PLE	21.4	-20 %
9	C-STIM-VHG	21.5	-20 %
10	C-STIM-VHE	21.5	-20 %
11	C-STIE-VLG	21.5	-20 %
12	C-STIE-VLE	21.5	-20 %
13	C-STIM-PLG	21.5	-20 %
14	C-STIM-PLE	21.5	-20 %
15	C-STIF-PHG	21.5	-20 %
16	C-STIF-PHE	21.5	-20 %
17	C-STIM-VLG	21.6	-20 %
18	C-STIM-VLE	21.6	-20 %
19	BIE	21.8	-19 %
20	C-STIF-VHG	21.9	-19 %
21	C-STIF-VHE	21.9	-19 %
22	C-STIF-PLG	21.9	-19 %
23	C-STIF-PLE	21.9	-19 %
24	C-STIF-VLG	22.2	-17 %
25	C-STIF-VLE	22.2	-17 %
26	BIM	22.6	-16 %
27	BIF (référence)	26.9	0 %

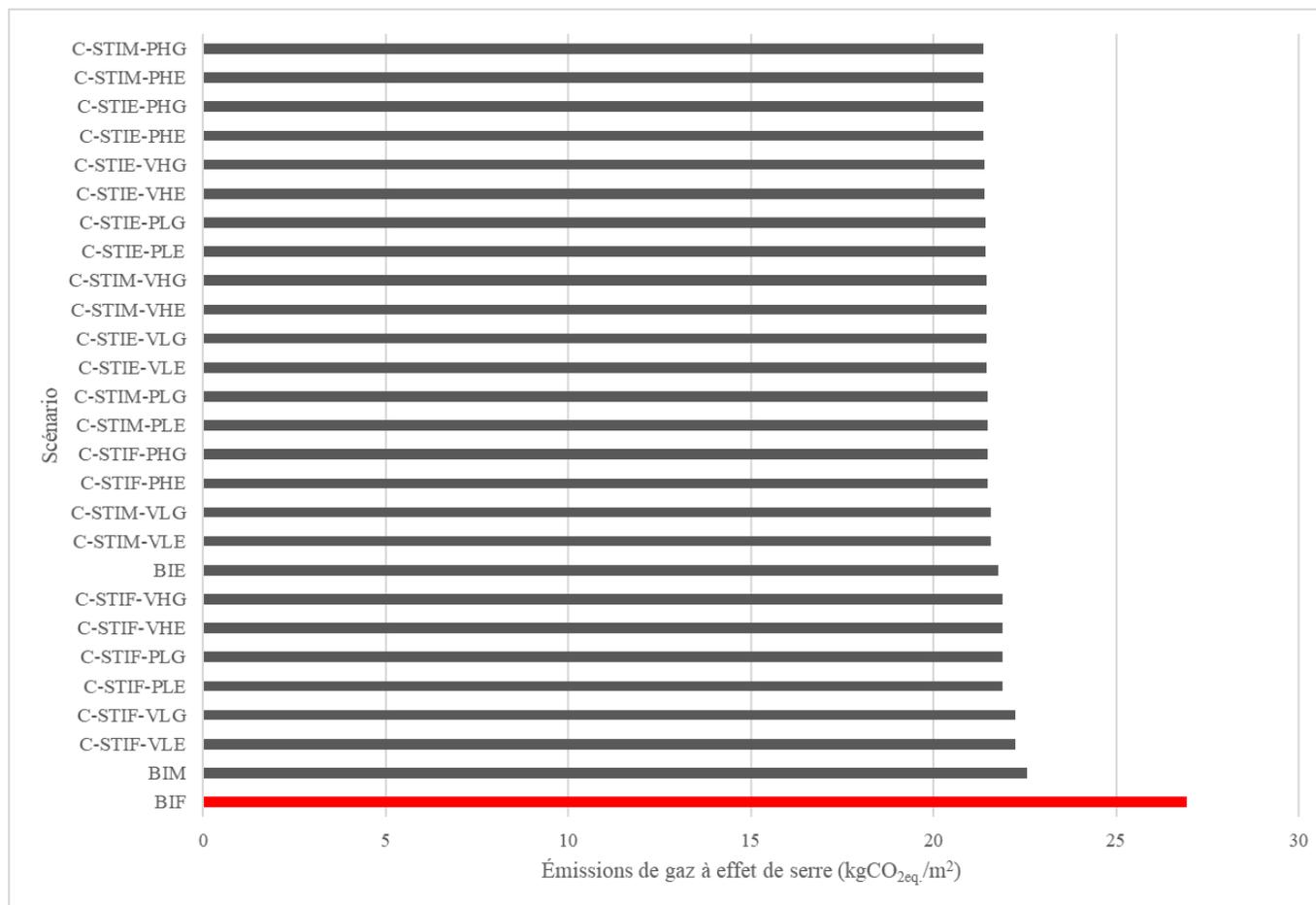


Figure 7 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment avec une serre chaude (tomate) intégrée au toit

Tableau 8 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment avec une serre froide (laitue) intégrée au toit

Classement	Scénario	Émissions de GES annuelles (kg CO ₂ eq/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	F-STIE-PHG	21,5	-20 %
2	F-STIE-PHE	21,5	-20 %
3	F-STIE-PLG	21,5	-20 %
4	F-STIE-PLE	21,5	-20 %
5	F-STIE-VHG	21,5	-20 %
6	F-STIE-VHE	21,5	-20 %
7	F-STIE-VLG	21,5	-20 %
8	F-STIE-VLE	21,5	-20 %
9	F-STIM-PHG	21,6	-20 %
10	F-STIM-PHE	21,6	-20 %
11	F-STIM-PLG	21,6	-20 %
12	F-STIM-PLE	21,6	-20 %
13	F-STIM-VHG	21,7	-20 %
14	F-STIM-VHE	21,7	-20 %
15	F-STIM-VLG	21,7	-19 %
16	F-STIM-VLE	21,7	-19 %
17	BIE	21,8	-19 %
18	F-STIF-PHG	22,2	-17 %
19	F-STIF-PHE	22,2	-17 %
20	F-STIF-PLG	22,4	-17 %
21	F-STIF-PLE	22,4	-17 %
22	F-STIF-VHG	22,6	-16 %
23	F-STIF-VHE	22,6	-16 %
24	BIM	22,6	-16 %
25	F-STIF-VLG	22,7	-16 %
26	F-STIF-VLE	22,7	-16 %
27	BIF (référence)	26,9	0 %

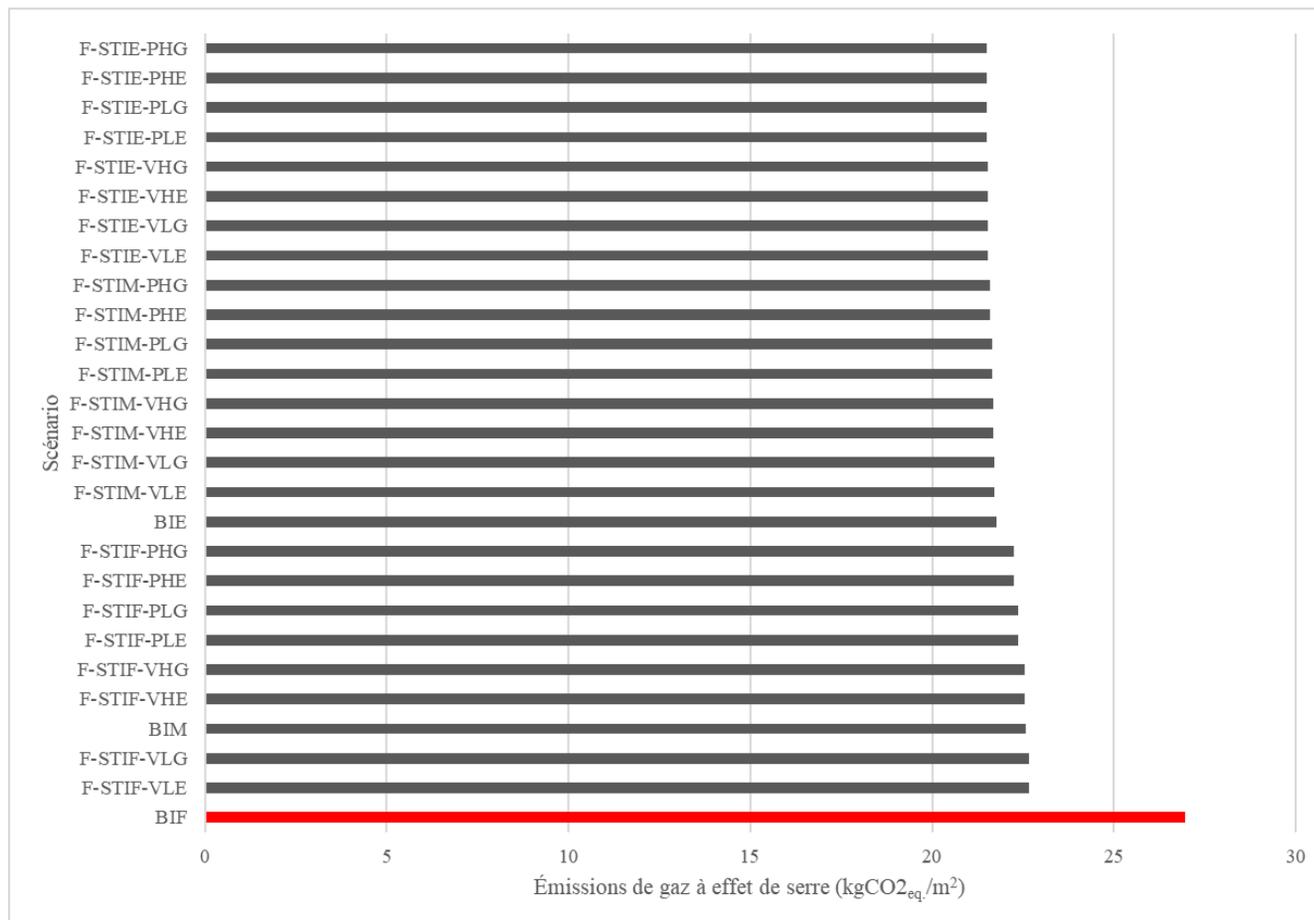


Figure 8 – Classement des scénarios en fonction des émissions de gaz à effet de serre du bâtiment avec une serre froide (laitue) intégrée au toit

Classements des scénarios en fonction des émissions des coûts énergétiques

Tableau 9 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques de la serre chaude (tomate)

Classement	Scénario	Coûts annuels (\$/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	C-STIE-PLG	32,89 \$	-24 %
2	C-STIM-PLG	32,93 \$	-24 %
3	C-STIF-PLG	33,21 \$	-23 %
4	C-SS-PLG	36,36 \$	-16 %
5	C-STIE-PLE	36,87 \$	-14 %
6	C-STIM-PLE	36,91 \$	-14 %
7	C-STIF-PLE	37,24 \$	-14 %
8	C-STIE-PHG	38,94 \$	-10 %
9	C-STIM-PHG	39,02 \$	-9 %
10	C-STIF-PHG	39,45 \$	-8 %
11	C-STIE-VLG	39,68 \$	-8 %
12	C-STIM-VLG	39,71 \$	-8 %
13	C-STIF-VLG	39,89 \$	-7 %
14	C-SS-PLE	40,92 \$	-5 %
15	C-STIE-PHE	42,24 \$	-2 %
16	C-STIM-PHE	42,33 \$	-2 %
17	C-SS-VLG	42,34 \$	-2 %
18	C-STIF-PHE	42,84 \$	-1 %
19	C-SS-PHG (référence)	43,07 \$	0 %
20	C-STIE-VLE	45,03 \$	5 %
21	C-STIM-VLE	45,06 \$	5 %
22	C-STIF-VLE	45,28 \$	5 %
23	C-STIE-VHG	45,40 \$	5 %
24	C-STIM-VHG	45,45 \$	6 %
25	C-STIF-VHG	45,80 \$	6 %
26	C-SS-PHE	47,05 \$	9 %
27	C-SS-VLE	48,13 \$	12 %
28	C-SS-VHG	48,71 \$	13 %
29	C-STIE-VHE	50,18 \$	17 %
30	C-STIM-VHE	50,25 \$	17 %
31	C-STIF-VHE	50,66 \$	18 %
32	C-SS-VHE	54,04 \$	25 %

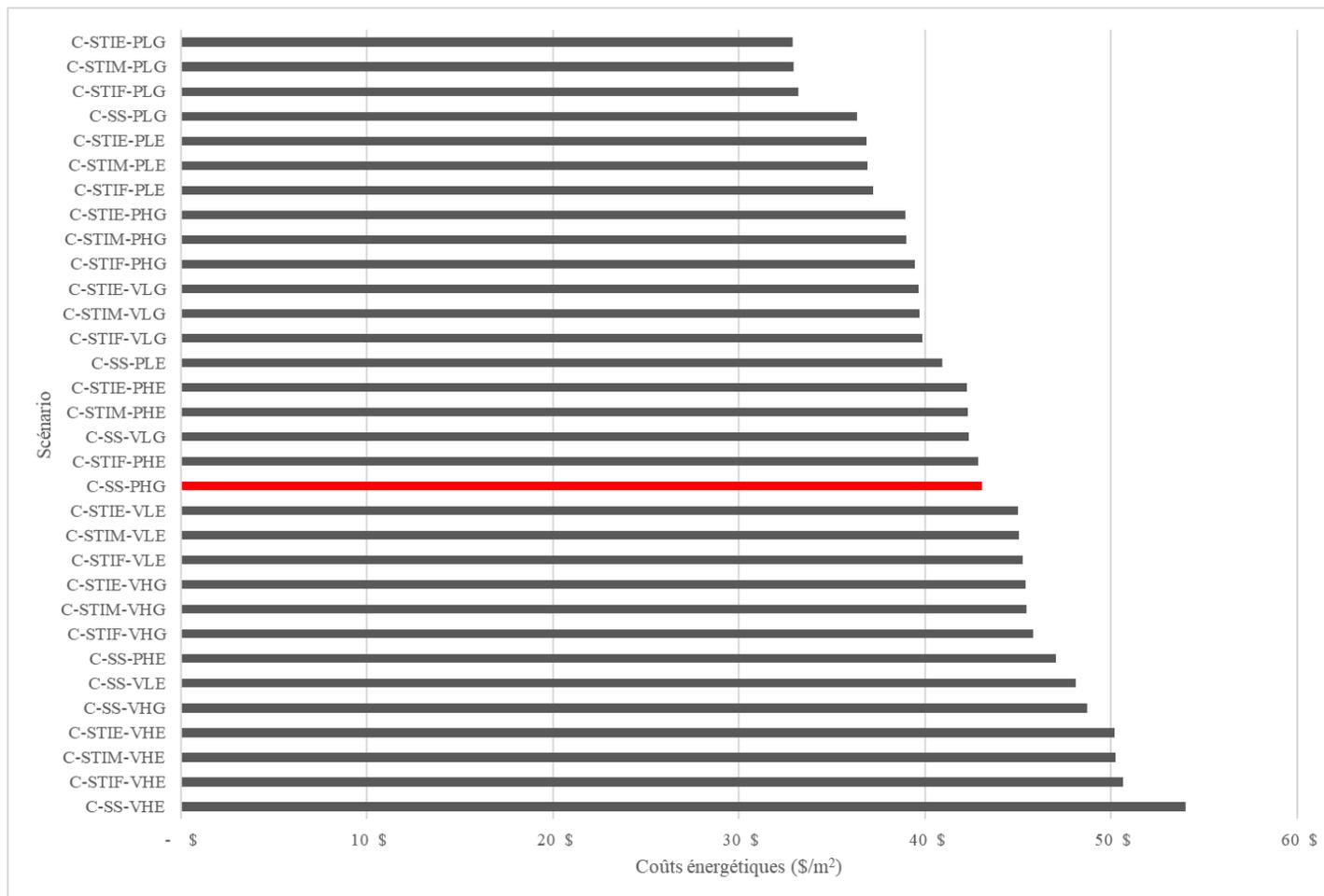


Figure 9 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques de la serre chaude (tomate)

Tableau 10 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques de la serre froide (laitue)

Classement	Scénario	Coûts annuels (\$/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	F-STIF-PLG	25,18 \$	-15 %
2	F-STIM-PLG	25,20 \$	-15 %
3	F-STIE-PLG	25,21 \$	-15 %
4	F-STIE-PHG	26,57 \$	-11 %
5	F-STIM-PHG	26,58 \$	-11 %
6	F-STIF-PHG	26,63 \$	-10 %
7	F-SS-PLG	28,09 \$	-5 %
8	F-STIF-PLE	29,11 \$	-2 %
9	F-STIM-PLE	29,13 \$	-2 %
10	F-STIE-PLE	29,14 \$	-2 %
11	F-SS-PHG (référence)	29,72 \$	0 %
12	F-STIE-PHE	30,29 \$	2 %
13	F-STIM-PHE	30,30 \$	2 %
14	F-STIF-PHE	30,36 \$	2 %
15	F-STIF-VLG	31,30 \$	5 %
16	F-STIM-VLG	31,36 \$	6 %
17	F-STIE-VLG	31,39 \$	6 %
18	F-SS-PLE	32,53 \$	9 %
19	F-STIF-VHG	32,67 \$	10 %
20	F-STIM-VHG	32,69 \$	10 %
21	F-STIE-VHG	32,70 \$	10 %
22	F-SS-VLG	33,56 \$	13 %
23	F-SS-PHE	33,98 \$	14 %
24	F-SS-VHG	35,08 \$	18 %
25	F-STIF-VLE	36,37 \$	22 %
26	F-STIM-VLE	36,45 \$	23 %
27	F-STIE-VLE	36,48 \$	23 %
28	F-STIF-VHE	37,60 \$	27 %
29	F-STIM-VHE	37,62 \$	27 %
30	F-STIE-VHE	37,63 \$	27 %
31	F-SS-VLE	39,03 \$	31 %
32	F-SS-VHE	40,42 \$	36 %

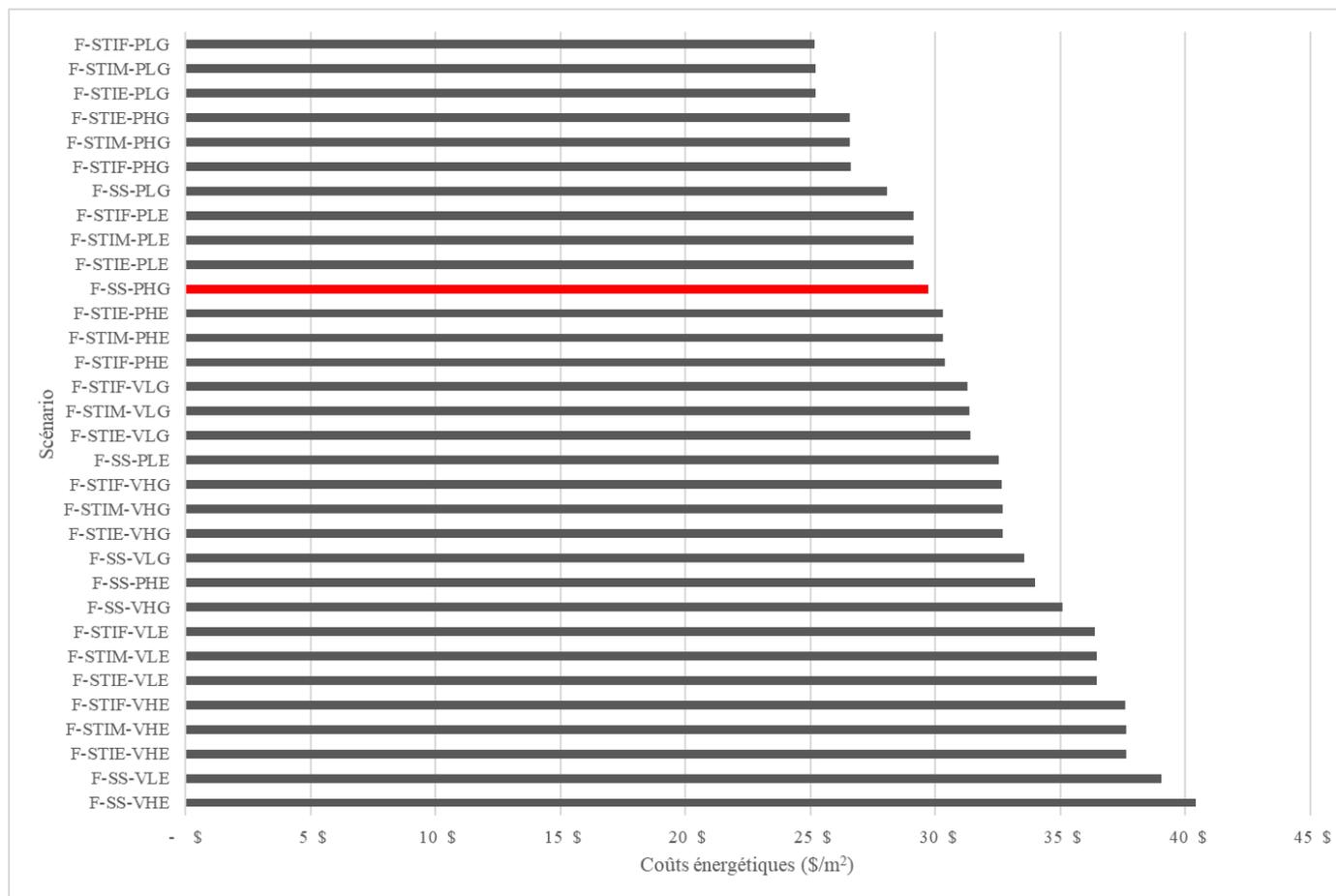


Figure 10 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques de la serre froide (laitue)

Tableau 11 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques du bâtiment avec une serre chaude (tomate) intégrée au toit

Classement	Scénario	Coûts annuels (\$/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	C-STIM-PHG	10,61 \$	-10 %
2	C-STIM-PHE	10,61 \$	-10 %
3	C-STIE-PHG	10,61 \$	-10 %
4	C-STIE-PHE	10,61 \$	-10 %
5	C-STIE-VHG	10,62 \$	-10 %
6	C-STIE-VHE	10,62 \$	-10 %
7	C-STIE-PLG	10,62 \$	-10 %
8	C-STIE-PLE	10,62 \$	-10 %
9	C-STIM-VHG	10,63 \$	-10 %
10	C-STIM-VHE	10,63 \$	-10 %
11	C-STIE-VLG	10,63 \$	-10 %
12	C-STIE-VLE	10,63 \$	-10 %
13	C-STIM-PLG	10,63 \$	-10 %
14	C-STIM-PLE	10,63 \$	-10 %
15	C-STIF-PHG	10,64 \$	-10 %
16	C-STIF-PHE	10,64 \$	-10 %
17	C-STIM-VLG	10,66 \$	-10 %
18	C-STIM-VLE	10,66 \$	-10 %
19	BIE	10,70 \$	-9 %
20	C-STIF-VHG	10,72 \$	-9 %
21	C-STIF-VHE	10,72 \$	-9 %
22	C-STIF-PLG	10,72 \$	-9 %
23	C-STIF-PLE	10,72 \$	-9 %
24	C-STIF-VLG	10,80 \$	-8 %
25	C-STIF-VLE	10,80 \$	-8 %
26	BIM	10,87 \$	-8 %
27	BIF (référence)	11,80 \$	0 %

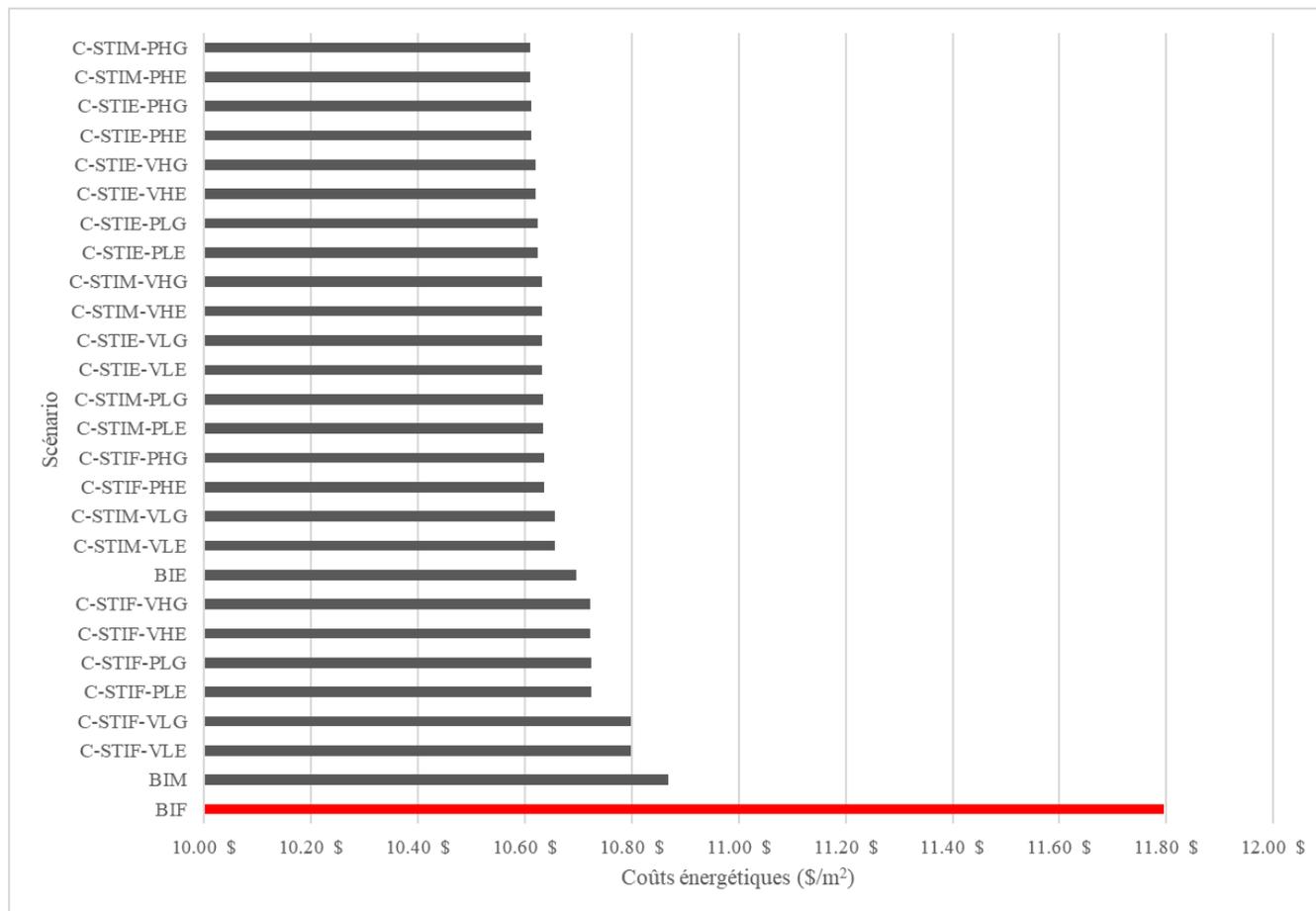


Figure 11 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques du bâtiment avec une serre chaude (tomate) intégrée au toit

Tableau 12 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques du bâtiment avec une serre froide (laitue) intégrée au toit

Classement	Scénario	Coûts annuels (\$/m ²)	Différence avec scénario de référence
1	F-STIE-PHG	10,64 \$	-10 %
2	F-STIE-PHE	10,64 \$	-10 %
3	F-STIE-PLG	10,64 \$	-10 %
4	F-STIE-PLE	10,64 \$	-10 %
5	F-STIE-VHG	10,65 \$	-10 %
6	F-STIE-VHE	10,65 \$	-10 %
7	F-STIE-VLG	10,65 \$	-10 %
8	F-STIE-VLE	10,65 \$	-10 %
9	F-STIM-PHG	10,66 \$	-10 %
10	F-STIM-PHE	10,66 \$	-10 %
11	F-STIM-PLG	10,67 \$	-10 %
12	F-STIM-PLE	10,67 \$	-10 %
13	F-STIM-VHG	10,68 \$	-9 %
14	F-STIM-VHE	10,68 \$	-9 %
15	F-STIM-VLG	10,69 \$	-9 %
16	F-STIM-VLE	10,69 \$	-9 %
17	BIE	10,70 \$	-9 %
18	F-STIF-PHG	10,80 \$	-8 %
19	F-STIF-PHE	10,80 \$	-8 %
20	F-STIF-PLG	10,82 \$	-8 %
21	F-STIF-PLE	10,82 \$	-8 %
22	F-STIF-VHG	10,86 \$	-8 %
23	F-STIF-VHE	10,86 \$	-8 %
24	BIM	10,87 \$	-8 %
25	F-STIF-VLG	10,89 \$	-8 %
26	F-STIF-VLE	10,89 \$	-8 %
27	BIF (référence)	11,80 \$	0 %

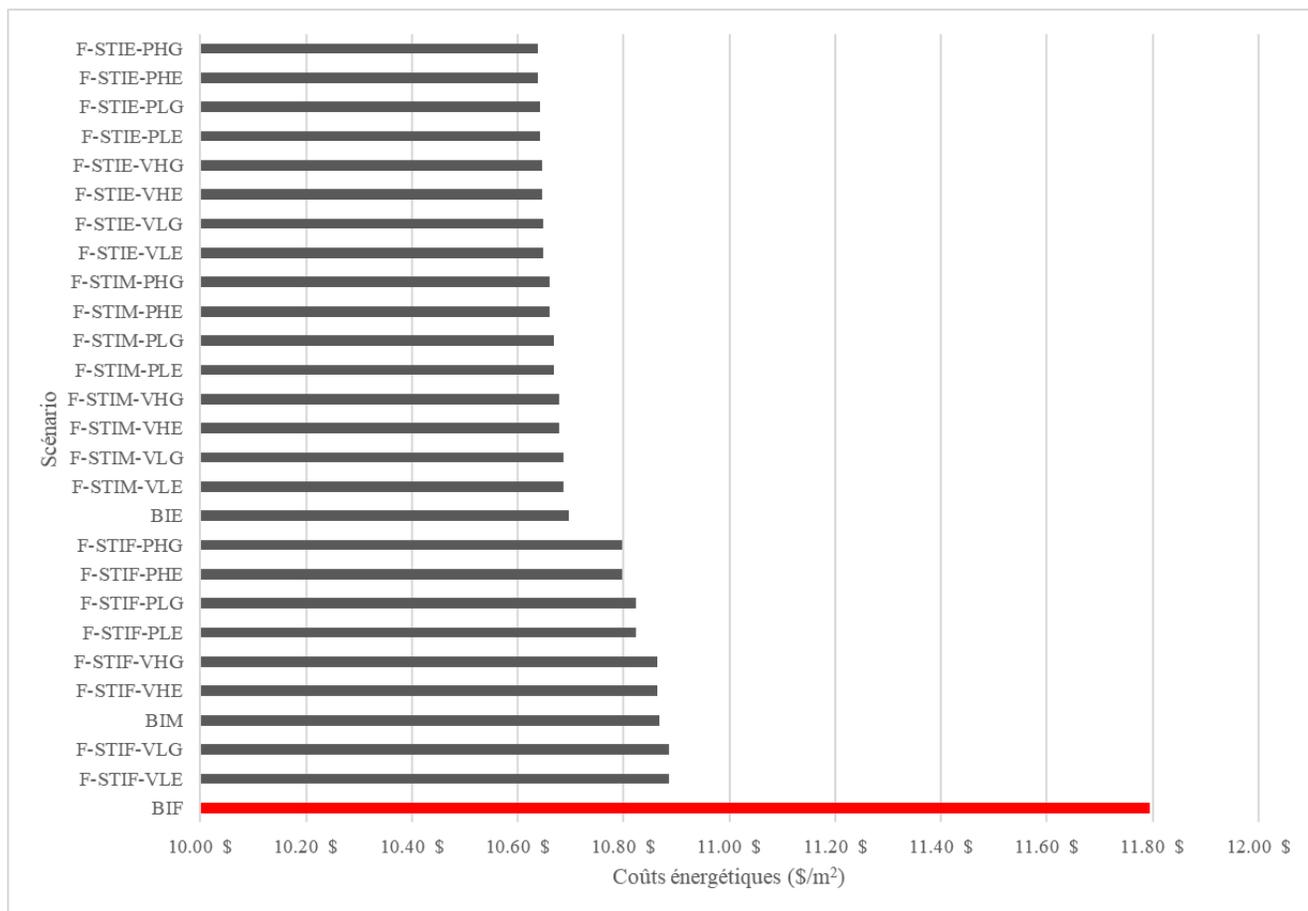


Figure 12 – Classement des scénarios en fonction des coûts énergétiques du bâtiment avec une serre froide (laitue) intégrée au toit

ANNEXE H

COMPARAISON ENTRE LES SCÉNARIOS AVEC SERRE CHAUDE ET AVEC SERRE FROIDE DE
CARACTÉRISTIQUES ÉQUIVALENTES

Tableau 1 – Comparaison entre les scénarios avec serre chaude et avec serre froide de caractéristiques équivalentes

Comparaison des scénarios										
Serre chaude (tomate)				Serre froide (laitue)				Différence		
Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
C-SS-PHG	3456	107,0	43,07 \$	F-SS-PHG	2645	114,1	29,72 \$	-23 %	7 %	-31 %
C-SS-VHG	4050	142,7	48,71 \$	F-SS-VHG	3175	142,8	35,08 \$	-22 %	0 %	-28 %
C-SS-PLG	3124	122,2	36,36 \$	F-SS-PLG	2570	118,5	28,09 \$	-18 %	-3 %	-23 %
C-SS-VLG	3720	155,0	42,34 \$	F-SS-VLG	3099	146,1	33,56 \$	-17 %	-6 %	-21 %
C-SS-PHE	3030	1,7	47,05 \$	F-SS-PHE	2189	1,2	33,98 \$	-28 %	-28 %	-28 %
C-SS-VHE	3480	2,0	54,04 \$	F-SS-VHE	2603	1,5	40,42 \$	-25 %	-25 %	-25 %
C-SS-PLE	2636	1,5	40,92 \$	F-SS-PLE	2095	1,2	32,53 \$	-21 %	-21 %	-21 %
C-SS-VLE	3100	1,8	48,13 \$	F-SS-VLE	2513	1,4	39,03 \$	-19 %	-19 %	-19 %
C-STIF-PHG	3122	91,2	39,45 \$	F-STIF-PHG	2355	99,8	26,63 \$	-25 %	9 %	-32 %
C-STIF-VHG	3783	130,4	45,80 \$	F-STIF-VHG	2949	131,7	32,67 \$	-22 %	1 %	-29 %
C-STIF-PLG	2830	108,0	33,21 \$	F-STIF-PLG	2295	104,9	25,18 \$	-19 %	-3 %	-24 %
C-STIF-VLG	3493	144,2	39,89 \$	F-STIF-VLG	2885	135,5	31,30 \$	-17 %	-6 %	-22 %
C-STIF-PHE	2759	1,6	42,84 \$	F-STIF-PHE	1955	1,1	30,36 \$	-29 %	-29 %	-29 %
C-STIF-VHE	3262	1,8	50,66 \$	F-STIF-VHE	2421	1,4	37,60 \$	-26 %	-26 %	-26 %
C-STIF-PLE	2398	1,4	37,24 \$	F-STIF-PLE	1875	1,1	29,11 \$	-22 %	-22 %	-22 %
C-STIF-VLE	2916	1,7	45,28 \$	F-STIF-VLE	2342	1,3	36,37 \$	-20 %	-20 %	-20 %
C-STIM-PHG	3081	89,2	39,02 \$	F-STIM-PHG	2349	99,5	26,58 \$	-24 %	12 %	-32 %
C-STIM-VHG	3750	128,8	45,45 \$	F-STIM-VHG	2950	131,7	32,69 \$	-21 %	2 %	-28 %
C-STIM-PLG	2803	106,7	32,93 \$	F-STIM-PLG	2297	105,0	25,20 \$	-18 %	-2 %	-23 %
C-STIM-VLG	3476	143,3	39,71 \$	F-STIM-VLG	2892	135,8	31,36 \$	-17 %	-5 %	-21 %
C-STIM-PHE	2726	1,5	42,33 \$	F-STIM-PHE	1951	1,1	30,30 \$	-28 %	-28 %	-28 %
C-STIM-VHE	3236	1,8	50,25 \$	F-STIM-VHE	2423	1,4	37,62 \$	-25 %	-25 %	-25 %
C-STIM-PLE	2377	1,3	36,91 \$	F-STIM-PLE	1876	1,1	29,13 \$	-21 %	-21 %	-21 %
C-STIM-VLE	2902	1,6	45,06 \$	F-STIM-VLE	2347	1	36,45 \$	-19 %	-19 %	-19 %
C-STIE-PHG	3074	88,8	38,94 \$	F-STIE-PHG	2349	99	26,57 \$	-24 %	12 %	-32 %
C-STIE-VHG	3745	128,5	45,40 \$	F-STIE-VHG	2952	132	32,70 \$	-21 %	3 %	-28 %
C-STIE-PLG	2800	106,5	32,89 \$	F-STIE-PLG	2297	105	25,21 \$	-18 %	-1 %	-23 %
C-STIE-VLG	3473	143,2	39,68 \$	F-STIE-VLG	2894	136	31,39 \$	-17 %	-5 %	-21 %
C-STIE-PHE	2720	1,5	42,24 \$	F-STIE-PHE	1951	1	30,29 \$	-28 %	-28 %	-28 %
C-STIE-VHE	3232	1,8	50,18 \$	F-STIE-VHE	2424	1	37,63 \$	-25 %	-25 %	-25 %
C-STIE-PLE	2374	1,3	36,87 \$	F-STIE-PLE	1876	1	29,14 \$	-21 %	-21 %	-21 %
C-STIE-VLE	2900	1,6	45,03 \$	F-STIE-VLE	2349	1	36,48 \$	-19 %	-19 %	-19 %

ANNEXE I

IMPACTS DE LA VARIATION DES PARAMÈTRES (COMPARAISON ENTRE SCÉNARIOS DE CARACTÉRISTIQUES ÉQUIVALENTES)

Impacts de l'intégration de la serre au toit du bâtiment

Tableau 1 – Impacts de l'intégration de la serre au toit sur la serre chaude (tomate)

	Comparaison des scénarios										
	Serre sur sol (SS)				Serre sur toit (ST)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS et STIF	C-SS-PHG	3456	107,0	43,07 \$	C-STIF-PHG	3122	91,2	39,45 \$	-10 %	-15 %	-8 %
	C-SS-VHG	4050	142,7	48,71 \$	C-STIF-VHG	3783	130,4	45,80 \$	-7 %	-9 %	-6 %
	C-SS-PLG	3124	122,2	36,36 \$	C-STIF-PLG	2830	108,0	33,21 \$	-9 %	-12 %	-9 %
	C-SS-VLG	3720	155,0	42,34 \$	C-STIF-VLG	3493	144,2	39,89 \$	-6 %	-7 %	-6 %
	C-SS-PHE	3030	1,7	47,05 \$	C-STIF-PHE	2759	1,6	42,84 \$	-9 %	-9 %	-9 %
	C-SS-VHE	3480	2,0	54,04 \$	C-STIF-VHE	3262	1,8	50,66 \$	-6 %	-6 %	-6 %
	C-SS-PLE	2636	1,5	40,92 \$	C-STIF-PLE	2398	1,4	37,24 \$	-9 %	-9 %	-9 %
	C-SS-VLE	3100	1,8	48,13 \$	C-STIF-VLE	2916	1,7	45,28 \$	-6 %	-6 %	-6 %
SS et STIM	C-SS-PHG	3456	107,0	43,07 \$	C-STIM-PHG	3081	89,2	39,02 \$	-11 %	-16,6 %	-9 %
	C-SS-VHG	4050	142,7	48,71 \$	C-STIM-VHG	3750	128,8	45,45 \$	-7 %	-10 %	-7 %
	C-SS-PLG	3124	122,2	36,36 \$	C-STIM-PLG	2803	106,7	32,93 \$	-10 %	-13 %	-9 %
	C-SS-VLG	3720	155,0	42,34 \$	C-STIM-VLG	3476	143,3	39,71 \$	-7 %	-8 %	-6 %
	C-SS-PHE	3030	1,7	47,05 \$	C-STIM-PHE	2726	1,5	42,33 \$	-10 %	-10 %	-10 %
	C-SS-VHE	3480	2,0	54,04 \$	C-STIM-VHE	3236	1,8	50,25 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	C-SS-PLE	2636	1,5	40,92 \$	C-STIM-PLE	2377	1,3	36,91 \$	-10 %	-10 %	-10 %
	C-SS-VLE	3100	1,8	48,13 \$	C-STIM-VLE	2902	1,6	45,06 \$	-6 %	-6 %	-6 %
SS et STIE	C-SS-PHG	3456	107,0	43,07 \$	C-STIE-PHG	3074	88,8	38,94 \$	-11 %	-18,6 %	-10 %
	C-SS-VHG	4050	142,7	48,71 \$	C-STIE-VHG	3745	128,5	45,40 \$	-8 %	-10 %	-7 %
	C-SS-PLG	3124	122,2	36,36 \$	C-STIE-PLG	2800	106,5	32,89 \$	-10 %	-14 %	-10 %
	C-SS-VLG	3720	155,0	42,34 \$	C-STIE-VLG	3473	143,2	39,68 \$	-7 %	-8 %	-6 %
	C-SS-PHE	3030	1,7	47,05 \$	C-STIE-PHE	2720	1,5	42,24 \$	-10 %	-11 %	-11 %
	C-SS-VHE	3480	2,0	54,04 \$	C-STIE-VHE	3232	1,8	50,18 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	C-SS-PLE	2636	1,5	40,92 \$	C-STIE-PLE	2374	1,3	36,87 \$	-10 %	-10 %	-10 %
	C-SS-VLE	3100	1,8	48,13 \$	C-STIE-VLE	2900	1,6	45,03 \$	-6 %	-7 %	-7 %

Tableau 2 – Impacts de l'intégration de la serre au toit sur la serre froide (laitue)

	Comparaison des scénarios										
	Serre sur sol (SS)			Serre sur toit (ST)				Différence			
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS et STIF	F-SS-PHG	2645	114,1	29,72 \$	F-STIF-PHG	2355	99,8	26,63 \$	-11 %	-13 %	-10 %
	F-SS-VHG	3175	142,8	35,08 \$	F-STIF-VHG	2949	131,7	32,67 \$	-7 %	-8 %	-7 %
	F-SS-PLG	2570	118,5	28,09 \$	F-STIF-PLG	2295	104,9	25,18 \$	-11 %	-11 %	-10 %
	F-SS-VLG	3099	146,1	33,56 \$	F-STIF-VLG	2885	135,5	31,30 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	F-SS-PHE	2189	1,2	33,98 \$	F-STIF-PHE	1955	1,1	30,36 \$	-11 %	-11 %	-11 %
	F-SS-VHE	2603	1,5	40,42 \$	F-STIF-VHE	2421	1,4	37,60 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	F-SS-PLE	2095	1,2	32,53 \$	F-STIF-PLE	1875	1,1	29,11 \$	-10 %	-10 %	-10 %
F-SS-VLE	2513	1,4	39,03 \$	F-STIF-VLE	2342	1,3	36,37 \$	-7 %	-7 %	-7 %	
SS et STIM	F-SS-PHG	2645	114,1	29,72 \$	F-STIM-PHG	2349	99,5	26,58 \$	-11 %	-13 %	-11 %
	F-SS-VHG	3175	142,8	35,08 \$	F-STIM-VHG	2950	131,7	32,69 \$	-7 %	-8 %	-7 %
	F-SS-PLG	2570	118,5	28,09 \$	F-STIM-PLG	2297	105,0	25,20 \$	-11 %	-11 %	-10 %
	F-SS-VLG	3099	146,1	33,56 \$	F-STIM-VLG	2892	135,8	31,36 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	F-SS-PHE	2189	1,2	33,98 \$	F-STIM-PHE	1951	1,1	30,30 \$	-11 %	-11 %	-11 %
	F-SS-VHE	2603	1,5	40,42 \$	F-STIM-VHE	2423	1,4	37,62 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	F-SS-PLE	2095	1,2	32,53 \$	F-STIM-PLE	1876	1,1	29,13 \$	-10 %	-10 %	-10 %
F-SS-VLE	2513	1,4	39,03 \$	F-STIM-VLE	2347	1,3	36,45 \$	-7 %	-7 %	-7 %	
SS et STIE	F-SS-PHG	2645	114,1	29,72 \$	F-STIE-PHG	2349	99,5	26,57 \$	-11 %	-14 %	-11 %
	F-SS-VHG	3175	142,8	35,08 \$	F-STIE-VHG	2952	131,8	32,70 \$	-7 %	-8 %	-7 %
	F-SS-PLG	2570	118,5	28,09 \$	F-STIE-PLG	2297	105,0	25,21 \$	-11 %	-12 %	-11 %
	F-SS-VLG	3099	146,1	33,56 \$	F-STIE-VLG	2894	135,9	31,39 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	F-SS-PHE	2189	1,2	33,98 \$	F-STIE-PHE	1951	1,1	30,29 \$	-11 %	-11 %	-11 %
	F-SS-VHE	2603	1,5	40,42 \$	F-STIE-VHE	2424	1,4	37,63 \$	-7 %	-7 %	-7 %
	F-SS-PLE	2095	1,2	32,53 \$	F-STIE-PLE	1876	1,1	29,14 \$	-10 %	-11 %	-11 %
F-SS-VLE	2513	1,4	39,03 \$	F-STIE-VLE	2349	1,3	36,48 \$	-7 %	-7 %	-7 %	

Tableau 3 – Impacts de l'intégration de la serre au toit sur le bâtiment avec une serre chaude (tomate)

	Comparaison des scénarios										
	Serre sur sol (SS)				Serre sur toit (ST)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
BIF et STIFF	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-PHG	650	21,5	10,64 \$	-14 %	-20 %	-10 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-VHG	658	21,9	10,72 \$	-13 %	-19 %	-9 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-PLG	658	21,9	10,72 \$	-13 %	-19 %	-9 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-VLG	665	22,2	10,80 \$	-12 %	-17 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-PHE	650	21,5	10,64 \$	-14 %	-20 %	-10 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-VHE	658	21,9	10,72 \$	-13 %	-19 %	-9 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-PLE	658	21,9	10,72 \$	-13 %	-19 %	-9 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	C-STIF-VLE	665	22,2	10,80 \$	-12 %	-17 %	-8 %
BIM et STIM	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-PHG	647	21,4	10,61 \$	-4 %	-5 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-VHG	649	21,5	10,63 \$	-3 %	-5 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-PLG	649	21,5	10,63 \$	-3 %	-5 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-VLG	651	21,6	10,66 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-PHE	647	21,4	10,61 \$	-4 %	-5 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-VHE	649	21,5	10,63 \$	-3 %	-5 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-PLE	649	21,5	10,63 \$	-3 %	-5 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	C-STIM-VLE	651	21,6	10,66 \$	-3 %	-4 %	-2 %
BIE et STIE	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-PHG	647	21,4	10,61 \$	-1 %	-2 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-VHG	648	21,4	10,62 \$	-1 %	-2 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-PLG	648	21,4	10,62 \$	-1 %	-2 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-VLG	649	21,5	10,63 \$	-1 %	-1 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-PHE	647	21,4	10,53 \$	-1 %	-2 %	-2 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-VHE	648	21,4	10,59 \$	-1 %	-2 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-PLE	648	21,4	10,53 \$	-1 %	-2 %	-2 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	C-STIE-VLE	649	21,5	10,60 \$	-1 %	-1 %	-1 %

Tableau 4 – Impacts de l'intégration de la serre au toit sur le bâtiment avec une serre froide (laitue)

	Comparaison des scénarios										
	Serre sur sol (SS)				Serre sur toit (ST)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
BIF et STIFF	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-PHG	665	22,2	10,80 \$	-12 %	-17 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-VHG	671	22,6	10,86 \$	-12 %	-16 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-PLG	667	22,4	10,82 \$	-12 %	-17 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-VLG	673	22,7	10,89 \$	-11 %	-16 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-PHE	665	22,2	10,80 \$	-12 %	-17 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-VHE	671	22,6	10,86 \$	-12 %	-16 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-PLE	667	22,4	10,82 \$	-12 %	-17 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	F-STIF-VLE	673	22,7	10,89 \$	-11 %	-16 %	-8 %
BIM et STIM	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-PHG	652	21,6	10,66 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-VHG	654	21,7	10,68 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-PLG	653	21,6	10,67 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-VLG	654	21,7	10,69 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-PHE	652	21,6	10,66 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-VHE	654	21,7	10,68 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-PLE	653	21,6	10,67 \$	-3 %	-4 %	-2 %
	BIM	671	22,6	10,87 \$	F-STIM-VLE	654	21,7	10,69 \$	-3 %	-4 %	-2 %
BIE et STIE	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-PHG	650	21,5	10,64 \$	-1 %	-1 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-VHG	650	21,5	10,65 \$	-1 %	-1 %	0 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-PLG	650	21,5	10,64 \$	-1 %	-1 %	0 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-VLG	651	21,5	10,65 \$	-1 %	-1 %	0 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-PHE	650	21,5	10,59 \$	-1 %	-1 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-VHE	650	21,5	10,65 \$	-1 %	-1 %	0 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-PLE	650	21,5	10,59 \$	-1 %	-1 %	-1 %
	BIE	655	21,8	10,70 \$	F-STIE-VLE	651	21,5	10,65 \$	-1 %	-1 %	0 %

Impacts du niveau d'isolation du toit du bâtiment

Tableau 5 – Impacts du niveau d'isolation du toit sur la serre chaude (tomate)

		Comparaison des scénarios										
		Niveau d'isolation du toit faible (IF)				Niveaux d'isolation du toit moyen (IE) et élevé (IE)				Différence		
		Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
STIF et STIM	C-STIF-PHG	3122	91,2	39,45 \$	C-STIM-PHG	3081	89,2	39,02 \$	-1,3 %	-2,2 %	-1,1 %	
	C-STIF-VHG	3783	130,4	45,80 \$	C-STIM-VHG	3750	128,8	45,45 \$	-0,9 %	-1,3 %	-0,8 %	
	C-STIF-PLG	2830	108,0	33,21 \$	C-STIM-PLG	2803	106,7	32,93 \$	-0,9 %	-1,2 %	-0,8 %	
	C-STIF-VLG	3493	144,2	39,89 \$	C-STIM-VLG	3476	143,3	39,71 \$	-0,5 %	-0,6 %	-0,5 %	
	C-STIF-PHE	2759	1,6	42,84 \$	C-STIM-PHE	2726	1,5	42,33 \$	-1,2 %	-1,2 %	-1,2 %	
	C-STIF-VHE	3262	1,8	50,66 \$	C-STIM-VHE	3236	1,8	50,25 \$	-0,8 %	-0,8 %	-0,8 %	
	C-STIF-PLE	2398	1,4	37,24 \$	C-STIM-PLE	2377	1,3	36,91 \$	-0,9 %	-0,9 %	-0,9 %	
STIF et STIE	C-STIF-VLE	2916	1,7	45,28 \$	C-STIM-VLE	2902	1,6	45,06 \$	-0,5 %	-0,5 %	-0,5 %	
	C-STIF-PHG	3122	91,2	39,45 \$	C-STIE-PHG	3074	88,8	38,94 \$	-1,6 %	-2,6 %	-1,3 %	
	C-STIF-VHG	3783	130,4	45,80 \$	C-STIE-VHG	3745	128,5	45,40 \$	-1,0 %	-1,5 %	-0,9 %	
	C-STIF-PLG	2830	108,0	33,21 \$	C-STIE-PLG	2800	106,5	32,89 \$	-1,1 %	-1,4 %	-1,0 %	
	C-STIF-VLG	3493	144,2	39,89 \$	C-STIE-VLG	3473	143,2	39,68 \$	-0,6 %	-0,7 %	-0,5 %	
	C-STIF-PHE	2759	1,6	42,84 \$	C-STIE-PHE	2720	1,5	42,24 \$	-1,4 %	-1,4 %	-1,4 %	
	C-STIF-VHE	3262	1,8	50,66 \$	C-STIE-VHE	3232	1,8	50,18 \$	-0,9 %	-0,9 %	-0,9 %	
C-STIF-PLE	2398	1,4	37,24 \$	C-STIE-PLE	2374	1,3	36,87 \$	-1,0 %	-1,0 %	-1,0 %		
C-STIF-VLE	2916	1,7	45,28 \$	C-STIE-VLE	2900	1,6	45,03 \$	-0,6 %	-0,6 %	-0,6 %		

Tableau 6 – Impacts du niveau d'isolation du toit sur la serre froide (laitue)

Comparaison des scénarios											
	Niveau d'isolation du toit faible (IF)				Niveaux d'isolation du toit moyen (IE) et élevé (IE)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
STIF et STIM	F-STIF-PHG	2355	99,8	26,63 \$	F-STIM-PHG	2349	99,5	26,58 \$	-0,2 %	-0,3 %	-0,2 %
	F-STIF-VHG	2949	131,7	32,67 \$	F-STIM-VHG	2950	131,7	32,69 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %
	F-STIF-PLG	2295	104,9	25,18 \$	F-STIM-PLG	2297	105,0	25,20 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %
	F-STIF-VLG	2885	135,5	31,30 \$	F-STIM-VLG	2892	135,8	31,36 \$	0,2 %	0,2 %	0,2 %
	F-STIF-PHE	1955	1,1	30,36 \$	F-STIM-PHE	1951	1,1	30,30 \$	-0,2 %	-0,2 %	-0,2 %
	F-STIF-VHE	2421	1,4	37,60 \$	F-STIM-VHE	2423	1,4	37,62 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %
	F-STIF-PLE	1875	1,1	29,11 \$	F-STIM-PLE	1876	1,1	29,13 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %
STIF et STIE	F-STIF-VLE	2342	1,3	36,37 \$	F-STIM-VLE	2347	1,3	36,45 \$	0,2 %	0,2 %	0,2 %
	F-STIF-PHG	2355	99,8	26,63 \$	F-STIE-PHG	2349	99,5	26,57 \$	-0,2 %	-0,3 %	-0,2 %
	F-STIF-VHG	2949	131,7	32,67 \$	F-STIE-VHG	2952	131,8	32,70 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %
	F-STIF-PLG	2295	104,9	25,18 \$	F-STIE-PLG	2297	105,0	25,21 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %
	F-STIF-VLG	2885	135,5	31,30 \$	F-STIE-VLG	2894	135,9	31,39 \$	0,3 %	0,3 %	0,3 %
	F-STIF-PHE	1955	1,1	30,36 \$	F-STIE-PHE	1951	1,1	30,29 \$	-0,2 %	-0,2 %	-0,2 %
	F-STIF-VHE	2421	1,4	37,60 \$	F-STIE-VHE	2424	1,4	37,63 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %
F-STIF-PLE	1875	1,1	29,11 \$	F-STIE-PLE	1876	1,1	29,14 \$	0,1 %	0,1 %	0,1 %	
F-STIF-VLE	2342	1,3	36,37 \$	F-STIE-VLE	2349	1,3	36,48 \$	0,3 %	0,3 %	0,3 %	

Tableau 7 – Impacts du niveau d’isolation du toit sur le bâtiment avec une serre chaude (tomate)

		Comparaison des scénarios										
		Niveau d’isolation du toit faible (IF)				Niveaux d’isolation du toit moyen (IE) et élevé (IE)				Différence		
		Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
B	BIF	759	26,9	11,80 \$	BIM	671	22,6	10,87 \$	-12 %	-16 %	-8 %	
	BIF	759	26,9	11,80 \$	BIE	655	21,8	10,70 \$	-14 %	-19 %	-9 %	
STIF et STIM	C-STIF-PHG	650	21,5	10,64 \$	C-STIM-PHG	647	21,4	10,61 \$	-0,4 %	-0,6 %	-0,3 %	
	C-STIF-VHG	658	21,9	10,72 \$	C-STIM-VHG	649	21,5	10,63 \$	-1,3 %	-1,9 %	-0,8 %	
	C-STIF-PLG	658	21,9	10,72 \$	C-STIM-PLG	649	21,5	10,63 \$	-1,3 %	-1,9 %	-0,8 %	
	C-STIF-VLG	665	22,2	10,80 \$	C-STIM-VLG	651	21,6	10,66 \$	-2,0 %	-3,0 %	-1,3 %	
	C-STIF-PHE	650	21,5	10,64 \$	C-STIM-PHE	647	21,4	10,61 \$	-0,4 %	-0,6 %	-0,3 %	
	C-STIF-VHE	658	21,9	10,72 \$	C-STIM-VHE	649	21,5	10,63 \$	-1,3 %	-1,9 %	-0,8 %	
	C-STIF-PLE	658	21,9	10,72 \$	C-STIM-PLE	649	21,5	10,63 \$	-1,3 %	-1,9 %	-0,8 %	
	C-STIF-VLE	665	22,2	10,80 \$	C-STIM-VLE	651	21,6	10,66 \$	-2,0 %	-3,0 %	-1,3 %	
STIF et STIE	C-STIF-PHG	650	21,5	10,64 \$	C-STIE-PHG	647	21,4	10,61 \$	-0,4 %	-0,5 %	-0,2 %	
	C-STIF-VHG	658	21,9	10,72 \$	C-STIE-VHG	648	21,4	10,62 \$	-1,5 %	-2,2 %	-1,0 %	
	C-STIF-PLG	658	21,9	10,72 \$	C-STIE-PLG	648	21,4	10,62 \$	-1,4 %	-2,1 %	-0,9 %	
	C-STIF-VLG	665	22,2	10,80 \$	C-STIE-VLG	649	21,5	10,63 \$	-2,4 %	-3,5 %	-1,5 %	
	C-STIF-PHE	650	21,5	10,64 \$	C-STIE-PHE	647	21,4	10,53 \$	-0,4 %	-0,5 %	-1,0 %	
	C-STIF-VHE	658	21,9	10,72 \$	C-STIE-VHE	648	21,4	10,59 \$	-1,5 %	-2,2 %	-1,2 %	
	C-STIF-PLE	658	21,9	10,72 \$	C-STIE-PLE	648	21,4	10,53 \$	-1,4 %	-2,1 %	-1,8 %	
	C-STIF-VLE	665	22,2	10,80 \$	C-STIE-VLE	649	21,5	10,60 \$	-2,4 %	-3,5 %	-1,9 %	

Tableau 8 – Impacts du niveau d'isolation du toit sur le bâtiment avec une serre froide (laitue)

		Comparaison des scénarios									
		Niveau d'isolation du toit faible (IF)				Niveaux d'isolation du toit moyen (IE) et élevé (IE)				Différence	
		Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)
B	BIF	759	26,9	11,80 \$	BIM	671	22,6	10,87 \$	-12 %	-16 %	-8 %
	BIF	759	26,9	11,80 \$	BIE	655	21,8	10,70 \$	-14 %	-19 %	-9 %
STIF et STIM	F-STIF-PHG	665	22,2	10,80 \$	F-STIM-PHG	652	21,6	10,66 \$	-1,9 %	-2,9 %	-1,3 %
	F-STIF-VHG	671	22,6	10,86 \$	F-STIM-VHG	654	21,7	10,68 \$	-2,6 %	-3,8 %	-1,7 %
	F-STIF-PLG	667	22,4	10,82 \$	F-STIM-PLG	653	21,6	10,67 \$	-2,2 %	-3,2 %	-1,4 %
	F-STIF-VLG	673	22,7	10,89 \$	F-STIM-VLG	654	21,7	10,69 \$	-2,8 %	-4,2 %	-1,8 %
	F-STIF-PHE	665	22,2	10,80 \$	F-STIM-PHE	652	21,6	10,66 \$	-1,9 %	-2,9 %	-1,3 %
	F-STIF-VHE	671	22,6	10,86 \$	F-STIM-VHE	654	21,7	10,68 \$	-2,6 %	-3,8 %	-1,7 %
	F-STIF-PLE	667	22,4	10,82 \$	F-STIM-PLE	653	21,6	10,67 \$	-2,2 %	-3,2 %	-1,4 %
	F-STIF-VLE	673	22,7	10,89 \$	F-STIM-VLE	654	21,7	10,69 \$	-2,8 %	-4,2 %	-1,8 %
STIF et STIE	F-STIF-PHG	665	22,2	10,80 \$	F-STIE-PHG	650	21,5	10,64 \$	-2,2 %	-3,3 %	-1,5 %
	F-STIF-VHG	671	22,6	10,86 \$	F-STIE-VHG	650	21,5	10,65 \$	-3,1 %	-4,5 %	-2,0 %
	F-STIF-PLG	667	22,4	10,82 \$	F-STIE-PLG	650	21,5	10,64 \$	-2,6 %	-3,8 %	-1,7 %
	F-STIF-VLG	673	22,7	10,89 \$	F-STIE-VLG	651	21,5	10,65 \$	-3,3 %	-4,9 %	-2,2 %
	F-STIF-PHE	665	22,2	10,80 \$	F-STIE-PHE	650	21,5	10,59 \$	-2,2 %	-3,3 %	-1,9 %
	F-STIF-VHE	671	22,6	10,86 \$	F-STIE-VHE	650	21,5	10,65 \$	-3,1 %	-4,5 %	-2,0 %
	F-STIF-PLE	667	22,4	10,82 \$	F-STIE-PLE	650	21,5	10,59 \$	-2,6 %	-3,8 %	-2,2 %
	F-STIF-VLE	673	22,7	10,89 \$	F-STIE-VLE	651	21,5	10,65 \$	-3,3 %	-4,9 %	-2,2 %

Impacts du matériau de recouvrement

Tableau 9 – Impacts du matériau de recouvrement sur la serre chaude (tomate)

	Comparaison des scénarios										
	Polycarbonate double paroi (P)				Verre simple paroi (V)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS	C-SS-PHG	3456	107,0	43,07 \$	C-SS-VHG	4050	142,7	48,71 \$	17 %	33 %	13 %
	C-SS-PLG	3124	122,2	36,36 \$	C-SS-VLG	3720	155,0	42,34 \$	19 %	27 %	16 %
	C-SS-PHE	3030	1,7	47,05 \$	C-SS-VHE	3480	2,0	54,04 \$	15 %	15 %	15 %
	C-SS-PLE	2636	1,5	40,92 \$	C-SS-VLE	3100	1,8	48,13 \$	18 %	18 %	18 %
STIF	C-STIF-PHG	3122	91,2	39,45 \$	C-STIF-VHG	3783	130,4	45,80 \$	21 %	43 %	16 %
	C-STIF-PLG	2830	108,0	33,21 \$	C-STIF-VLG	3493	144,2	39,89 \$	23 %	34 %	20 %
	C-STIF-PHE	2759	1,6	42,84 \$	C-STIF-VHE	3262	1,8	50,66 \$	18 %	18 %	18 %
	C-STIF-PLE	2398	1,4	37,24 \$	C-STIF-VLE	2916	1,7	45,28 \$	22 %	22 %	22 %
STIM	C-STIM-PHG	3081	89,2	39,02 \$	C-STIM-VHG	3750	128,8	45,45 \$	22 %	44 %	16 %
	C-STIM-PLG	2803	106,7	32,93 \$	C-STIM-VLG	3476	143,3	39,71 \$	24 %	34 %	21 %
	C-STIM-PHE	2726	1,5	42,33 \$	C-STIM-VHE	3236	1,8	50,25 \$	19 %	19 %	19 %
	C-STIM-PLE	2377	1,3	36,91 \$	C-STIM-VLE	2902	1,6	45,06 \$	22 %	22 %	22 %
STIE	C-STIE-PHG	3074	88,8	38,94 \$	C-STIE-VHG	3745	128,5	45,40 \$	22 %	45 %	17 %
	C-STIE-PLG	2800	106,5	32,89 \$	C-STIE-VLG	3473	143,2	39,68 \$	24 %	34 %	21 %
	C-STIE-PHE	2720	1,5	42,24 \$	C-STIE-VHE	3232	1,8	50,18 \$	19 %	19 %	19 %
	C-STIE-PLE	2374	1,3	36,87 \$	C-STIE-VLE	2900	1,6	45,03 \$	22 %	22 %	22 %

Tableau 10 – Impacts du matériau de recouvrement sur la serre froide (laitue)

	Comparaison des scénarios										
	Polycarbonate double paroi (P)				Verre simple paroi (V)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS	F-SS-PHG	2645	114,1	29,72 \$	F-SS-VHG	3175	142,8	35,08 \$	20 %	25 %	18 %
	F-SS-PLG	2570	118,5	28,09 \$	F-SS-VLG	3099	146,1	33,56 \$	21 %	23 %	19 %
	F-SS-PHE	2189	1,2	33,98 \$	F-SS-VHE	2603	1,5	40,42 \$	19 %	19 %	19 %
	F-SS-PLE	2095	1,2	32,53 \$	F-SS-VLE	2513	1,4	39,03 \$	20 %	20 %	20 %
STIF	F-STIF-PHG	2355	99,8	26,63 \$	F-STIF-VHG	2949	131,7	32,67 \$	25 %	32 %	23 %
	F-STIF-PLG	2295	104,9	25,18 \$	F-STIF-VLG	2885	135,5	31,30 \$	26 %	29 %	24 %
	F-STIF-PHE	1955	1,1	30,36 \$	F-STIF-VHE	2421	1,4	37,60 \$	24 %	24 %	24 %
	F-STIF-PLE	1875	1,1	29,11 \$	F-STIF-VLE	2342	1,3	36,37 \$	25 %	25 %	25 %
STIM	F-STIM-PHG	2349	99,5	26,58 \$	F-STIM-VHG	2950	131,7	32,69 \$	26 %	32 %	23 %
	F-STIM-PLG	2297	105,0	25,20 \$	F-STIM-VLG	2892	135,8	31,36 \$	26 %	29 %	24 %
	F-STIM-PHE	1951	1,1	30,30 \$	F-STIM-VHE	2423	1,4	37,62 \$	24 %	24 %	24 %
	F-STIM-PLE	1876	1,1	29,13 \$	F-STIM-VLE	2347	1,3	36,45 \$	25 %	25 %	25 %
STIE	F-STIE-PHG	2349	99,5	26,57 \$	F-STIE-VHG	2952	131,8	32,70 \$	26 %	33 %	23 %
	F-STIE-PLG	2297	105,0	25,21 \$	F-STIE-VLG	2894	135,9	31,39 \$	26 %	29 %	25 %
	F-STIE-PHE	1951	1,1	30,29 \$	F-STIE-VHE	2424	1,4	37,63 \$	24 %	24 %	24 %
	F-STIE-PLE	1876	1,1	29,14 \$	F-STIE-VLE	2349	1,3	36,48 \$	25 %	25 %	25 %

Impacts du type d'appareils d'éclairage

Tableau 11 – Impacts du type d'appareils d'éclairage sur la serre chaude (tomate)

	Comparaison des scénarios										
	HPS (H)				LED (L)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS	C-SS-PHG	3456	107,0	43,07 \$	C-SS-PLG	3124	122,2	36,36 \$	-9,6 %	14,2 %	-15,6 %
	C-SS-VHG	4050	142,7	48,71 \$	C-SS-VLG	3720	155,0	42,34 \$	-8,1 %	8,6 %	-13,1 %
	C-SS-PHE	3030	1,7	47,05 \$	C-SS-PLE	2636	1,5	40,92 \$	-13,0 %	-13,0 %	-13,0 %
	C-SS-VHE	3480	2,0	54,04 \$	C-SS-VLE	3100	1,8	48,13 \$	-10,9 %	-10,9 %	-10,9 %
STIF	C-STIF-PHG	3122	91,2	39,45 \$	C-STIF-PLG	2830	108,0	33,21 \$	-9,4 %	18,4 %	-15,8 %
	C-STIF-VHG	3783	130,4	45,80 \$	C-STIF-VLG	3493	144,2	39,89 \$	-7,7 %	10,6 %	-12,9 %
	C-STIF-PHE	2759	1,6	42,84 \$	C-STIF-PLE	2398	1,4	37,24 \$	-13,1 %	-13,1 %	-13,1 %
	C-STIF-VHE	3262	1,8	50,66 \$	C-STIF-VLE	2916	1,7	45,28 \$	-10,6 %	-10,6 %	-10,6 %
STIM	C-STIM-PHG	3081	89,2	39,02 \$	C-STIM-PLG	2803	106,7	32,93 \$	-9,0 %	19,6 %	-15,6 %
	C-STIM-VHG	3750	128,8	45,45 \$	C-STIM-VLG	3476	143,3	39,71 \$	-7,3 %	11,3 %	-12,6 %
	C-STIM-PHE	2726	1,5	42,33 \$	C-STIM-PLE	2377	1,3	36,91 \$	-12,8 %	-12,8 %	-12,8 %
	C-STIM-VHE	3236	1,8	50,25 \$	C-STIM-VLE	2902	1,6	45,06 \$	-10,3 %	-10,3 %	-10,3 %
STIE	C-STIE-PHG	3074	88,8	38,94 \$	C-STIE-PLG	2800	106,5	32,89 \$	-8,9 %	19,9 %	-15,5 %
	C-STIE-VHG	3745	128,5	45,40 \$	C-STIE-VLG	3473	143,2	39,68 \$	-7,3 %	11,4 %	-12,6 %
	C-STIE-PHE	2720	1,5	42,24 \$	C-STIE-PLE	2374	1,3	36,87 \$	-12,7 %	-12,7 %	-12,7 %
	C-STIE-VHE	3232	1,8	50,18 \$	C-STIE-VLE	2900	1,6	45,03 \$	-10,3 %	-10,3 %	-10,3 %

Tableau 12 – Impacts du type d'appareils d'éclairage sur la serre froide (laitue)

	Comparaison des scénarios										
	HPS (H)				LED (L)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2éq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS	F-SS-PHG	2645	114,1	29,72 \$	F-SS-PLG	2570	118,5	28,09 \$	-2,9 %	3,9 %	-5,5 %
	F-SS-VHG	3175	142,8	35,08 \$	F-SS-VLG	3099	146,1	33,56 \$	-2,4 %	2,3 %	-4,3 %
	F-SS-PHE	2189	1,2	33,98 \$	F-SS-PLE	2095	1,2	32,53 \$	-4,3 %	-4,3 %	-4,3 %
	F-SS-VHE	2603	1,5	40,42 \$	F-SS-VLE	2513	1,4	39,03 \$	-3,5 %	-3,5 %	-3,5 %
STIF	F-STIF-PHG	2355	99,8	26,63 \$	F-STIF-PLG	2295	104,9	25,18 \$	-2,5 %	5,2 %	-5,4 %
	F-STIF-VHG	2949	131,7	32,67 \$	F-STIF-VLG	2885	135,5	31,30 \$	-2,1 %	2,9 %	-4,2 %
	F-STIF-PHE	1955	1,1	30,36 \$	F-STIF-PLE	1875	1,1	29,11 \$	-4,1 %	-4,1 %	-4,1 %
	F-STIF-VHE	2421	1,4	37,60 \$	F-STIF-VLE	2342	1,3	36,37 \$	-3,3 %	-3,3 %	-3,3 %
STIM	F-STIM-PHG	2349	99,5	26,58 \$	F-STIM-PLG	2297	105,0	25,20 \$	-2,2 %	5,5 %	-5,2 %
	F-STIM-VHG	2950	131,7	32,69 \$	F-STIM-VLG	2892	135,8	31,36 \$	-2,0 %	3,1 %	-4,1 %
	F-STIM-PHE	1951	1,1	30,30 \$	F-STIM-PLE	1876	1,1	29,13 \$	-3,8 %	-3,8 %	-3,8 %
	F-STIM-VHE	2423	1,4	37,62 \$	F-STIM-VLE	2347	1,3	36,45 \$	-3,1 %	-3,1 %	-3,1 %
STIE	F-STIE-PHG	2349	99,5	26,57 \$	F-STIE-PLG	2297	105,0	25,21 \$	-2,2 %	5,6 %	-5,1 %
	F-STIE-VHG	2952	131,8	32,70 \$	F-STIE-VLG	2894	135,9	31,39 \$	-2,0 %	3,1 %	-4,0 %
	F-STIE-PHE	1951	1,1	30,29 \$	F-STIE-PLE	1876	1,1	29,14 \$	-3,8 %	-3,8 %	-3,8 %
	F-STIE-VHE	2424	1,4	37,63 \$	F-STIE-VLE	2349	1,3	36,48 \$	-3,1 %	-3,1 %	-3,1 %

Impacts de la source d'énergie de chauffage

Tableau 13 – Impacts de la source d'énergie de chauffage sur la serre chaude (tomate)

	Comparaison des scénarios										
	Gaz naturel (G)				Électricité (E)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO ₂ eq/m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS	C-SS-PHG	3456	107,0	43,07 \$	C-SS-PHE	3030	1,7	47,05 \$	-12 %	-98 %	9 %
	C-SS-VHG	4050	142,7	48,71 \$	C-SS-VHE	3480	2,0	54,04 \$	-14 %	-99 %	11 %
	C-SS-PLG	3124	122,2	36,36 \$	C-SS-PLE	2636	1,5	40,92 \$	-16 %	-99 %	13 %
	C-SS-VLG	3720	155,0	42,34 \$	C-SS-VLE	3100	1,8	48,13 \$	-17 %	-99 %	14 %
STIF	C-STIF-PHG	3122	91,2	39,45 \$	C-STIF-PHE	2759	1,6	42,84 \$	-12 %	-98 %	9 %
	C-STIF-VHG	3783	130,4	45,80 \$	C-STIF-VHE	3262	1,8	50,66 \$	-14 %	-99 %	11 %
	C-STIF-PLG	2830	108,0	33,21 \$	C-STIF-PLE	2398	1,4	37,24 \$	-15 %	-99 %	12 %
	C-STIF-VLG	3493	144,2	39,89 \$	C-STIF-VLE	2916	1,7	45,28 \$	-17 %	-99 %	14 %
STIM	C-STIM-PHG	3081	89,2	39,02 \$	C-STIM-PHE	2726	1,5	42,33 \$	-12 %	-98 %	8 %
	C-STIM-VHG	3750	128,8	45,45 \$	C-STIM-VHE	3236	1,8	50,25 \$	-14 %	-99 %	11 %
	C-STIM-PLG	2803	106,7	32,93 \$	C-STIM-PLE	2377	1,3	36,91 \$	-15 %	-99 %	12 %
	C-STIM-VLG	3476	143,3	39,71 \$	C-STIM-VLE	2902	1,6	45,06 \$	-17 %	-99 %	13 %
STIE	C-STIE-PHG	3074	88,8	38,94 \$	C-STIE-PHE	2720	1,5	42,24 \$	-11 %	-98 %	8 %
	C-STIE-VHG	3745	128,5	45,40 \$	C-STIE-VHE	3232	1,8	50,18 \$	-14 %	-99 %	11 %
	C-STIE-PLG	2800	106,5	32,89 \$	C-STIE-PLE	2374	1,3	36,87 \$	-15 %	-99 %	12 %
	C-STIE-VLG	3473	143,2	39,68 \$	C-STIE-VLE	2900	1,6	45,03 \$	-16 %	-99 %	13 %

Tableau 14 – Impacts de la source d'énergie de chauffage sur la serre froide (laitue)

	Comparaison des scénarios										
	Gaz naturel (G)				Électricité (E)				Différence		
	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Scénario	Consommation énergétique (MJ/m ²)	Émissions de GES (kg CO _{2eq} /m ²)	Coûts énergétiques (\$/m ²)	Consommation énergétique (%)	Émissions de GES (%)	Coûts énergétiques (%)
SS	F-SS-PHG	2645	114,1	29,72 \$	F-SS-PHE	2189	1,2	33,98 \$	-17 %	-99 %	14 %
	F-SS-VHG	3175	142,8	35,08 \$	F-SS-VHE	2603	1,5	40,42 \$	-18 %	-99 %	15 %
	F-SS-PLG	2570	118,5	28,09 \$	F-SS-PLE	2095	1,2	32,53 \$	-18 %	-99 %	16 %
	F-SS-VLG	3099	146,1	33,56 \$	F-SS-VLE	2513	1,4	39,03 \$	-19 %	-99 %	16 %
STIF	F-STIF-PHG	2355	99,8	26,63 \$	F-STIF-PHE	1955	1,1	30,36 \$	-17 %	-99 %	14 %
	F-STIF-VHG	2949	131,7	32,67 \$	F-STIF-VHE	2421	1,4	37,60 \$	-18 %	-99 %	15 %
	F-STIF-PLG	2295	104,9	25,18 \$	F-STIF-PLE	1875	1,1	29,11 \$	-18 %	-99 %	16 %
	F-STIF-VLG	2885	135,5	31,30 \$	F-STIF-VLE	2342	1,3	36,37 \$	-19 %	-99 %	16 %
STIM	F-STIM-PHG	2349	99,5	26,58 \$	F-STIM-PHE	1951	1,1	30,30 \$	-17 %	-99 %	14 %
	F-STIM-VHG	2950	131,7	32,69 \$	F-STIM-VHE	2423	1,4	37,62 \$	-18 %	-99 %	15 %
	F-STIM-PLG	2297	105,0	25,20 \$	F-STIM-PLE	1876	1,1	29,13 \$	-18 %	-99 %	16 %
	F-STIM-VLG	2892	135,8	31,36 \$	F-STIM-VLE	2347	1,3	36,45 \$	-19 %	-99 %	16 %
STIE	F-STIE-PHG	2349	99,5	26,57 \$	F-STIE-PHE	1951	1,1	30,29 \$	-17 %	-99 %	14 %
	F-STIE-VHG	2952	131,8	32,70 \$	F-STIE-VHE	2424	1,4	37,63 \$	-18 %	-99 %	15 %
	F-STIE-PLG	2297	105,0	25,21 \$	F-STIE-PLE	1876	1,1	29,14 \$	-18 %	-99 %	16 %
	F-STIE-VLG	2894	135,9	31,39 \$	F-STIE-VLE	2349	1,3	36,48 \$	-19 %	-99 %	16 %

BIBLIOGRAPHIE

- Agriculture et Agroalimentaire Canada. (2019). *Aperçu statistique de l'industrie des légumes de serre du Canada 2018* (13005F) [Rapport].
https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/aac-aafc/A71-39-2018-fra.pdf
- Ahamed, M. S., Guo, H. et Tanino, K. (2018). A quasi-steady state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions. *Information Processing in Agriculture*, 5(1), 33-46.
<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.003>
- Aljubury, I. M. A. et Ridha, H. D. a. (2017). Enhancement of evaporative cooling system in a greenhouse using geothermal energy. *Renewable Energy*, 111, 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.080>
- Arkar, C., Domjan, S., Majkovič, D., Šumi, J. et Medved, S. (2015). Lightweight Green Roofs' Thermal Response under Freezing Conditions. 78, 1189-1194.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.100>
- Arnfield, J. (2020). Humid continental climate. Dans *Encyclopaedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/humid-continental-climate>.
- ASAE. (2003). *Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses* (ANSI/ASAE EP406.4 JAN03).
- Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., Turni, G. et Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104, 845-859.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.068>
- ASHRAE. (2002). *Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2011). *2011 ASHRAE handbook : HVAC applications (S-I Edition)*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

- ASHRAE. (2019). *2019 ASHRAE handbook : heating, ventilating, and air-conditioning applications*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- AU/LAB. (2018). *Laboratoire du Palais des Congrès de Montréal*. Laboratoire sur l'agriculture urbaine. <http://www.au-lab.ca/recherche/labo-du-palais-des-congres/>
- Autogrow et Agritecture Consulting. (2020). *2020 Global CEA Census Report* [Rapport de recensement]. WayBeyond. <https://www.waybeyond.io/census>
- Avgerinou, M., Bertoldi, P. et Castellazzi, L. (2017). Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. *Energies*, 10(10), 1470. <https://doi.org/10.3390/en10101470>
- Aye, L., Fuller, R. J. et Canal, A. (2010). Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(1), 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.07.002>
- Bakos, G. C., Fidanidis, D. et Tsagas, N. F. (1999). Greenhouse heating using geothermal energy. *Geothermics*, 28(6), 759-765. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00041-3)
- Balaras, C. A., Lelekis, J., Dascalaki, E. G. et Atsidaftis, D. (2017). High Performance Data Centers and Energy Efficiency Potential in Greece. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.091>
- Barozzi, B., Bellazzi, A. et Pollastro, M. C. (2016). The energy impact in buildings of vegetative solutions for extensive green roofs in temperate climates. *Buildings*, 6(3), 33. <https://doi.org/10.3390/buildings6030033>
- Bartlett, I. (2017, 14 octobre). [Photographie d'un toit végétalisé comestible de Brooklyn Grange à New York]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brooklyn_Grange_Rooftop_at_Brooklyn_Navy_Yard_with_View_of_Manhattan.jpg
- Bass, B. et Baskaran, B. (2003). Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. *Institute for Research and Construction, NRCC-46737, Project(A020)*, 110. <https://doi.org/10.4224/20386110>

- Beckman, W. A., Broman, L., Fiksel, A., Klein, S. A., Lindberg, E., Schuler, M. et Thornton, J. (1994). TRNSYS The most complete solar energy system modeling and simulation software. *Renewable Energy*, 5(1-4), 486-488. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90420-0](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90420-0)
- Benedetta, B., Alice, B., Claudio, M. et Maria Cristina, P. (2017). Measurement of Thermal Properties of Growing Media for Green Roofs: Assessment of a Laboratory Procedure and Experimental Results. *Buildings*, 7(4), 99. <https://doi.org/10.3390/buildings7040099>
- Benis, K., Reinhart, C. et Ferrão, P. (2017). Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. *Journal of Cleaner Production*, 147, 589-602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130>
- Benis, K., Turan, I., Reinhart, C. et Ferrão, P. (2018). Putting rooftops to use – A Cost-Benefit Analysis of food production vs. energy generation under Mediterranean climates. *Cities*, 78, 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.011>
- Berardi, U., Ghaffarianhoseini, A. et Ghaffarianhoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Berger, C. (2018). *Fiche #6 : Éclairage de photosynthèse* [Fiche technique]. Producteurs en serre du Québec. https://www.serres.quebec/download/publications/Energie/efficacite_energetique/Fiche-6-eclairage-29-janvier-2018.pdf
- Berger, C. et Brazeau, S. (2018). *Fiche #2 : Installation d'écrans thermiques* [Fiche technique]. Producteurs en serre du Québec. https://www.serres.quebec/download/publications/Energie/efficacite_energetique/Fiche-2-ecrans-thermiques-9-janvier-2018.pdf
- Berger, C., Laliberté, J.-F., Cadotte, G., Girouard, M. et Chagnon, É. (2011). *Projet-pilote en sericulture* [Rapport]. Syndicat des producteurs en serre du Québec. https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/agroalimentaire_agricole/rapport_projet-pilote_sericulture.pdf

- Bernier, A.-M. et Duchemin, É. (2020). *Portrait de l'agriculture urbaine commerciale au Québec en 2019*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine du Québec (CRETAU) et Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). http://cretau.ca/wp-content/uploads/2020/07/Portrait-de-lagriculture-urbaine-commerciale_2019_F.pdf
- Bot, G. P. (1983). *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model* [Thèse de doctorat, Université de Wageningen]. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/188427>
- Brault, D., Gueymard, C., Boily, R. et Gosselin, A. (1989). Contribution of HPS lighting to the heating requirements of a greenhouse. *Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA)*.
- Brodeur, C., Michaud, C., Charron, I. et Revéret, J.-P. (2006). *Documentation des innovations technologiques visant l'efficacité énergétique et l'utilisation de sources d'énergie alternatives durables en agriculture* [Rapport]. Groupe Agéco. <https://www.agrireseau.net/energie/documents/73781/documentation-des-innovations-technologiques-visant-l-efficacite-energetique-et-l-utilisation-de-sources-d-energie-alternatives-durables-en-agricultur>
- Bruschi, J., Rumsey, P., Anliker, R., Chu, L. et Gregson, S. (2011). *Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design* (NREL/BR-7A40-47201) [Guide de bonnes pratiques]. National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://www.energy.gov/eere/femp/downloads/best-practices-guide-energy-efficient-data-center-design>
- Cabannes, Y. (2012). Financing urban agriculture. *Environment and Urbanization*, 24(2), 665-683. <https://doi.org/10.1177/0956247812456126>
- Canakci, M. et Akinci, I. (2006). Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. *Energy*, 31(8), 1243-1256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.05.021>
- Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A. et Sciuto, G. (2018). A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment*, 136, 227-239. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052>
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M. et Davison, J. B. (2010). Green roofs building energy savings and the potential for retrofit. *Energy & Buildings*, 42(10), 1582-1591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>

- Charron, I., Gilbert, D., Dostie, S., Lamarche, V. et Vézina, C. (2011). *Portrait québécois et diagnostic de la production de légumes de serre et opportunités de développement* [Rapport]. Groupe Agéco.
https://www.serres.quebec/wpfb_filepage/portrait-quebecois-production-developpement-ageco-2011-pdf/
- Choab, N., Allouhi, A., El Maakoul, A., Kousksou, T., Saadeddine, S. et Jamil, A. (2019). Review on greenhouse microclimate and application: Design parameters, thermal modeling and simulation, climate controlling technologies. *Solar Energy*, 191, 109-137.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.042>
- CIBSE. (2005). *Natural ventilation in non-domestic buildings: CIBSE Applications Manual AM10*. Chartered Institution of Building Services Engineers.
http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2018/04/Natural_ventilation_in_non_domestic.pdf
- Clark, C., Adriaens, P. et Talbot, F. B. (2008). Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental science & technology*, 42(6), 2155-2161. <https://doi.org/10.1021/es0706652>
- Clarke, J. A. et Hensen, J. L. M. (2015). Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and Environment*, 91, 294-306. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>
- Clinton, N., Stuhlmacher, M., Miles, A., Uludere Aragon, N., Wagner, M., Georgescu, M., Herwig, C. et Gong, P. (2018). A Global Geospatial Ecosystem Services Estimate of Urban Agriculture. *Earth's Future*, 6(1), 40-60. <https://doi.org/10.1002/2017EF000536>
- Coakley, D., Raftery, P. et Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37(C), 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Cohen, A. et Duchemin, É. (2021). *Production maraîchère urbaine en intérieur dans une structure bâtie*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine du Québec (CRETAU) et Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). http://cretau.ca/wp-content/uploads/2021/05/Fiche-e%CC%81conomique_Marai%CC%82chage-en-inte%CC%81rieur_F_edite%CC%81e.pdf

- Cohen, A., Seguin, R. et Duchemin, É. (2021). *Portrait filière : production maraîchère urbaine en serre sur toit ou au sol*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine du Québec (CRETAU) et Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). http://cretau.ca/wp-content/uploads/2021/04/Portrait-filie%CC%80re_Serriculture-urbaine_Quebec_Canada_International-2.pdf
- Collins, S., Kuoppamäki, K., Kotze, D. J. et Lü, X. (2017). Thermal behavior of green roofs under Nordic winter conditions. *Building and Environment*, 122, 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.020>
- Coma, J., de Gracia, A., Chàfer, M., Pérez, G. et Cabeza, L. F. (2017). Thermal characterization of different substrates under dried conditions for extensive green roofs. *Energy & Buildings*, 144, 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.031>
- Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies. (2015). *Code national de prévention des incendies – Canada 2015* (CNPI-2015).
- Consultants G.T. & Associés Inc. (2008). *L'énergie dans la production agricole et le secteur des pêches au Québec* [Rapport]. https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/agroalimentaire_agricole/RA_energie_secteur_peches_2008_vf.pdf
- Corey, R., Riley, K., Rivera, M.-F. et Sullivan, D. (2015). *Economic Viability of Urban Agriculture in Boston, Massachusetts* [Rapport]. Trust for Public Land et Northeastern University. https://www.academia.edu/12543502/Economic_Viability_of_Urban_Agriculture_in_Boston_MA
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J. et Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy & Buildings*, 33(4), 319-331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Critten, D. L. et Bailey, B. J. (2002). A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology*, 112(1), 1-22. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00057-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00057-6)

- Cubi, E., Zibin, N. F., Thompson, S. J. et Bergerson, J. (2016). Sustainability of Rooftop Technologies in Cold Climates: Comparative Life Cycle Assessment of White Roofs, Green Roofs, and Photovoltaic Panels. *Journal of Industrial Ecology*, 20(2), 249-262. <https://doi.org/10.1111/jiec.12269>
- D’orazio, M., Di Perna, C. et Di Giuseppe, E. (2012). Green roof yearly performance: A case study in a highly insulated building under temperate climate. *Energy & Buildings*, 55, 439-451. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.009>
- Daly, H. et Walton, M. (2017). *Energy Access Outlook 2017 : From Poverty to Prosperity* [Rapport]. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) / International Energy Agency (IEA). https://read.oecd-ilibrary.org/energy/energy-access-outlook-2017_9789264285569-en#page1
- De Zwart, H. F. (1996). *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model* [Thèse de doctorat, Université de Wageningen]. <https://edepot.wur.nl/195238>
- Devi, B. et Ranka, J. (2016). Global Trends and Current Status of Commercial Urban Rooftop Farming. *Sustainability*, 8(11), 1108. <https://doi.org/10.3390/su8111108>
- Dionne, L. et Girouard, M. (2013). *L’utilisation des rejets thermiques industriels comme source de chauffage dans la production en serre au Québec* (6728) [Rapport]. Syndicat des producteurs en serre du Québec. https://www.serres.quebec/download/publications/Energie/efficacite_energetique/rapport-rejets-thermiques-industriels-chauffage-serre-psq-2013.pdf
- Dorais, M. (2003). The use of supplemental lighting for vegetable crop production: Light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practice. *Canadian Greenhouse Conference*, 9. <https://www.agrireseau.net/legumesdeserre/documents/cgc-dorais2003fin2.pdf>
- Dorais, M., Ménard, C. et Gosselin, A. (2002). *Effets d'un éclairage photosynthétique, une électro-technologie québécoise sur la culture de la tomate et de la laitue de serre*. Université Laval et Agriculture et Agroalimentaire Canada. http://www.regie-energie.qc.ca/audiences/3471-01/Memoire/Mem3471_4Serres-photosynth-14fev02.pdf

- Duchemin, É., Bernier, A.-M. et Huot, C. (2020). *Fiche économique : fermes urbaines de production de micropousses*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine du Québec (CRETAU) et Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). <http://cretau.ca/wp-content/uploads/2020/06/Fiche-%C3%A9conomique-fermes-micropousses.pdf>
- Duchemin, É. et Huot, C. (2019). *Fiche économique: Fermes maraîchères sur toit*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine du Québec (CRETAU) et Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). http://cretau.ca/wp-content/uploads/2020/02/Fiche-%C3%A9conomique-fermes-sur-toit_edition_F.pdf
- Duchemin, É., Wegmuller, F. et Legault, A.-M. (2008). Urban agriculture: multi-dimensional tools for social development in poor neighbourhoods. *Field Actions Science Reports*, 1. <https://journals.openedition.org/factsreports/113>
- Eaves, J. et Eaves, S. (2018). Comparing the Profitability of a Greenhouse to a Vertical Farm in Quebec. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, 66(1), 43-54. <https://doi.org/10.1111/cjag.12161>
- EnergyPlus. (2014a). *Air wall, Open air connection between zones*. Big Ladder Software. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-5/tips-and-tricks-using-energyplus/air-wall-open-air-connection-between-zones.html>
- EnergyPlus. (2014b). *Green Roof Model (EcoRoof)*. Big Ladder Software. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-029.html>
- EnergyPlus. (2014c). *Ground Heat Transfer in EnergyPlus*. Big Ladder Software. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-2/auxiliary-programs/ground-heat-transfer-in-energyplus.html>
- EnergyPlus. (2014d). *Infiltration/Ventilation*. Big Ladder Software. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-048.html>
- EnergyPlus. (2020). *Weather Data Download - Montreal Intl AP 716270 (CWEC)*. EnergyPlus. Récupéré le 26 octobre 2020 de https://energyplus.net/weather-location/north_and_central_america_wmo_region_4/CAN/PQ/CAN_PQ_Montreal.Intl.AP.716270_CWEC
- Erlend, A., Tore, K., Tone, M. M. et Jardar, L. (2018). Performance of Blue-Green Roofs in Cold Climates: A Scoping Review. *Buildings*, 8(4), 55. <https://doi.org/10.3390/buildings8040055>

- Eumorfopoulou, E. et Aravantinos, D. (1998). The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy & Buildings*, 27(1), 29-36. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00023-6)
- Facchini, U., Marelli, G. et Canzi, L. (1983). Solar greenhouses with low energy consumption. *Colture Protette*, 12(11), 31-35. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XE8364847>
- Faherty, M. (2010, 20 septembre). [Photographie d'une serre dans la ville de New Milton au Royaume-Uni]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:New_Milton,_glasshouses_-_geograph.org.uk_-_2075242.jpg
- FAO. (2016). *Energy, agriculture and climate change - Toward energy-smart agriculture* (I6382En/1/11.16) [Rapport]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/i6382en/I6382EN.pdf>
- FAO. (2017). *Water for Sustainable Food and Agriculture* [Rapport]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i7959e.pdf>
- FAO. (2020). *Crops and livestock products*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Récupéré le 26 février 2020 de <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP et WHO. (2017). *The state of food security and nutrition in the world 2017 - Building resilience for peace and food security* [Rapport]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i7695e.pdf>
- Farfan, J., Lohrmann, A. et Breyer, C. (2019). Integration of greenhouse agriculture to the energy infrastructure as an alimentary solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.084>
- Ferme Lufa. (2012, 8 février). [Photographie de la serre sur toit d'Ahuntsic-Cartierville des Fermes Lufa à Montréal]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lufa_Farms_Montreal_rooftop_greenhouse_in_Sunlight.jpg
- Ferme Lufa. (2020a). À Propos. Les Fermes Lufa. Récupéré le 26 novembre 2020 de <https://montreal.lufa.com/fr/about>

- Fermes Lufa. (2020b). *Nos fermes*. Les Fermes Lufa. Récupéré le 26 octobre 2020 de <https://montreal.lufa.com/fr/fermes>
- Fumo, N. (2014). A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040>
- Gagnon, M. (2019, 15 juin). Le Centre de données massives de l'Université Laval. *Voir Vert*. <https://www.voirvert.ca/projets/le-centre-donnees-massives-universite-laval>
- Ghosal, M. K. et Tiwari, G. N. (2004). Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar Energy*, 76(5), 603-613. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.004>
- Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J. et Birkved, M. (2016a). Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates. *Journal of Cleaner Production*, 135, 984-994. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.004>
- Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J. et Birkved, M. (2016b). Urban versus conventional agriculture, taxonomy of resource profiles: a review. *Official journal of the Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)*, 36(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0348-4>
- Google Earth. (s.d.). Vue de face. [Image satellitaire montrant une vue de face du bâtiment situé au 1401 rue Legendre O. à Montréal]. Récupéré le 11 mai 2022 de https://earth.google.com/web/@45.53167439,-73.65336943,106.34301624a,0d,35y,-105.4845h,55.9900t,-0.0003r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=fr
- Gouvernement du Canada. (2019). *Sources et puits de gaz à effet de serre : sommaire 2019*. Gouvernement du Canada. Récupéré le 11 mars 2020 de <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/sources-puits-sommaire-2019.html>
- Gouvernement du Canada. (2020). *Progrès vers la cible de réduction des émissions de gaz à effet de serre du Canada*. Gouvernement du Canada. Récupéré le 24 octobre 2020 de <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/progres-cible-reduction-emissions-gaz-effet-serre-Canada.html>

- Graamans, L., Baeza, E., van Den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I. et Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31-43.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>
- Graamans, L., van Den Dobbelsteen, A., Meinen, E. et Stanghellini, C. (2017). Plant factories: crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.003>
- Gupta, M. J. et Chandra, P. (2002). Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. *Energy*, 27(8), 777-794. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00030-0)
- Haberman, D., Gillies, L., Canter, A., Rinner, V., Pancrazi, L. et Martellozzo, F. (2014). The Potential of Urban Agriculture in Montréal: A Quantitative Assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(3), 1101-1117. <https://doi.org/10.3390/ijgi3031101>
- Hage, F. (2013, 7 mai). [Photographie d'une serre sur toit des Fermes Lufa dans la ville de Laval]. Wikimédia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lufa_Farms_Laval_rooftop_greenhouse.jpg
- Hawken, P. (2017). *Drawdown: The Most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming*. Penguins Books.
- Hunold, C., Sorunmu, Y., Lindy, R., Spatari, S. et Gurian, P. (2017). Is Urban Agriculture Financially Sustainable? An Exploratory Study of Small-Scale Market Farming in Philadelphia, Pennsylvania. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 1-17.
<https://doi.org/10.5304/jafscd.2017.072.012>
- Hydro-Québec. (2013). *SIMEB* (Version 3.1.3) [Logiciel]. Hydro-Québec.
- Hydro-Québec. (2020a). *Des tarifs d'électricité avantageux pour les producteurs en serre du Québec* [Communiqué]. Hydro-Québec.
<http://nouvelles.hydroquebec.com/fr/communiqués-de-presse/1629/des-tarifs-delectricite-avantageux-pour-les-producteurs-en-serre-du-quebec/>
- Hydro-Québec. (2020b). *Option d'électricité additionnelle pour l'éclairage de photosynthèse ou le chauffage des espaces destinés à la culture de végétaux*. Hydro-Québec. Récupéré le 7 décembre 2020 de
<https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/tarifs/option-electricite-additionnelle-photosynthese.html>

- Hydro-Québec. (2020c). *Tarif M*. Hydro-Québec. Récupéré le 29 octobre 2020 de <https://www.hydroquebec.com/affaires/espace-clients/tarifs/tarif-m-general-clientele-moyenne-puissance.html#:~:text=Prix%20en%20vigueur%20pour%20le%20tarif%20M&text=Il%20est%20de%2012%20C33,le%201er%20avril%202019>.
- Hydro-Québec. (2022). *Programme Produits agricoles efficaces – volet Éclairage à DEL*. Hydro-Québec. <https://www.hydroquebec.com/affaires/programmes-outils/produits-agricole-volet-eclairage.html>
- IGA. (2017, 19 juillet). *IGA présente le plus grand potager bio sur un toit de supermarché au pays* [Communiqué]. IGA. https://www.iga.net/fr/salle_de_presse/communiques_2017/iga_presente_le_plus_grand_potager_bio_sur_un_toit_de_supermarche_au_pays
- Ikerd, J. (2017). The Urban Agriculture Revival. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 7(3), 13-16. <https://doi.org/10.5304/jafscd.2017.073.007>
- Il-Seok, C., Akhtar, H., Van-Hai, B. et Hak-Man, K. (2018). A Multi-Agent System-Based Approach for Optimal Operation of Building Microgrids with Rooftop Greenhouse. *Energies*, 11(7), 1876. <https://doi.org/10.3390/en11071876>
- Industries Harnois. (s.d.). *Luminosa*. Industries Harnois. Récupéré le 1 novembre 2020 de <https://www.harnois.com/serres/luminosa/>
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E. et Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>
- Kasmi, D., Duchemin, É. et Martin, J. (2020). *Les entreprises agricoles urbaines au Québec: impact économique et potentiel de développement en emplois et revenus*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine du Québec (CRETAU) et Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). http://cretau.ca/wp-content/uploads/2020/06/Etude-Les-entreprises-agricoles-urbaines-au-Qu%3%A9bec-impact-%3%A9conomique-et-potentiel-de-d%3%A9veloppement_F.pdf
- Katzin, D., Marcelis, L. F. M. et van Mourik, S. (2021). Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied energy*, 281.

- Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T. et Bakker, J. (2013). Greenhouse climate control and energy use. Dans FAO (dir.), *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas* (p. 63-95). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
https://www.researchgate.net/publication/283399387_Greenhouse_climate_control_and_energy_use.
- Kokogiannakis, G. et Cooper, P. (2015). Evaluating the environmental performance of indoor plants in buildings. Dans V. Rai Khare et G. Chaudhary (dir.), *BS2015: 14th International Conference of International Building Performance Simulation Association in Hyderabad, India, December 7-9, 2015* (p. 712-719). <https://ro.uow.edu.au/eispapers/5122>
- Korol, E. et Shushunova, N. (2016). Benefits of a Modular Green Roof Technology. *Procedia Engineering*, 161, 1820-1826.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.673>
- Kowal, M. (2021, 21 novembre). [Photographie d'un jardin communautaire à Columbus]. Wikimédia Commons.
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CRC%27s_\(Clintonville-Beechwold_Community_Resources_Center\)_community_Midgarden_in_Autumn_2021.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CRC%27s_(Clintonville-Beechwold_Community_Resources_Center)_community_Midgarden_in_Autumn_2021.jpg)
- Kowalczyk, K., Olewnicki, D., Mirgos, M. et Gajc-Wolska, J. (2020). Comparison of Selected Costs in Greenhouse Cucumber Production with LED and HPS Supplemental Assimilation Lighting. *Agronomy*, 10(9), 1342.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10091342>
- Kozai, T., Niu, G. et Takagaki, M. (2019). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.
- Kurata, K. (1993). Effects of greenhouse orientation and latitude on direct solar radiation transmissivity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 9(2), 52-60.
http://www.tcsae.org/nygcxben/article/abstract/19930209?st=article_issue
- Lanini, S. et Bouzit, M. (2013, décembre). *Les perspectives du stockage thermique et de la géothermie pour le chauffage et la climatisation des serres*. Rencontre Technique: Économies d'énergie sous serre Projet Serre Capteur: résultats et perspectives, Balandran, France. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00951864>

- Lee-Smith, D., Bellows, A., Nasr, J., Mougeot, L., Levenston, M., Mann, P., Brown, K. et Kaufman, J. (2010). On the past and the future of the urban agriculture movement: Reflections in tribute to Jac Smit. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 1(2), 17-39.
<https://doi.org/10.5304/jafscd.2010.012.009>
- Léveillé-Guillemette, F. et Monfet, D. (2018). Calibration d'un modèle énergétique et analyse économique de mesures de conservation d'énergie d'une serre communautaire à Montréal. *eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada in Montréal, Canada, May 9-10, 2018*, 512-521.
https://www.researchgate.net/publication/327630728_Calibration_d%27un_modele_energetique_et_analyse_economique_de_mesures_de_conservation_d%27energie_d%27une_serre_communautaire_a_Montreal
- Li, W. C. et Yeung, K. K. A. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 127-134.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.05.001>
- Liu, R., Zhou, X., Lochhead, S. J., Zhong, Z., Huynh, C. V. et Maxwell, G. M. (2017). Low-energy LED lighting heat gain distribution in buildings, part II: LED luminaire selection and test results. *Science and technology for the built environment*, 23(4), 688-708.
- Ljungqvist, H. M., Mattsson, L., Risberg, M. et Vesterlund, M. (2020). Data center heated greenhouses, a matter for enhanced food self-sufficiency in sub-arctic regions. *Energy*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119169>
- Loi sur le bâtiment*. RLRQ, c. B-1.1, r. 2.
https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/B-1.1,%20r.%202?langCont=fr#ga:l_i-h1
- Malquori, L., Pellegrini, P. et Tesi, R. (1993). Determination of solar energy transmitted by different greenhouse geometries. *Culture Protette*, 22(5), 81-85.
- MAPAQ. (2003). *Étude sur le coûts de production de la tomate de serre* [Rapport]. MAPAQ. <https://www.agrireseau.net/documents/69897/etude-sur-le-co%C3%BBt-de-production-de-la-tomate-de-serre>
- MAPAQ. (2018). *Portrait-diagnostic sectoriel des légumes de serres au Québec* [Rapport]. MAPAQ.
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portaitdiagnosticdeslegumesde_serre_final.pdf

- MAPAQ. (2020a, 14 avril 2020). L'approvisionnement alimentaire au Québec. *Bioclips - Actualité bioalimentaire*, 28(11).
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2020/Volume_28_no11.pdf
- MAPAQ. (2020b). *Programme d'aide financière pour favoriser le développement des serres*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Récupéré le 6 septembre 2021 de
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/md/programmesliste/productio nhorticole/Pages/Programme-developpement-des-serres.aspx>
- MAPAQ. (2020c, 27 novembre). *Québec veut doubler le volume de culture en serre d'ici 5 ans* [Communiqué]. Gouvernement du Québec.
<https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/tout-le-quebec-sinvestit-quebec-veut-doubler-le-volume-de-culture-en-serre-dici-5-ans#:~:text=Il%20s'agit%20d'un,ensemble%20des%20r%C3%A9gions%20du%20Qu%C3%A9bec.>
- Martellozzo, F., Landry, J. S., Plouffe, D., Seufert, V., Rowhani, P. et Ramankutty, N. (2014). Urban agriculture: a global analysis of the space constraint to meet urban vegetable demand. *Environmental Research Letters*, 9(6), 064025.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064025>
- Masanet, E., Lei, N., Shehabi, A., Smith, S. et Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates: Growth in energy use has slowed owing to efficiency gains that smart policies can help maintain in the near term. *Science*, 367(6481), 984-986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
- Matthews, J. et Akhtar-Khavari, A. (2018). Contributing to Nature's Recovery through Urban Agriculture. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*, 5(2), 45-54. <https://doi.org/10.15330/jpnu.5.2.45-54>
- Mattson, N. (2017). *Greenhouse Lighting* [Rapport]. Cornell CALS. <https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/blogs.cornell.edu/dist/b/5759/files/2015/03/Greenhouse-Lighting-27mfc6l.pdf>
- McClintock, N., Cooper, J. et Khandeshi, S. (2013). Assessing the potential contribution of vacant land to urban vegetable production and consumption in Oakland, California. *Landscape and Urban Planning*, 111, 46-58.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.009>

- MELCC. (2018). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990* [Rapport]. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2016/inventaire1990-2016.pdf>
- MELCC. (2020a). *Climat du Québec*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Récupéré le 10 mars 2020 de
<https://environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm>
- MELCC. (2020b). *Engagements du Québec - Nos cibles de réduction d'émissions de GES*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Récupéré le 24 octobre 2020 de
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/engagement-quebec.asp#:~:text=Cible%202020%20%3A%20%2D20%20%25%20sous,so us%20leur%20niveau%20de%201990.>
- MERN. (2020). *Collecte des données énergétiques des ministères et organismes*. Ministère de l'Énergie et Ressources naturelles Québec. Récupéré le 26 octobre 2020 de
<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/affaires/secteurs/secteur-institutionnel/collecte-de-donnees>
- Miller, R. (2010, 3 février). Data Centers Heat Offices, Greenhouses, Pools. *Data Center Knowledge*.
<https://www.datacenterknowledge.com/archives/2010/02/03/data-centers-heat-offices-greenhouses-pools>
- Montero, J. I., Antón, A., Torrellas, M. et Ruijs, M. (2012). An environmental and economic life cycle assessment of Rooftop Greenhouse (RTG) implementation in Barcelona, Spain. Assessing new forms of urban agriculture from the greenhouse structure to the final product level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 350-366.
<https://doi.org/10.1007/s11367-014-0836-9>
- Montero, J. I., Baeza, E., Heuvelink, E., Rieradevall, J., Muñoz, P., Ercilla, M. et Stanghellini, C. (2017). Productivity of a building-integrated roof top greenhouse in a Mediterranean climate. *Agricultural Systems*, 158, 14-22.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.08.002>
- Moody, S. S. et Sailor, D. J. (2013). Development and application of a building energy performance metric for green roof systems. *Energy & Buildings*, 60, 262-269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.002>

- Nadal, A., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., López-Capel, E., Montero, J. I., Josa, A., Rieradevall, J. et Royapoor, M. (2017). Building-integrated rooftop greenhouses: An energy and environmental assessment in the mediterranean context. *Applied Energy*, 187, 338-351. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.051>
- Nadal, A., Pons, O., Cuerva, E., Rieradevall, J. et Josa, A. (2018). Rooftop greenhouses in educational centers: A sustainability assessment of urban agriculture in compact cities. *Science of the Total Environment*, 626, 1319-1331. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.191>
- NASA. (2022). *Carbon Dioxide*. NASA: Global Climate Change - Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- Nawalany, G., Bieda, W., Radoń, J. et Herbut, P. (2014). Experimental study on development of thermal conditions in ground beneath a greenhouse. *Energy & Buildings*, 69, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.020>
- Nelson, J. A. et Bugbee, B. (2014). Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures. *PLoS ONE*, 9(6), e99010. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010>
- Ni, J. et Bai, X. (2017). A review of air conditioning energy performance in data centers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 625-640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.050>
- Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A. et Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy & Buildings*, 33(7), 719-729. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00062-7)
- Niget, J.-M. (2010). *Potentiel énergétique des rejets thermiques industriels au Québec* [Rapport]. Innovagro Consultants. https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/developpement_territorial/ruralite/groupe_travail/potentiel_energetique_rejets_thermiques.pdf
- Nurmi, V., Votsis, A., Perrels, A. et Lehvävirta, S. (2016). Green Roof Cost-Benefit Analysis: Special Emphasis on Scenic Benefits. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 7(3), 488-522. <https://doi.org/10.1017/bca.2016.18>
- O'Sullivan, C. A., Bonnett, G. D., McIntyre, C. L., Hochman, Z. et Wasson, A. P. (2019). Strategies to improve the productivity, product diversity and profitability of urban agriculture. *Agricultural Systems*, 174, 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.05.007>

- OMAFRA. (2010). *Growing Greenhouse Vegetables in Ontario*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs of Ontario.
- OpenStudio. (2020). *OpenStudio*. U.S. Department of Energy.
<https://www.openstudio.net/>
- Oró, E., Depoorter, V., Garcia, A. et Salom, J. (2015). Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 429-445.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.035>
- Orsini, F., Gasperi, D., Marchetti, L., Piovene, C., Draghetti, S., Ramazzotti, S., Bazzocchi, G. et Gianquinto, G. (2014). Exploring the production capacity of rooftop gardens (RTGs) in urban agriculture: the potential impact on food and nutrition security, biodiversity and other ecosystem services in the city of Bologna. *The Science, Sociology and Economics of Food Production and Access to Food*, 6(6), 781-792. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0389-6>
- Palais des congrès de Montréal. (2020, 22 septembre). [Photographie du toit vert du Palais des congrès de Montréal]. Wikimedia Commons.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Le_toit_vert_du_Palais_des_congr%C3%A8s_de_Montr%C3%A9al.jpg
- Paris, J., Houle, J., Bricault, M. et Jackson, H. (1989). Évaluation en vraie grandeur d'écrans thermiques pour serres. *Canadian agricultural engineering*, 31, 81-87. https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/31/31_1_81_ocr.pdf
- Pastore, L., Corrao, R. et Heiselberg, P. K. (2017). The effects of vegetation on indoor thermal comfort: The application of a multi-scale simulation methodology on a residential neighborhood renovation case study. *Energy & Buildings*, 146, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.022>
- Penjiyev, A. (2018). Thermal Regime in Combined Cultivation Constructions. *Applied Solar Energy*, 54(3), 196-204.
<https://doi.org/10.3103/S0003701X18030118>
- Pierre, J., Bisby, L., Anderson, B. et MacDougall, C. (2010). Thermal Performance of Green Roof Panels in Sub-Zero Temperatures. *Journal of Green Building*, 5(2), 91-104. <https://doi.org/10.3992/jgb.5.2.91>
- Piezer, K., Petit-Boix, A., Sanjuan-Delmás, D., Briese, E., Celik, I., Rieradevall, J., Gabarrell, X., Josa, A. et Apul, D. (2019). Ecological network analysis of growing tomatoes in an urban rooftop greenhouse. *Science of the Total Environment*, 651, 1495-1504. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.293>

- Pons, O., Nadal, A., Sanyé-Mengual, E., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., Sanjuan-Delmàs, D., Muñoz, P., Oliver-Solà, J., Planas, C. et Rovira, M. R. (2015). Roofs of the Future: Rooftop Greenhouses to Improve Buildings Metabolism. *Procedia Engineering*, 123(C), 441-448.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.084>
- Poore, J. et Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
<https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Producteurs en serre du Québec. (2020a). *D'hier à aujourd'hui – la serriculture au Québec*. Les Producteurs en serre du Québec. Récupéré le 25 octobre 2020 de <https://www.serres.quebec/historique/>
- Producteurs en serre du Québec. (2020b). *Plan d'action 2019-2020: Doubler la valeur de la production serricole au Québec à l'horizon 2025* [Rapport]. Producteurs en serre du Québec.
https://www.serres.quebec/download/publications/Etudes_et_rapports/Plan_action_2019-2020_suivi_fiche_projet_de_societe_serriculture2250.pdf
- Proulx-Gobeil, G. et Dion, L.-M. (2015). *Évaluation du chauffage à l'électricité pour les serres* [Présentation dans le cadre de la Journée provinciale en serriculture maraîchère et ornementale du CRAAQ]. Gobeil-Dion et Associés Inc.
https://www.agrireseau.net/documents/Document_91386.pdf
- Rangarajan, A. et Riordan, M. (2019). *The Promise of Urban Agriculture: National Study of Commercial Farming in Urban Areas* [Rapport]. United States Department of Agriculture / Agricultural Marketing Service and Cornell University Small Farms Program. https://smallfarms.cornell.edu/wp-content/uploads/2019/12/Promise-of-Urban-Ag_Full_102919-1.pdf
- Rasheed, Lee et Kim. (2019). Optimization of Greenhouse Thermal Screens for Maximized Energy Conservation. *Energies*, 12(19), 3592.
<https://doi.org/10.3390/en12193592>
- RETSscreen. (2021). *RETSscreen Expert* (Version 8.1.2.13) [Logiciel]. Ressources naturelles Canada.
- Romeo, D., Veà, E. B. et Thomsen, M. (2018). Environmental Impacts of Urban Hydroponics in Europe: A Case Study in Lyon. *Procedia CIRP*, 69, 540-545.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.048>

- Rothwell, A., Ridoutt, B., Page, G. et Bellotti, W. (2016). Environmental performance of local food: trade-offs and implications for climate resilience in a developed city. *Journal of Cleaner Production*, 114, 420-430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.096>
- Runkle, E. (2013). Turning On/Off Supplemental Lighting. *GPN: Greenhouse Products News*, 66. <https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/lighting-settings.pdf>
- Runkle, E. (2014). LEDs vs. HPS Lamps: A Reality Check. *GPN: Greenhouse Products News*, 54. <https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/leds-vs-hps.pdf>
- Sabic. (2020). *General purpose multiwall sheet products*. Récupéré le 1 novembre 2020 de <https://sfs.sabic.eu/product/lexan-thermoclear-sheet/general-purpose-multiwall-sheet-products/>
- Sanjuan-Delmás, D., Llorach-Massana, P., Nadal, A., Ercilla-Montserrat, M., Muñoz, P., Montero, J. I., Josa, A., Gabarrell, X. et Rieradevall, J. (2018). Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities. *Journal of Cleaner Production*, 177, 326-337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.147>
- Sanyé-Mengual, E., Cerón-Palma, I., Oliver-Solà, J., Montero, J. I. et Rieradevall, J. (2013). Environmental analysis of the logistics of agricultural products from roof top greenhouses in Mediterranean urban areas. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(1), 100-109. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5736>
- Sanyé-Mengual, E., Cerón-Palma, I., Oliver-Solà, J., Montero, J. I. et Rieradevall, J. (2015). Integrating Horticulture into Cities: A Guide for Assessing the Implementation Potential of Rooftop Greenhouses (RTGs) in Industrial and Logistics Parks. *Journal of Urban Technology*, 22(1), 87-111. <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942095>
- Sanyé-Mengual, E., Martinez-Blanco, J., Finkbeiner, M., Cerdà, M., Camargo, M., Ometto, A. R., Velásquez, L. S., Villada, G., Niza, S., Pina, A., Ferreira, G., Oliver-Solà, J., Montero, J. I. et Rieradevall, J. (2018). Urban horticulture in retail parks: Environmental assessment of the potential implementation of rooftop greenhouses in European and South American cities. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3081-3091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.103>

- Seguin, R., Cohen, A., Vézina, M.-J. et Duchemin, É. (2021). *Fiche technique et économique : production maraîchère urbaine en serre sur toit ou au sol*. Carrefour de recherche, d'expertise et de transfert en agriculture urbaine du Québec (CRETAU) et Laboratoire sur l'agriculture urbaine (AU/LAB). http://cretau.ca/wp-content/uploads/2021/04/Fiche-technique_et_economique_Serriculture-urbaine-3.pdf
- Semple, L., Carriveau, R. et Ting, D. S. K. (2017). Assessing heating and cooling demands of closed greenhouse systems in a cold climate. *International Journal of Energy Research*, 41(13), 1903-1913. <https://doi.org/10.1002/er.3752>
- Serres Harnois. (2017). *Catalogue 2017* [Catalogue de produits]. Serres Harnois. https://www.harnois.com/wp-content/uploads/2018/04/Catalogue_Fran%C3%A7ais.pdf
- Serres Toundra. (2020). *À propos des Serres Toundra*. Serres Toundra. Récupéré le 22 novembre 2020 de <https://www.serrestoundra.com/a-propos#section-implication>
- Sethi, V. P., Sumathy, K., Lee, C. et Pal, D. S. (2013). Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy*, 96, 56-82. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.034>
- Shafique, M., Kim, R. et Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757-773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
- Shelford, T. J. et Both, A. J. (2020). Plant Production in Controlled Environments. Dans N. M. Holden, M. L. Wolfe, J. A. Ogejo et E. J. Cummins (dir.), *Introduction to Biosystems Engineering*. Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) et Virginia Tech Publishing. https://doi.org/10.21061/IntroBiosystemsEngineering/Plant_Controlled_Environment.

- Shukla, P. R., Skea, J., Buendia, E. C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., P. Zhai, R. S., Connors, S., Diemen, R. v., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J. P., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M. et Malley, J. (2019). *Summary for Policymakers - Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [Rapport]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf
- Sims, R., Flammini, A., Puri, M. et Bracco, S. (2015). *Opportunities for agri-food chains to become energy-smart* [Rapport]. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/card/fr/c/0ca1c73e-18ab-4dba-81b0-f8e480c37113/>
- Smit, J., Nasr, J. et Ratta, A. (2001). *Urban Agriculture: Food, Jobs, and Sustainable Cities - 2001 Edition*. The Urban Agriculture Network.
<http://www.jacsmit.com/book.html>
- Sodha, M. S., Srivastava, N. S. L., Ghosal, M. K. et Tiwari, G. N. (2004). Thermal modelling and experimental validation of ground temperature distribution in greenhouse. *International journal of energy research.*, 28, 45-64.
<https://doi.org/10.1002/er.950>
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H. et Dierich, A. (2014). Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Journal of the Agriculture, Food, and Human Values Society*, 31(1), 33-51. <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4>
- Syndicat des producteurs en serre du Québec. (2009). Fiche d'information #4: Démarche pour évaluer l'utilisation de la géothermie pour le chauffage des serres au Québec. *La boîte à outils des serriculteurs*, 1(4).
https://www.agrireseau.net/documents/75507/demarche-pour-evaluer-1_utilisation-de-la-geothermie-pour-le-chauffage-des-serres-au-quebec?r=bo%C3%A0Ete+outils+serriculteur&a=1
- Syndicat des producteurs en serre du Québec. (2013). *La serriculture sur les toits en milieu urbain - Perspectives de développement dans le contexte québécois* [Rapport]. Syndicat des producteurs en serre du Québec.
https://www.serres.quebec/wfb_filepage/rapport-serriculture-sur-les-toits-milieu-urbain-psq-2013-pdf/

- Talbot, M.-H. et Monfet, D. (2018). Impact des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégré au bâtiment: Implantation d'un modèle de plantes. *eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada in Montréal, Canada, May 9-10, 2018*, 453-462.
https://www.researchgate.net/publication/341638797_Impact_des_plantes_sur_les_charges_d'un_espace_d'agriculture_integre_au_batiment_Implantation_d'un_modele_de_plantes
- Talbot, M.-H. et Monfet, D. (2020). Estimating the impact of crops on peak loads of a Building-Integrated Agriculture space. *Science and technology for the built environment*, 26(10), 1448-1460.
<https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1806594>
- Tang, X. et Qu, M. (2016). Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates. *Energy & Buildings*, 121, 165-175.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.069>
- Tataraki, K., Giannini, E., Kavvadias, K. et Maroulis, Z. (2020). Cogeneration Economics for Greenhouses in Europe. *Energies*, 13(13), 3373.
<https://doi.org/10.3390/en13133373>
- Teemusk, A. et Mander, Ü. (2009). Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia. *Building and Environment*, 44(3), 643-650. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.011>
- Teotónio, I., Silva, C. M. et Cruz, C. O. (2018). Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 199, 121-135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.084>
- Theodosiou, T., Aravantinos, D. et Tsikaloudaki, K. (2014). Thermal behaviour of a green vs. a conventional roof under Mediterranean climate conditions. *International Journal of Sustainable Energy*, 33(1), 227-241.
<https://doi.org/10.1080/14786451.2013.772616>
- Tong, Y., Kozai, T., Nishioka, N. et Ohyama, K. (2010). Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). *Biosystems Engineering*, 106(4), 405-411.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.05.003>
- Topcuoglu, K. et Unal, H. B. (2019). Design of Greenhouses with High Light Transmittance: An Implementation in Two Different Conditions. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 7(4), 152-161.
<https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20190704.15>

- Torres, A. P. et Lopez, R. G. (2010). Measuring daily light integral in a greenhouse (HO-238-W). *Purdue Extension*.
<https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ho/ho-238-w.pdf>
- Transition Énergétique Québec. (2018). *Complément à l'État de l'énergie au Québec 2019 : Feuillelet d'information sur les prix de l'énergie* [Rapport]. Transition Énergétique Québec. http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2018/12/EEQ2019_TEO-Feuillet_PrixEnergie_FINAL.pdf
- Turcotte, G., Larouche, R., Carrier, A. et Lambert, L. (2015). *Production de la tomate de serre au Québec* [Rapport]. Agrisys Consultants.
<https://www.agrireseau.net/documents/95590/production-de-la-tomate-de-serre-au-quebec-guide-technique-de-297-pages>
- UN-Habitat. (2016). *Urbanization and development: Emerging futures - World cities report 2016* (HS/038/16E) [Rapport]. United Nations Human Settlements Programme. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/WCR-2016-WEB.pdf>
- UPA. (2008). *Énergies alternatives durables en milieu agricole* [Fiche technique]. Union des producteurs agricoles du Québec, Hydro-Québec et Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec.
<https://www.agrireseau.net/documents/74700/energies-alternatives-durables-en-milieu-agricole>
- UPA. (2017). *Avis sur les mesures susceptibles d'améliorer les pratiques tarifaires dans le domaine de l'électricité et du gaz naturel* (R-3972-2016) [Rapport]. Union des producteurs agricoles du Québec. <https://www.upa.qc.ca/wp-content/uploads/filebase/fr/memoires/Memoire-UPA-Regie-de-lenergie-R-3972-2016.pdf>
- Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., van Henten, E. J. et de Visser, P. H. B. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering*, 110(4), 363-377.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>
- Ville de Montréal. (2018, 14 septembre). *La Ville de Montréal signe la One Planet Charter et s'engage à aller plus loin dans sa lutte contre les changements climatiques* [Communiqué]. Ville de Montréal.
http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=5798,42657625&_dad=portal&_schema=PORTAL&id=30648

- Ville de Saint-Félicien. (2019). *Serres Toundra*. Saint-Félicien naturellement. Récupéré le 22 novembre 2020 de <https://www.ville.stfelicien.qc.ca/fr/citoyens/les-grands-projets/serres-toundra/>
- Ward, R., Choudhary, R., Cundy, C., Johnson, G. et McRobie, A. (2015). Simulation of plants in buildings; incorporating plant-Air interactions in building energy simulation. *BS2015: 14th International Conference of International Building Performance Simulation Association in Hyderabad, India, December 7-9, 2015*, 2256-2263. <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2219.pdf>
- Watson, J., Gómez, C., Buffington, D., Bucklin, R., Henley, R. et McConnell, D. (2019). Greenhouse Ventilation (AE-10). *IFAS Extension*. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE030>
- Wees, D., Gaudreau, L., Drolet, F. et Boudreau, J.-M. (1996). *Guide de production pour la laitue en serre (AGDEX 290/20)*. Conseil des productions végétales du Québec.
- Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A. et Maidment, G. (2014). Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. *Building and Environment*, 82, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.021>
- WHO et UNICEF. (2017). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines* [Rapport]. World Health Organization (WHO) / United Nations Children's Fund (UNICEF). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241512893>
- Wong, N. H., Chen, Y., Ong, C. L. et Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 38(2), 261-270. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00066-5)
- Zamir, N., Medan, G., Arbel, A. et Levav, N. (1984). The influence of climatic conditions on the heat losses from conventional and sloping greenhouses. Dans T. H. Short, *Acta Horticulturae 148: III International Symposium on Energy in Protected Cultivation* (p. 319-328). ISHS. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1984.148.41>
- Zhao, M., Srebric, J., Berghage, R. D. et Dressler, K. A. (2015). Accumulated snow layer influence on the heat transfer process through green roof assemblies. *Building and Environment*, 87, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.018>