

DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS DE
PERFORMANCE POUR LA CARACTÉRISATION
D'ESPACE D'AGRICULTURE EN ENVIRONNEMENT
CONTÔLÉ À L'AIDE DE MODÈLES NUMÉRIQUES

par

William SYLVAIN

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉNERGIES
RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

M. Sc. A

MONTRÉAL, LE 5 AOÛT 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



William Sylvain, 2025



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

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Danielle Monfet, directrice de mémoire
Département de construction à l'École de technologie supérieure

M. Didier Haillot, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, président du jury
Département de construction à l'École de technologie supérieure

M. Andrew Henderson, membre du jury
Département de construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 16 JUILLET 2025
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

I'm still standing

Elton John

REMERCIEMENTS

Ayant obtenu un baccalauréat en génie appliqué au monde technique du milieu rural, je suis arrivé à l’ÉTS avec la motivation de repousser mes limites et d’approfondir mes connaissances. Ce parcours fut une véritable montagne russe d’émotions, de succès, de déceptions, mais surtout d’apprentissages et de rigueur – des qualités que je conserverai tout au long de ma carrière. Je tiens donc à remercier les personnes qui m’ont accompagné tout au long de cette aventure.

En premier lieu, je remercie ma codirection de mémoire, Danielle Monfet et Didier Haillot, pour leur accompagnement constant tout au long de ma maîtrise. Grâce à leur encadrement complémentaire et bienveillant, j’ai pu franchir la grande marche entre l’étudiant arrivé en janvier 2023 et celui qui dépose ce mémoire. Je me suis senti privilégié d’avoir pu compter sur une équipe toujours disponible pour répondre à mes questions, m’offrir de précieux conseils et challenger mon travail. Qu’il s’agisse du projet avec le CRAAQ, de Ferme d’Hiver, de la ferme conteneur ou du présent mémoire, collaborer avec vous a été un immense plaisir et un véritable honneur.

Je remercie également les partenaires du projet : Charlotte Giard-Laliberté du CÉTAB+, Gilbert Larochelle-Martin et ses collègues d’Hydro-Québec, ainsi que Timothé Lalonde de Ferme d’Hiver, pour leur suivi et leur précieuse contribution.

Un grand merci aussi à mes collègues du LTSB. Les discussions passionnées autour des dîners et les activités sociales ont été une source de motivation et de plaisir. Un remerciement particulier à Vincent, mon premier voisin de bureau, pour son soutien durant les premiers mois, et à Arnaud pour le partage de ses connaissances liées notamment à ce projet.

Sans oublier les merveilleuses personnes qui m’ont soutenu durant ces années. Merci à Alexandre de m’avoir encouragé à persévérer dans les moments difficiles, à Irenka, Juliette et Sabrina pour vos conseils et nos discussions enrichissantes sur nos projets respectifs. Merci à l’AEETS pour la confiance accordée et les responsabilités offertes, notamment l’organisation

VIII

de la Rentrée 2024 – l'une des plus belles expériences de ma vie. Merci à la grande famille des Jeux de Génie, qui a su m'apporter du réconfort et du plaisir entre deux sessions d'écriture. Enfin, un merci tout spécial à la famille du 2591, qui m'a accueilli chaleureusement dans son chez-soi. Ce fut un bonheur de partager ces derniers mois à vos côtés.

À vous tous, ce fut un privilège de vous avoir dans mon parcours.

Développement d'indicateurs de performance pour la caractérisation d'espace d'agriculture en environnement contrôlé à l'aide de modèles numériques

WILLIAM SYLVAIN

RÉSUMÉ

La production séricole au Québec, soutenue par des politiques visant une plus grande autonomie alimentaire, pose des défis majeurs en matière de performance énergétique. Or, la littérature scientifique dans ce domaine reste morcelée : les indicateurs de performance (IDP) utilisés sont souvent hétérogènes, centrés sur des aspects agronomiques ou énergétiques, et rarement adaptés aux conditions nordiques. De plus, peu d'approches offrent une méthode structurée pour relier les sorties de modèles numériques à des indicateurs réellement utiles pour l'analyse et la prise de décision en agriculture en environnement contrôlé (AEC).

Ce mémoire vise à développer un cadre d'évaluation standardisé pour analyser la performance thermique, radiative et énergétique des espaces AEC à l'aide d'indicateurs de performance. Pour ce faire, deux approches de modélisation sont utilisées : un modèle quasi-statique simplifié, intégré à un chiffrier Excel, et un modèle dynamique détaillé, simulé sous TRNSYS. L'objectif est d'identifier, tester et comparer des IDP, tout en évaluant la capacité des deux outils à produire des résultats fiables, reproductibles et utiles dans divers contextes québécois.

L'analyse a permis de sélectionner 10 indicateurs parmi un corpus initial de 16 issus de la littérature, en privilégiant ceux qui sont à la fois représentatifs, non redondants et applicables à différents types d'espace AEC. Ces indicateurs thermiques, radiatifs et énergétiques ont été évalués selon trois climats du Québec, afin de tester leur application. À la suite de l'analyse de leurs avantages et limites, deux nouveaux indicateurs ont été proposés : la saison de croissance thermique limite ($TGSL_{Limit}$), qui combine les contraintes de température et d'éclairage pour estimer la période réellement favorable à la culture sans apport énergétique externe. Ce dernier a permis de révéler une saison de croissance plus courte d'un à deux mois que celle estimée à partir d'indicateurs traditionnels.

Ce travail propose ainsi une méthode complète, flexible et reproductible pour l'évaluation de la performance des espaces AEC. En combinant modélisation numérique et sélection rigoureuse d'indicateurs, il fournit un outil concret pour améliorer la conception, la planification énergétique et les stratégies culturales en environnement contrôlé. Cette approche contribue à une agriculture plus durable, résiliente et adaptée aux conditions climatiques du Québec.

Mots clés : indicateurs de performance, serres, performance énergétique, simulation thermique dynamique, modélisation énergétique de serre

X

Development of performance indicators for the characterization of controlled environment agriculture spaces using numerical models

WILLIAM SYLVAIN

ABSTRACT

Greenhouse production in Quebec, driven by policies aimed at greater food autonomy, faces significant challenges in terms of energy performance. However, the scientific literature in this field remains fragmented: key performance indicators (KPI) are often heterogeneous, focused on either agronomic or energy aspects, and rarely tailored to northern climate conditions. Moreover, few approaches offer a structured method to link numerical model outputs with indicators that are truly useful for analysis and decision-making in controlled environment agriculture (CEA).

This thesis proposes a standardized evaluation framework to analyze the performance of agricultural greenhouses using key performance indicators. Two modeling approaches are used: a simplified quasi-static model built in Excel, and a detailed dynamic model simulated in TRNSYS. The objective is to identify, test, and compare relevant KPI while assessing the ability of both tools to generate reliable, reproducible, and actionable results in different Quebec contexts.

The analysis led to the selection of 10 indicators from an initial set of 16 found in the literature, prioritizing those that are representative, non-redundant, and applicable to various CEA types. These thermal, radiative, and energy indicators were evaluated across three Quebec climates to assess their robustness and applicability. Based on their strengths and limitations, two new indicators were introduced: the Thermal Growing Season Limit $TGSL_{Limit}$, which measures the actual growing season length based on a critical thermal threshold, and the Overall Growing Season Length ($OGSL$), which integrates both temperature and lighting constraints to estimate the period truly favorable to crop growth without external energy inputs. This latter indicator revealed growing seasons that are one to two months shorter than those estimated by the traditional KPI.

This work thus proposes a complete, flexible, and reproducible method for evaluating CEA performance. By combining numerical modeling with a rigorous selection of standardized indicators, it provides a practical tool for improving design, energy planning, and crop strategies in controlled environments. This approach contributes directly to a more sustainable and resilient agriculture, adapted to Quebec's climate realities.

Keywords: key performance indicators, greenhouses, energy performance, building performance simulation, greenhouse energy modeling

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Portrait de la culture en serre au Québec	3
1.1.1 Pratiques courantes de cultures en serre au Québec	7
1.1.2 Enjeux de la culture en serre au Québec.....	10
1.2 Modèles numériques	11
1.2.1 Modèle numérique statique.....	12
1.2.2 Modèle numérique quasi-statique	13
1.2.3 Modèle numérique dynamique	14
1.3 Indicateurs de performances	16
1.3.1 Indicateurs thermiques	17
1.3.1.1 Température intérieure.....	17
1.3.1.2 Oscillation de la température	18
1.3.1.3 Indice de confort thermique.....	19
1.3.1.4 Durée de la saison de croissance thermique	20
1.3.1.5 Degré-jour de croissance.....	21
1.3.1.6 Déficit de pression de vapeur.....	22
1.3.2 Indicateurs radiatifs.....	23
1.3.2.1 Intégrales de l'éclairage journalier.....	24
1.3.2.2 Facteur d'autonomie solaire.....	24
1.3.3 Indicateur photo-thermique.....	26
1.3.4 Indicateurs énergétiques.....	26
1.3.4.1 Consommation d'énergie	27
1.3.4.2 Consommation d'énergie spécifique.....	27
1.3.4.3 Appel de puissance maximal	28
1.4 Synthèse de la revue de littérature	30
CHAPITRE 2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET CONTRIBUTION ATTENDUE	33
2.1 Description des modèles	33
2.1.1 Modèle quasi-statique	34
2.1.2 Modèle dynamique.....	35
2.2 Validation des modèles	36
2.3 Étude de cas : analyse des différents climats étudiés.....	37
2.3.1 Température extérieure	38
2.3.2 Rayonnement solaire.....	39
2.4 Contribution attendue.....	40

CHAPITRE 3 MODÈLE QUASI-STATIQUE	43
3.1 Description du modèle	43
3.2 Validation du calcul	51
3.3 Étude de cas	53
3.4 Résultats et discussion	54
3.4.1 Sélection des indicateurs de performance pertinents	55
3.4.2 Analyse des indicateurs de performance.....	56
CHAPITRE 4 MODÈLE DYNAMIQUE : STANDARDISED FRAMEWORK FOR ANALYSIS OF GREENHOUSE PERFORMANCE USING KEY PERFORMANCE INDICATORS.....	59
4.1 Abstract	59
4.2 Introduction.....	60
4.3 Methods.....	63
4.3.1 Key performance indicators selection.....	65
4.3.2 Greenhouse model	65
4.3.3 KPI analysis	67
4.3.4 Enhancement of KPI.....	67
4.4 Results and discussion	68
4.4.1 Selection of Key performance indicators.....	68
4.4.1.1 Review of commonly used KPI	69
4.4.1.2 Identification of the relevant indicators	77
4.4.2 Verification of the greenhouse model.....	78
4.4.3 Calculation and comparison of KPI.....	80
4.4.3.1 Thermal indicators	81
4.4.3.2 Daylighting indicators.....	90
4.4.3.3 Energy indicators	93
4.4.4 Assessment of gaps and limitations	97
4.4.5 Review and improvement of KPI	99
4.5 Conclusions.....	102
DISCUSSION ET CONCLUSION	105
RECOMMANDATIONS	109

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Proportion du nombre d'entreprises en production selon la période de début et de fin au Québec.....	8
Tableau 1.2	Caractéristique spécifique et travaux pertinents de quatre différents outils numériques de simulation dynamique.....	16
Tableau 1.3	Travaux pertinents sur des modèles numériques et des IDP couramment utilisées selon leurs classes	31
Tableau 2.1	Caractéristiques des climats étudiés.....	38
Tableau 3.1	Liste des équations de l'outil de calculs quasi-statique	48
Tableau 3.2	Validation de l'outil quasi-statique	52
Tableau 3.3	Caractéristiques des serres étudiées	54
Tableau 3.4	Indicateurs de performances du modèle quasi-statique générés pour les deux serres à l'étude.....	56
Tableau 4.1	Compared climatic regions	64
Tableau 4.2	Performance indicators in the literature	75
Tableau 4.3	Summary of selected KPI	77
Tableau 4.4	Measured versus simulated indicators for the greenhouse located in Victoriaville	80
Tableau 4.5	Simulated indoor air temperature distributions in the greenhouse for a cold climate (Montréal).....	82
Tableau 4.6	Simulated indoor air temperature distributions in the greenhouse for a very cold climate (Baie-Comeau)	82
Tableau 4.7	Simulated indoor air temperature distributions in the greenhouse for a subarctic climate (Kuujjuaq).....	83
Tableau 4.8	Simulated yearly thermal indicators in the greenhouse across different climates	86

Tableau 4.9	Simulated global daylighting indicators in the greenhouse for each climate	92
Tableau 4.10	Simulated global energy indicators in the greenhouse for each climate... ...	96
Tableau 4.11	Advantages and limitations of the generated KPI.....	98
Tableau 4.12	Modified TGSL compared to its initial value for each climate	101

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Évolution de la superficie en serre au Québec de 2019 à 2024	4
Figure 1.2	Répartition du nombre d'entreprises et de la superficie totale pour chaque classe de superficies (petite : 0-999 m ² , moyenne : 1 000 à 4 999 m ² et grande : 5 000 m ² et plus)	5
Figure 1.3	Superficie par région administrative (a) présentée pour tout Québec et (b) détaillée pour le sud de la province.....	6
Figure 1.4	Proportion des entreprises ayant déclaré posséder un certain type de serre et proportion de ceux-ci au Québec	7
Figure 1.5	Proportion des entreprises utilisant une certaine source d'énergie selon le type de serre	9
Figure 1.6	Proportion des entreprises produisant au moins l'une des différentes cultures selon le type de serre	9
Figure 2.1	Moyenne hebdomadaire de la température extérieure selon la normale climatique (1991-2020) pour trois climats représentatifs du Québec	38
Figure 2.2	Moyenne hebdomadaire du rayonnement solaire extérieur maximum quotidien selon la normale climatique (1991-2020) pour trois climats représentatifs du Québec.....	40
Figure 3.1	Forme de serres	44
Figure 3.2	Bilan thermique considéré pour l'outil de calcul statique	45
Figure 3.3	Aperçu de l'approche de calcul.....	46
Figure 4.1	Research methodology	63
Figure 4.2	Existing Gothic arch greenhouse under study	66
Figure 4.3	Measured versus simulated indicators for the greenhouse located in Victoriaville for March 2023 for (a) indoor temperature and (b) DLI	79
Figure 4.4	Simulated monthly temperature swing in the greenhouse for each climate: (a) unheated greenhouse, (b) heated at 5°C, and (c) heated at 15°C.....	85

Figure 4.5	Simulated monthly and cumulated degree-days in the greenhouse for each climate for a 5 °C base	87
Figure 4.6	Simulated VPD in the greenhouse for each climate for (a) the unheated greenhouse, (b) heated at 5°C and (c) heated at 15°C	89
Figure 4.7	Simulated average monthly DLI in the greenhouse for each climate	91
Figure 4.8	Simulated monthly energy use intensity (EUI) for each climate for a greenhouse (a) heated at 5°C and (b) heated at 15°C	93
Figure 4.9	Simulated cumulated energy use intensity (<i>EUI</i>) and unmet temperature hours (<i>UHT</i>) for each climate for (a) and (b) heated at 5°C, (c) and (d) heated at 15°C	95
Figure 4.10	Simulated monthly peak energy demand for each climate for the greenhouse (a) heated at 5°C and (b) heated at 15°C	96

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CÉTAB+	Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité
CEA	Controlled environment agriculture
CFD	Computational fluid dynamic ou étude numérique de la mécanique des fluides
CRAAQ	Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement de l'air
CV-RMSE	Coefficient of variance of the root mean squared error ou coefficient de variance de l'erreur quadratique moyenne
CWEC	Canadian Weather year for Energy Calculation
EPVI	Enceinte de production végétale intérieure
FMCCE	Fichier météo pour le calcul énergétique
IDP	Indicateur de performance
KPI	Key Performance Indicator
LAI	Leaf area index ou indice de surface foliaire
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MAE	Mean absolute error ou erreur absolue moyenne
NMBE	Normalized mean bias error ou erreur moyenne normalisée
PAR	Photosynthetically active radiation ou rayonnement photosynthétiquement actif
PPFD	Photosynthetic photon flux density ou densité de flux de photons photosynthétiques
RMSE	Root mean squared error ou erreur quadratique moyenne
R ²	Coefficient de détermination
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
STD	Simulation thermique dynamique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

η	Efficacité moyenne de combustion ou de l'unité de chauffage	-
ρ	Masse volumique de l'air	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
A_{sol}	Empreinte (superficie) au sol de la serre	m^2
A_x	Aire de la surface x	m^2
CC	Capacité calorifique brute de la source d'énergie	kJ
c_p	Chaleur spécifique de l'air	$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
DLI	Intégrale de l'éclairage journalier	Daily Light Integral
DAF	Facteur d'autonomie solaire	Daylight autonomy factor
E	Consommation d'énergie	Energy Consumption
e	Coefficient de captage de radiation solaire du revêtement	-
E_b'	Rayonnement solaire total sur une surface horizontale utilisée pour les calculs	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
EUI	Intensité énergétique	Energy use intensity
GDD	Degrés-jours de croissance	Growing degree days
K	Facteur de construction	-
L	Périmètre de la serre	m
N	Taux d'infiltration d'air de la serre	h^{-1}
P	Appel de puissance maximal	Peak demand
P_n	Puissance instantanée de chauffage nécessaire pour équilibrer le bilan thermique	W

PAR	Rayonnement photosynthétiquement actif	Photosynthetically active radiation	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
PPFD	Densité de flux de photons photosynthétiques	Photosynthetic Photon Flux Density	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$
PTR	Ratio photo-thermique	Photothermal ratio	$\text{mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{degrés-jours}^{-1}$
q_{murs} :	Pertes par les murs de la serre		W
q_{toit} :	Pertes issues du toit de la serre		W
q_{sol}	Perte par le sol dû au périmètre		W
q_{inf}	Perte par infiltration de la serre		W
q_r	Gain dû au rayonnement solaire		W
Q_c	Consommation mensuelle d'énergie		variable
Q_m	Consommation mensuelle de chauffage		Wh
Q_n	Quantité d'énergie requise chaque heure		Wh
OC	Indice de surchauffe	Overcooling index	heures
OGSL	Saison de croissance globale	Overall growing season length	jours
OH	Indice de gel	Overheating index	heures
SEU	Consommation énergétique spécifique	Specific energy use	$\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$
TCI	Indice de confort thermique	Thermal comfort index	heures
TGSL	Durée de la saison de croissance thermique	Thermal growing season length	jours
VPD	Déficit de pression de vapeur	Vapour pressure deficit	kPa
$\bar{T}_{a_i,ND}, \bar{T}_{a_i,D}, \bar{T}_{a_i,N}$	Température moyenne (nychthemeron, jour, nuit)	Mean temperature (nychthemeron, daytime, nighttime)	°C

$T_{a_i,\max}$	Températures maximales et minimales	Peak temperatures	°C
$T_{a_i,\min}$			
$T_{a_i\text{-swing}}$	Oscillation de température	Temperature swing	°C
T_{int}	Température de consigne		K
T_{ext}	Température extérieure		K
T_{sol}	Température du sol		
$\text{TGSL}_{\text{limit}}$	Durée de la saison de croissance thermique limite	Thermal growing season length limit	jours
U_{ds}	Coefficient de déperdition par surface au sol		$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
U_{H_T}	Heures de température non satisfaites	Unmet temperature hours	heures
U_p	Coefficient de perte thermique par le périmètre		$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
U_x	Coefficient de transfert thermique du revêtement de la surface x		$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
V_{int}	Volume intérieur de la serre considéré		m^3

INTRODUCTION

Les récentes perturbations provoquées par la pandémie de COVID-19, les tensions géopolitiques et les changements climatiques ont mis en évidence la dépendance accrue des sociétés envers des chaînes d'approvisionnement alimentaires longues et parfois peu flexibles. Cette situation a ravivé les préoccupations liées à la sécurité alimentaire et à la capacité de celles-ci à produire localement une partie significative de leurs denrées. Pour une région nordique comme le Québec, où la saison de culture en champs est courte et les importations jouent un rôle central dans l'approvisionnement en fruits et légumes, ces enjeux prennent une importance particulière. Dans ce contexte, le développement d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC), notamment pour la culture en serre, apparaît comme une solution prometteuse pour renforcer l'autonomie alimentaire tout en répondant aux besoins d'adaptation aux changements climatiques (Radio-Canada, 2021).

Cette dynamique s'est traduite au cours des dernières années par une expansion importante des superficies de culture en serre au Québec. En 2023, la production de fruits et légumes en serre représentait plus de 260 M\$, et le secteur continue d'afficher une croissance soutenue d'année en année (Canada, 2024b). En 2024, la superficie de culture en serre au Québec atteignait près de 190 ha (Gouvernement du Québec, 2024), soutenue par des initiatives gouvernementales visant à doubler la surface cultivée en réponse aux objectifs d'autonomie alimentaire (Gouvernement du Québec, 2020). Cette croissance soulève de nouveaux enjeux, dont la nécessité d'améliorer l'efficacité des systèmes agricoles sur le plan environnemental et énergétique (Québec, 2023). Les serres offrent l'avantage de prolonger la saison de culture, de produire hors saison et de maintenir des conditions climatiques internes contrôlées. Toutefois, ces avantages s'accompagnent d'une demande énergétique importante, liée notamment au chauffage, à l'éclairage et à la ventilation (Québec, 2023). Dans un climat nordique comme celui du Québec, le chauffage représente souvent la principale source de consommation d'énergie, et les énergies fossiles demeurent prédominantes malgré les incitatifs à l'électrification (Gouvernement du Québec, 2024). Dans un contexte où la décarbonation du

secteur énergétique est une priorité, l'amélioration de l'efficacité énergétique des serres devient essentielle pour assurer leur viabilité à long terme (Pelletier & Godbout, 2017).

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective en visant le développement d'une méthode standardisée pour comparer la performance des serres à partir d'un ensemble structuré d'indicateurs de performance (IDP) pertinents, représentatifs et adaptés au contexte spécifique des serres. L'objectif principal est ainsi de proposer une démarche comparative rigoureuse permettant d'évaluer et d'améliorer les performances des espaces AEC. Pour ce faire, trois sous-objectifs ont été élaborés : (1) proposer des IDP pertinents, adaptés au contexte nordique, en s'appuyant sur la littérature et les besoins actuels du secteur; (2) développer et utiliser des modèles numériques permettant de calculer ces indicateurs dans divers scénarios de climat et d'opération, en combinant des approches de simulation quasi-statique et dynamique; et (3) compléter une analyse comparative des résultats pour évaluer la sensibilité, la complémentarité et les limites des indicateurs, dans le but de raffiner leur sélection et formuler des recommandations pour améliorer l'analyse de performance et favoriser la standardisation des pratiques dans les environnements AEC.

La structure du mémoire reflète la progression logique de la démarche de recherche. Le CHAPITRE 1 présente une revue de littérature qui dresse d'abord un portrait de la culture en serre au Québec, puis explore les approches de modélisation numérique ainsi que les indicateurs de performance couramment utilisés dans les domaines agronomiques et du bâtiment, susceptibles d'être pertinents pour l'évaluation des serres. Le CHAPITRE 2 décrit la démarche de recherche adoptée, incluant les critères de sélection des IDP, ainsi que la présentation des deux modèles numériques utilisés. Le CHAPITRE 3 est consacré à un modèle numérique quasi-statique, accompagné de la validation de celui-ci et d'une analyse des indicateurs qu'il permet de générer selon différents scénarios. Enfin, le CHAPITRE 4, rédigé sous forme d'article scientifique, propose l'évaluation comparative des IDP dans des contextes climatiques variés à l'aide d'un modèle numérique dynamique développé avec l'outil TRNSYS (Klein, Duffie, & Beckman, 2017), en vue d'évaluer leur pertinence et de formuler des recommandations d'amélioration.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la revue de littérature et vise à présenter les concepts clés qui seront mobilisés dans les sections suivantes. Il s'articule autour de plusieurs axes majeurs. Dans un premier temps, un état des lieux de la culture en serre au Québec sera dressé (section 1.1). Cette section permettra de situer cette recherche dans le contexte actuel du secteur, en mettant en lumière ses enjeux, son évolution et les défis auxquels il fait face. Ensuite, l'étude portera sur les modèles numériques utilisés dans le domaine des serres (section 1.2) en examinant leur fonctionnement, leurs applications et leur pertinence pour l'utilisation dans le secteur serricole. Par la suite, les différents indicateurs de performance applicables à cette recherche seront explorés (section 1.3). Une attention particulière sera portée à leur définition, leur utilité et leur lien avec les objectifs de cette étude. Enfin, une synthèse des éléments clés issus de cette revue de littérature sera proposée (section 1.4), mettant en perspective les connaissances existantes et les pistes de réflexion pour la suite du mémoire.

1.1 Portrait de la culture en serre au Québec

Cette première section dresse un portrait détaillé de la culture en serre au Québec. Elle examine l'évolution de cette industrie au cours des dernières années, sa répartition géographique, les pratiques de production les plus courantes, ainsi que les enjeux québécois qui influencent le secteur. Ce portrait met en évidence les défis et les limites auxquels fait face l'industrie serricole, offrant ainsi une vue d'ensemble essentielle pour mieux comprendre le contexte actuel et les perspectives.

Il est important de noter que cette section s'appuie principalement sur une base de données issue d'une étude en cours de publication réalisée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) qui a recensé un portrait rigoureux de la production serricole du Québec (Gouvernement du Québec, 2024). À ce jour, aucune autre

étude récente d'une ampleur et d'une rigueur méthodologique comparables n'était disponible dans la littérature.

À la suite de l'avènement au Québec de la pandémie de COVID-19 en mars 2020, l'autonomie alimentaire est devenue une priorité au niveau provincial. Pour pallier le déficit commercial en produits alimentaires, le gouvernement du Québec a mis en place plusieurs initiatives visant à accroître les superficies en serre sur le territoire. En 2020, il a ainsi lancé un plan ambitieux visant à doubler ces superficies d'ici 2025, afin d'assurer un approvisionnement en aliments frais, produits localement tout au long de l'année (Gouvernement du Québec, 2020). La Figure 1.1 présente l'évolution des superficies pour la culture de fruits et légumes et pour l'horticulture ornementale de 2019 à 2023 (Canada, 2024a, 2024b) et pour 2024 (Gouvernement du Québec, 2024). La superficie cultivée en serre au Québec a connu une croissance marquée dans le secteur des fruits et légumes, passant de 142 ha en 2020 à près de 190 ha en 2024, soit une hausse de 34 %.

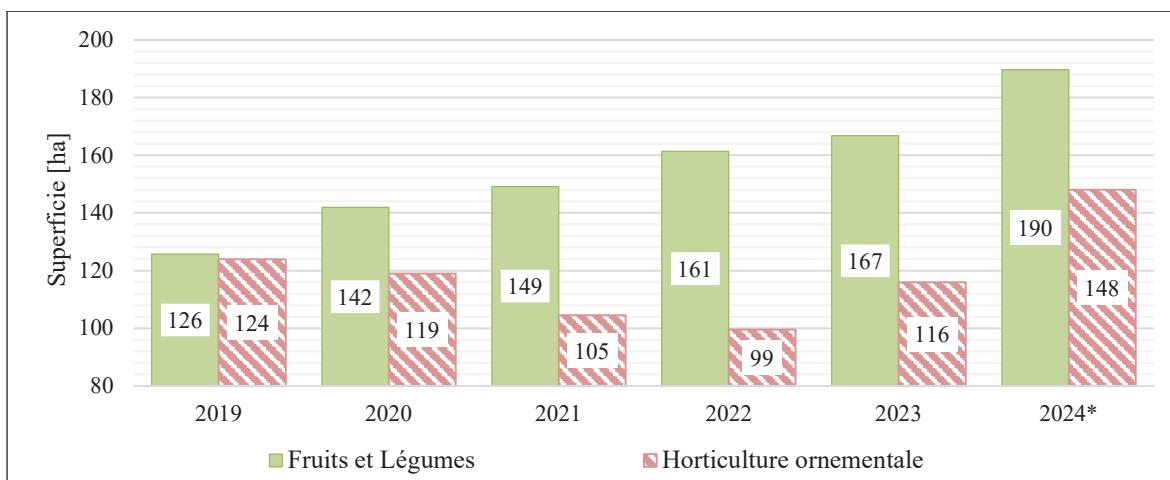


Figure 1.1 Évolution de la superficie en serre au Québec de 2019 à 2024

Données tirées de Canada (2024a, 2024b), Gouvernement du Québec (2024)

Le Québec se classe au troisième rang au Canada en termes de superficies consacrées à la culture en serre, avec 7.6 % du total national. Il se situe derrière l'Ontario, qui domine largement avec 72.3 %, et la Colombie-Britannique, qui occupe la deuxième place avec

15.7 %, dans le secteur des fruits et légumes en 2023 (Canada, 2024b). En 2024, le Québec comptait 562 entreprises dans le secteur des serres, réparties comme suit : 276 dédiées aux fruits et légumes (représentant 55 % de la superficie totale), 249 spécialisées en horticulture ornementale (43 % de la superficie), 28 maraîchers en champ destinés à la production de transplants pour les champs (2 % de la superficie) et 6 entreprises fruitières (1 % de la superficie) (Gouvernement du Québec, 2024).

La Figure 1.2 ci-dessous illustre l'une des caractéristiques principales du secteur serricole québécois, à savoir que la grande majorité des entreprises sont de petite (0 à 999 m²) et moyenne taille (1 000 à 4 999 m²), mais représentent seulement une faible proportion des superficies cultivées (Gouvernement du Québec, 2024). En revanche, les grandes entreprises (5 000 m² et plus), bien moins nombreuses, se partagent une part beaucoup plus importante des superficies totales (Gouvernement du Québec, 2024).

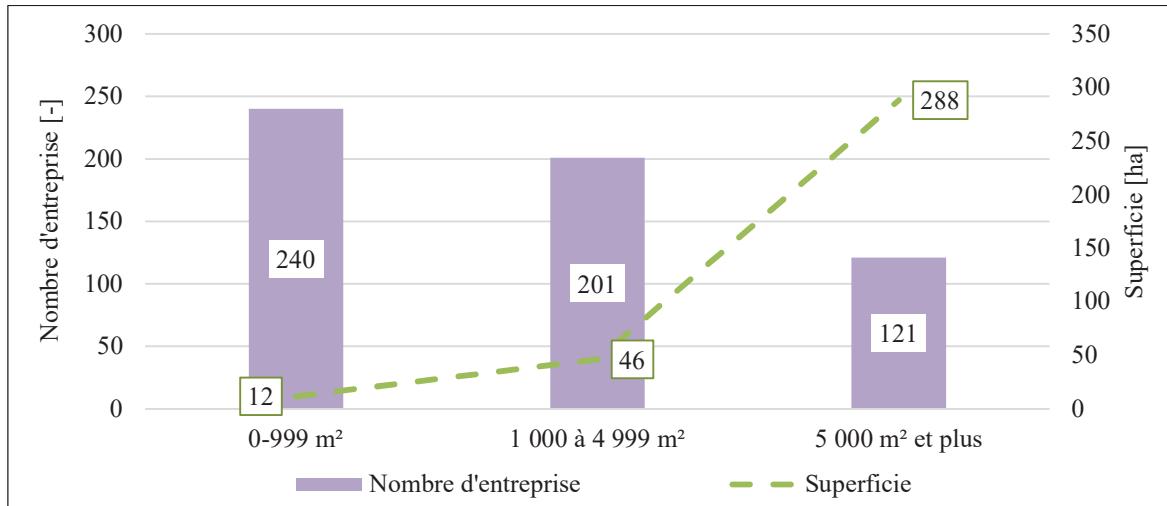
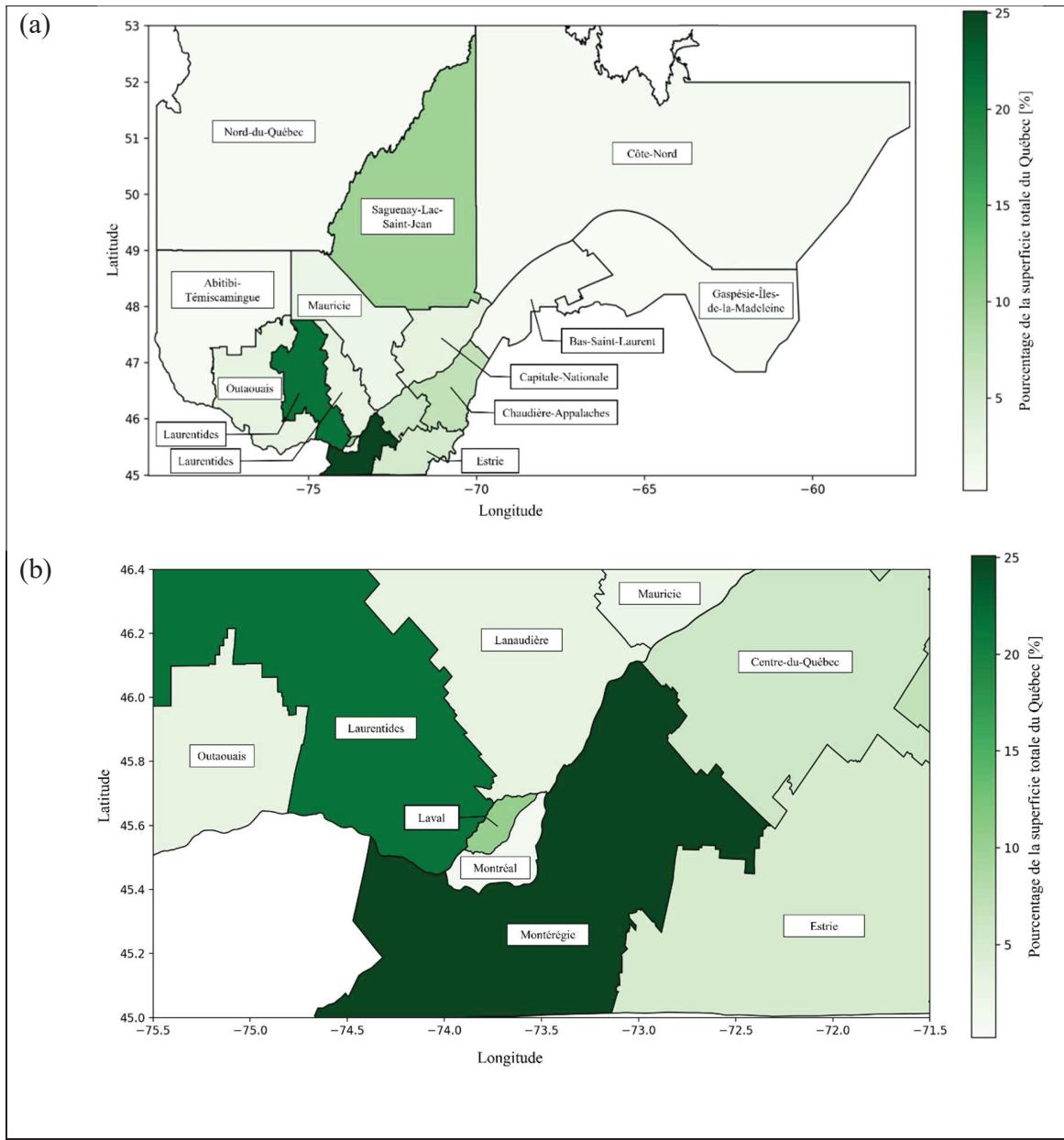


Figure 1.2 Répartition du nombre d'entreprises et de la superficie totale pour chaque classe de superficies (petite : 0-999 m², moyenne : 1 000 à 4 999 m² et grande : 5 000 m² et plus)
Données tirées de Gouvernement du Québec (2024)

Un autre aspect spécifique du portrait de la culture en serre au Québec concerne la répartition des surfaces cultivées sur le territoire (Gouvernement du Québec, 2024). La Figure 3 illustre

cette répartition. On observe une concentration significative des superficies dans le sud de la province, notamment en Montérégie et en Lanaudière.



1.1.1 Pratiques courantes de cultures en serre au Québec

Cette section explorera les pratiques courantes de la culture en serre, en abordant les types de serres utilisées, les périodes typiques de production, les principales sources d'énergie, ainsi que les cultures les plus répandues.

La Figure 1.4 présente les trois principaux types de serres couramment utilisés dans le parc serricole québécois : les serres individuelles en polyéthylène, les serres jumelées en polyéthylène ou sous verre. Elle met en évidence que la majorité des entreprises optent pour le polyéthylène comme revêtement principal. Toutefois, en termes de superficie cultivée, le verre horticole occupe une place significative (Gouvernement du Québec, 2024).

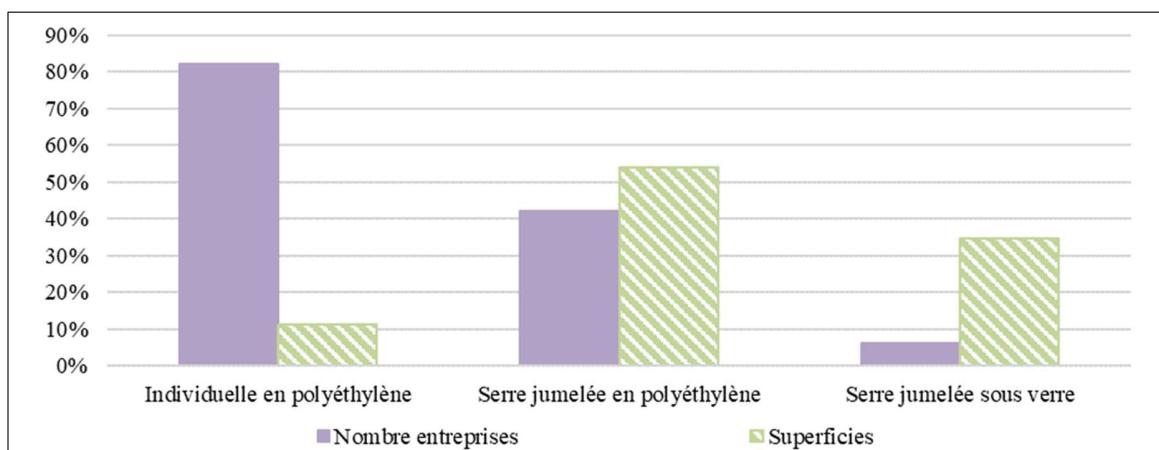


Figure 1.4 Proportion des entreprises ayant déclaré posséder un certain type de serre et proportion de ceux-ci au Québec
Données tirées de Gouvernement du Québec (2024)

Le Tableau 1.1 présente la période de production des entreprises serricoles québécoises pour quatre types de cultures : fruits et légumes, horticulture ornementale, maraîchage en champ et production fruitière. Dans le secteur des fruits et légumes, 66 % des serres individuelles ont une période de production se retrouvant entre les mois de mars et octobre, tandis que seulement 9 % produisent toute l'année. En revanche, parmi les serres jumelées, 75 % opèrent 12 mois par année (Gouvernement du Québec, 2024).

Tableau 1.1 Proportion du nombre d'entreprises en production selon la période de début et de fin au Québec
 Données tirées de Gouvernement du Québec (2024)

Début de la production													
	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	
Jan.													
Fév.													
Mars	0.4%		0.7%									0.2%	
Avr.	0.2 %	0.7%	1.6%						0.2%	0.2%			
Mai	1.2%	1.1%	2.8%	0.7%				0.2%	0.2%		0.4%	0.2%	
Juin	3.0%	4.6%	4.3%	1.2%				0.2%		0.2%		0.2%	
Juill.	0.5%	0.7%	2.8%	1.2%	0.4%					0.2%			
Août	0.5%	0.5%	1.6%	0.9%	0.7%								
Sept.	0.9%	2.0%	2.8%	2.7%	2.0%								
Oct.	1.8%	3.7%	10.5%	7.1%	3.6%	0.4%							
Nov.	0.7%	1.4%	2.3%	1.8%									
Déc.	20.3%	0.4%	1.1%		0.2%								

Au Québec, 93 % des serres sont chauffées, avec des taux variant selon le type de structure : 87 % pour les serres individuelles, 97 % pour les serres jumelées en polyéthylène et 100 % pour les serres jumelées sous verre (Gouvernement du Québec, 2024). Malgré d'importantes initiatives énergétiques visant à favoriser l'utilisation de l'électricité pour le chauffage et l'éclairage artificiel des serres (Hydro-Québec, 2025), la Figure 1.5 montre que les énergies fossiles demeurent largement prédominantes (Gouvernement du Québec, 2024).

Au Québec, les cultures de fruits et légumes les plus courantes en serre incluent principalement les tomates, les concombres, les laitues et les poivrons (Gouvernement du Québec, 2022a), comme l'illustre la Figure 1.6 (Gouvernement du Québec, 2024). Ces cultures sont privilégiées

en raison de leur forte demande sur le marché et de leur rentabilité (Gouvernement du Québec, 2023).

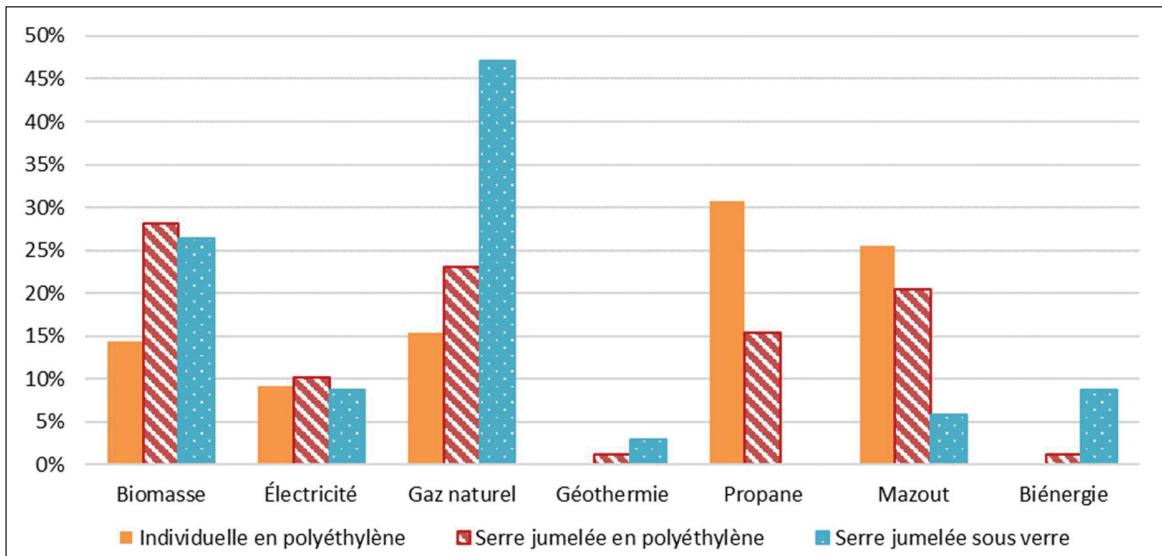


Figure 1.5 Proportion des entreprises utilisant une certaine source d'énergie selon le type de serre
Données tirées de Gouvernement du Québec (2024)

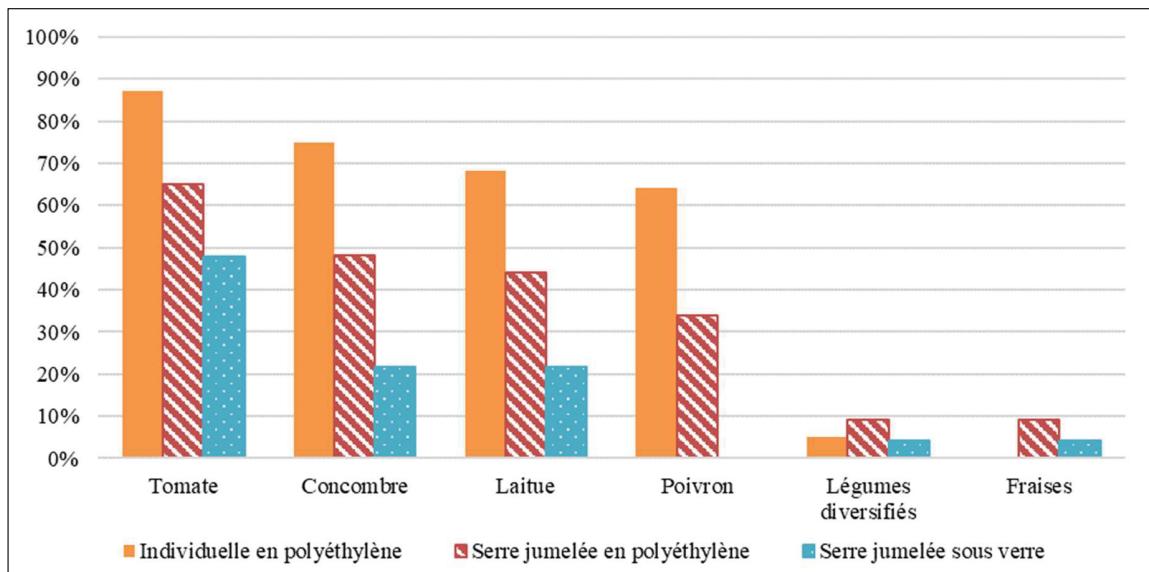


Figure 1.6 Proportion des entreprises produisant au moins l'une des différentes cultures selon le type de serre
Données tirées de Gouvernement du Québec (2024)

Les éléments présentés dans cette section visaient à mettre en évidence les particularités de la culture en serre au Québec, notamment la répartition des entreprises, l'évolution des superficies cultivées, les caractéristiques des serres utilisées et les défis liés à l'autonomie alimentaire. Toutefois, ces aspects s'inscrivent dans des contextes sociaux et environnementaux qui doivent être pris en compte pour assurer une production durable et viable. La section 1.1.2 suivante abordera ces dimensions afin de mieux cerner les défis et les opportunités du secteur serricole.

1.1.2 Enjeux de la culture en serre au Québec

La culture en serre au Québec comprend des enjeux complexes qui touchent à la fois les dimensions économiques, sociales et environnementales. Cependant, lorsque les conditions climatiques extérieures limitent la production de certaines cultures, la serre se présente comme une solution indispensable. Elle permet non seulement de prolonger la saison de culture, mais aussi d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles, ce qui revêt une importance capitale pour la sécurité alimentaire et le développement durable de la province (Doyon, Élie-Leonard, & Arsenault-Hétu, 2020). De plus, la culture en serre offre des opportunités de diversification pour les agriculteurs québécois, leur permettant de répondre à une demande croissante pour des produits frais et locaux (Doyon et al., 2020).

Cette méthode de production est aussi souvent vue comme un moyen d'atténuer les effets du changement climatique en favorisant une production alimentaire plus locale, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (*GES*) liées au transport des denrées alimentaires (Boiral, Talbot, Guillaumie, & Brotherton, 2024). Toutefois, il est important de souligner que les serres, en raison de leurs besoins énergétiques pour le chauffage et la climatisation, peuvent également générer des émissions importantes de *GES* (Boiral et al., 2024). Ainsi, pour que la culture en serre soit véritablement durable, il est crucial d'intégrer des stratégies énergétiques plus responsables, telles que l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'utilisation d'énergies renouvelables (Bendimerad et al., 2013). Il est donc essentiel que la serriculture québécoise de demain soit pensée dans le cadre d'une approche de développement durable, en accordant une attention particulière à une gestion énergétique optimisée (Collard & Carrier, 2020).

Socialement, la culture en serre peut également jouer un rôle dans la revitalisation des communautés rurales. En favorisant l'agriculture locale, elle peut contribuer à la création d'emplois et à la dynamisation de l'économie locale (Doyon et al., 2020). Il est aussi important de considérer les enjeux liés à la diversité culturelle dans le cadre de la culture en serre. Le Québec, avec sa mosaïque de cultures, peut bénéficier d'une approche interculturelle qui valorise les savoirs traditionnels et les pratiques agricoles diversifiées. Cela peut enrichir les méthodes de culture en serre et favoriser l'innovation dans le secteur (Mundler & Ouellet, 2017).

En résumé, les serres constituent une solution efficace pour sécuriser la production alimentaire en climat froid, bien qu'elles posent des enjeux importants en matière de consommation énergétique. La compréhension et l'amélioration de leur performance nécessitent une évaluation rigoureuse, fondée sur des outils adaptés. La section 1.2 suivante présente les principales approches de modélisation utilisées pour analyser le comportement thermique des serres et générer des indicateurs de performance pertinents.

1.2 Modèles numériques

Un modèle numérique est un outil utilisé pour analyser et prédire le comportement d'un système afin d'en étudier les effets. Il est généralement utilisé lorsque le processus étudié ne peut pas être observé directement, notamment en raison de son coût, de sa durée ou de sa complexité (Gouvernement du Québec, 2025). En ingénierie, les modèles numériques sont couramment utilisés pour l'analyse énergétique et climatique d'un bâtiment. Selon le niveau de détail et la prise en compte des variations temporelles, ces modèles peuvent être classés en trois catégories : statique, quasi-statique et dynamique.

Plusieurs types de méthodes de modélisation peuvent être utilisés selon le niveau de complexité et de précision souhaité. Parmi ceux-ci, la méthode de cuve parfaitement brassée considère que les propriétés de l'air (température, humidité, etc.) sont uniformes à l'intérieur de la serre. Cette approche permet des simulations rapides tout en fournissant des résultats représentatifs (Steeman, Janssens, Carmeliet, & De Paepe, 2009). À l'inverse, la méthode CFD

(*Computational Fluid Dynamics*) permet une analyse locale de la température, de vitesse de l'air et d'humidité à l'intérieur de la serre. Ils tiennent compte de la géométrie précise, des flux d'air, des échanges thermiques par convection naturelle et forcée, et des gradients spatiaux (Tu, Yeoh, Liu, & Tao, 2023). Bien que plus précis, ces modèles sont aussi beaucoup plus complexes, exigeants en temps de calcul et en données d'entrée.

Dans le cadre de cette étude, l'approche retenue repose sur le modèle de cuve parfaitement brassée, jugée adéquate pour évaluer les grandes tendances thermiques et énergétiques à l'échelle de la serre. Cette hypothèse permet de centrer l'analyse sur les impacts globaux des variables climatiques et techniques de la serre étudiée.

1.2.1 Modèle numérique statique

Un modèle numérique statique peut être utilisé pour estimer la consommation d'énergie d'un bâtiment en supposant que les conditions internes et externes restent en état statique. Son principal avantage réside dans sa simplicité, ce qui en fait un outil accessible pour des analyses globales et des évaluations préliminaires (Yeo et al., 2022).

Dans le secteur des serres, les modèles numériques statiques sont surtout utilisés pour évaluer la performance de certains matériaux ou de la structure sous un climat sensiblement stable au courant de l'année. Par exemple, Berroug, El Omari, El Qarnia, et Faraji (2011) et Rasheed, Lee, et Lee (2018) ont examiné l'effet de la géométrie d'une serre sur sa performance thermique. Les auteurs ont quantifié les pertes thermiques à travers la structure de la serre, en utilisant des modèles statiques pour estimer les besoins énergétiques. De son côté, Bendimerad et al. (2013) abordent également la modélisation thermique des serres, en utilisant des modèles statiques pour simuler le comportement thermique de la paroi d'une serre tunnel. L'étude souligne que les modèles d'estimation des besoins de chauffage, basés sur des bilans d'énergie statiques, sont fondamentaux pour comprendre les pertes thermiques et optimiser la conception des serres.

L'un des principaux avantages du modèle statique est sa simplicité à analyser des systèmes complexes en traitant la serre comme un seul élément, ce qui facilite les calculs des bilans énergétiques entre ses différentes composantes (Shakir & Farhan, 2019). Cette approche permet des calculs rapides et une interprétation claire des résultats, idéale pour les évaluations préliminaires de conception et d'efficacité énergétique. Toutefois, ce type de modèle présente une limite importante : il suppose des conditions environnementales constantes, ce qui ne reflète pas toujours la dynamique réelle des serres (Xu, Chen, Zhang, & Gu, 2016). Cette simplification peut entraîner des écarts entre les résultats simulés et la performance réelle, notamment dans les climats à forte variabilité.

1.2.2 Modèle numérique quasi-statique

Le modèle quasi-statique, quant à lui, constitue une approche intermédiaire en divisant le système en plusieurs calculs d'états statiques successifs. Il suppose que chaque état atteint un équilibre avant de passer au suivant, permettant ainsi d'intégrer certaines variations temporelles sans recourir à une modélisation pleinement dynamique (Altair-Engineering, 2024).

Cette approche est fréquemment utilisée pour des simulations horaires ou mensuelles des besoins énergétiques d'un bâtiment. Par exemple, Belkadi, Mezghani, et Mami (2019) ont utilisé des modèles quasi statiques pour évaluer les processus de transfert de chaleur et de masse, essentiels à la compréhension de la consommation d'énergie dans les environnements de serre. De plus, Chen et al. (2023) présentent un modèle quasi-statique pour les serres, intégrant les charges statiques du vent et de la neige. Ils notent qu'un des principaux avantages d'un modèle quasi-statique est qu'il est généralement plus simple et moins exigeant en calcul que les modèles dynamiques tout en incluant la notion de la variation temporelle. Ils permettent d'analyser les charges énergétiques et les réponses structurelles sans recourir à des calculs complexes. Toutefois, bien que les modèles quasi statiques soient efficaces pour des systèmes simples, ils ne représentent pas toujours de manière adéquate les environnements de serre plus complexes, où de multiples facteurs interagissent et influencent la dynamique énergétique. Par exemple, l'interaction entre la transpiration des cultures, les fluctuations de température

ambiante et les stratégies de ventilation peut créer des conditions qui ne sont pas bien prises en compte par les modèles statiques. Ils ont aussi une certaine limitation à prendre en compte : les changements rapides des conditions environnementales (Lee et al., 2021).

1.2.3 Modèle numérique dynamique

Un modèle dynamique intègre pleinement les variations temporelles en décrivant l'évolution du système à l'aide d'équations différentielles. Ce type de modèle est particulièrement utile pour simuler des processus transitoires où les conditions changent rapidement, comme la modélisation des fluctuations de température dans une serre (Xu et al., 2016), ou l'analyse du comportement thermique détaillé des bâtiments (Peuportier, 2015). Les modèles dynamiques couramment utilisés dans le domaine des serres peuvent évaluer divers paramètres dont l'évolution de la température intérieure, de la radiation solaire intérieure, du bilan de masse et thermique en plus de la consommation d'énergie (Adesanya et al., 2022; Beaulac, Lalonde, Haillot, & Monfet, 2024; Rasheed, Kwak, Kim, & Lee, 2020; Ward, Choudhary, Cundy, Johnson, & McRobie, 2015).

L'un des principaux avantages du modèle dynamique est sa capacité à capturer les fluctuations des conditions environnementales telles que la température, l'humidité et l'irradiation solaire au fil du temps. Cette capacité permet une simulation plus réaliste des climats de serre par rapport aux modèles statiques (Xu et al., 2016). Ils ont aussi la possibilité d'intégrer des systèmes de contrôle avancés, comme la ventilation et le chauffage automatisés, qui réagissent aux changements environnementaux en temps réel. De plus, en simulant les interactions complexes au sein des systèmes de serre, les modèles dynamiques offrent des perspectives sur les flux d'énergie et les mécanismes de transfert thermique. Par exemple, Lee et al. (2021) ont utilisé la modélisation dynamique pour analyser l'impact de la température ambiante de l'air et du rayonnement solaire sur les charges énergétiques des serres (Lee et al., 2021).

Bien que le modèle dynamique soit le plus efficace des trois modèles présentés, il nécessite une calibration minutieuse pour produire des résultats fiables, car ses nombreuses variables peuvent être source d'erreurs. Cette calibration peut prendre un temps considérable en raison

de la complexité du modèle dynamique (Adesanya et al., 2022; Beaulac et al., 2024; Lalonde, 2022).

Parmi les outils dynamiques utilisés pour la simulation énergétique en serre, plusieurs se distinguent par leurs fonctionnalités spécifiques, leur précision et leur flexibilité. Les plus couramment utilisés sont Simulink (*MATLAB*), OpenModelica (*Dymola*), EnergyPlus (Crawley, Pedersen, Lawrie, & Winkelmann, 2000) et TRNSYS (Klein et al., 2017). Chacun présente des forces et des contraintes qui influencent leur choix selon les objectifs de modélisation et les compétences techniques disponibles (Crawley, Hand, Kummert, & Griffith, 2008). Le Tableau 1.2 ci-dessous résume les principales caractéristiques de ces quatre outils ainsi que quelques exemples de travaux pertinents en simulation énergétique de serre.

Globalement, le choix entre un modèle statique, quasi-statique ou dynamique dépend donc des objectifs de la simulation, de la disponibilité des données et du niveau de précision requis. Les modèles statiques sont adaptés aux études globales et aux bilans énergétiques simplifiés, tandis que les modèles quasi statiques permettent d'intégrer des évolutions temporelles en maintenant un compromis entre précision et simplicité. Les modèles dynamiques, bien qu'exigeants en termes de ressources, sont indispensables pour les systèmes soumis à des variations rapides et nécessitant une réactivité accrue. Grâce à l'évolution des outils de simulation et à l'augmentation des capacités de calcul, des approches hybrides combinant plusieurs types de modèles pourraient de plus en plus être utilisées pour optimiser les analyses et la prise de décision pour le domaine serricole, par exemple lié à des indicateurs de performance discutés dans la section suivante.

Tableau 1.2 Caractéristique spécifique et travaux pertinents de quatre différents outils numériques de simulation dynamique

Outils	Caractéristiques	Travaux pertinents
Simulink (<i>MATLAB</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Grande flexibilité d'utilisation; - Interface de programmation permettant une adaptation rapide à différents scénarios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vanthoor, Stanghellini, van Henten, et de Visser (2011) - Ali, Aridhi, et Mami (2015) - Yeo et al. (2022)
OpenModelica (<i>Dymola</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Représentation couplée de systèmes thermiques, hydrauliques, électriques, etc. - Libre d'usage 	<ul style="list-style-type: none"> - Altes-Buch, Quoilin, et Lemort (2019) - Piché (2021) - Maheux, Gibout, Monfet, et Haillot (2023)
EnergyPlus	<ul style="list-style-type: none"> - Moteur de calculs sans interface graphique ; - Très précis et détaillé pour les charges thermiques et la consommation d'énergie. - Libre d'usage 	<ul style="list-style-type: none"> - Lebre, Silva, Pires, et Gaspar (2021) - Ouazzani Chahidi, Fossa, Priarone, et Mechaqrane (2021)
TRNSYS	<ul style="list-style-type: none"> - Interface visuelle et modulaire; - Grande flexibilité pour l'adaptation aux besoins spécifiques du secteur agricole. 	<ul style="list-style-type: none"> - Semple, Carriveau, et Ting (2017) - Lalonde (2022) - Beaulac, Monfet, et Haillot (2023) - Beaulac et al. (2024)

1.3 Indicateurs de performances

Un indicateur de performance (*IDP*) est une mesure quantitative ou qualitative utilisée pour évaluer l'efficacité d'un système, d'un processus ou d'une organisation par rapport à des objectifs définis (Gouvernement du Québec, 2007). Dans le domaine agronomique et serricole, les *IDP* sont utilisées depuis plusieurs années pour mesurer l'impact direct des conditions environnementales sur la croissance des cultures, la productivité et la qualité des récoltes. L'utilisation plutôt récente de modèles numériques pour les espaces d'agriculture en environnement contrôlé (*AEC*) permet entre autres de générer des données thermiques, radiatives et énergétiques, offrant ainsi une analyse prédictive des performances de la serre selon divers scénarios et climat.

Cette section est organisée selon trois grandes catégories d'*IDP* pour les modèles numériques d'*AEC* : tout d'abord, les indicateurs thermiques (section 1.3.1), suivis des indicateurs radiatifs (section 1.3.2), et enfin les indicateurs énergétiques (section 1.3.4). Une section spécifique abordera un indicateur combinant à la fois des éléments thermiques et radiatifs (section 1.3.3). Dans chacune des trois grandes sections, un état des lieux des *IDP* les plus fréquemment utilisés en agronomie végétale sera détaillé, en précisant leurs définitions et leurs applications. À la fin de ces sections, des études pertinentes sur l'application de cette classe d'indicateurs dans la simulation énergétique seront présentées. L'objectif est de mettre en évidence la complémentarité entre les indicateurs utilisés en agronomie et leur intégration dans l'analyse des résultats de simulation énergétique, afin d'optimiser la gestion et la performance des systèmes de culture en *AEC*. Il est à noter que le recensement des *IDP* présenté dans cette section a été basé sur les travaux de Lalonde (2022).

1.3.1 Indicateurs thermiques

La première classe d'*IDP* comprend les indicateurs thermiques, qui sont directement liés à la température intérieure de la serre. Ces indicateurs jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des conditions climatiques au sein de la serre, en permettant de suivre et de comprendre l'évolution de la température au fil du temps. Ils établissent un lien entre les fluctuations thermiques et la viabilité de la croissance des plantes. Ces indicateurs sont souvent intégrés dans des modèles de simulation pour prédire les comportements thermiques en fonction des variations climatiques extérieures et des configurations internes de la serre.

1.3.1.1 Température intérieure

La température intérieure d'une serre est l'un des paramètres environnementaux les plus importants à contrôler (Bartok, 2001). En effet, en plus de la température moyenne ($\bar{T}_{ai,ND}$), les températures minimales ($T_{ai,min}$) ou maximales ($T_{ai,max}$) journalières sont des indicateurs agronomiques pertinents puisqu'ils peuvent induire des stress environnementaux nuisibles à la croissance des plantes.

Lorsque la $T_{ai,min}$ est trop basse pour une culture donnée, Bakker, Bot, Challa, et Van de Braak (1995) souligne un risque d'entraîner des phénomènes morphologiques indésirables, tels qu'une diminution de la croissance, une floraison non uniforme, une mauvaise qualité des fruits et une durée de conservation réduite. De plus, Beck, Heim, et Hansen (2004) ont conclu que la croissance sous de basses températures, définies comme étant inférieures à zéro, représente un risque lié à la déshydratation des cellules et des tissus lors du gel de l'eau. Ce type de stress peut endommager les plantes de façon permanente (Beck et al., 2004).

Pour ce qui est de $T_{ai,max}$ trop élevées, elles ont généralement pour effet d'augmenter le taux de croissance des plantes et l'évapotranspiration (Peet, 1999). Une évapotranspiration excessive des feuilles peut entraîner des problèmes tels qu'une réduction du transport du calcium vers les fruits, menant à de la pourriture apicale ou des dommages aux marges des feuilles et aux extrémités des pousses en croissance entraînant des brûlures (Peet, 1999).

1.3.1.2 Oscillation de la température

L'oscillation de la température entre le jour (DT) et la nuit (NT), appelée ($T_{a_i-swing,ND}$) joue un rôle important dans la croissance végétative de la plante, notamment dans l'elongation de la tige (Myster & Moe, 1995). L'elongation des tiges est stimulée lorsque DT est supérieur à NT ($+T_{a_i-swing,ND}$) et s'arrête lorsque DT est inférieur à NT ($-T_{a_i-swing,ND}$). Erwin, Heins, et Karlsson (1989) ont conclu qu'un $-T_{a_i-swing,ND}$ peut être particulièrement bénéfique pour obtenir des plantes plus compactes sans recourir à des retardateurs de croissance.

L'étude du $T_{a_i-swing,ND}$ en serre a fréquemment été liée à un besoin de mieux comprendre son impact sur le comportement physiologique de la plante (Abbasi et al., 2023; Grimstad & Frimanslund, 1993; Heuvelink, 1989; Venkatraman & Singh, 2009). De ce côté, de Koning (1988) a exploré l'effet de différents niveaux de $T_{a_i-swing,ND}$ sur la productivité des cultures sous serre, en se concentrant sur l'optimisation de la gestion climatique pour réduire la consommation d'énergie.

1.3.1.3 Indice de confort thermique

L'indice de confort thermique (*TCI*), comme défini par Lalonde (2022), repose sur le nombre d'heures pendant lesquelles la température de l'air à l'intérieur de la serre se situe dans la plage idéale pour favoriser la croissance des plantes. Cet indicateur est essentiel pour évaluer l'évolution de l'environnement des cultures et détecter les risques de stress thermique (Al-Rikabi et al., 2023). Celui-ci est calculé selon l'équation (1.1) comme la somme de l'indice de gel (*OC*) et de l'indice de surchauffe (*OH*) sur la même période (Esmaeli & Roshandel, 2020). Le *OC* représente le nombre d'heures où la température intérieure (T_{int}) est inférieure à la température minimale de croissance des plantes ($T_{min.croissance}$). Il est calculé selon l'équation

(1.2) (Lalonde, 2022). Le *OH* correspond au nombre d'heures où la température intérieure (T_{int}) dépasse la température maximale de croissance des plantes ($T_{max.croissance}$). Il est déterminé selon l'équation représentant le nombre d'heures où la température intérieure (T_{int}) est inférieure à la température minimale de croissance pour les plantes ($T_{min.croissance}$) calculée selon l'équation (1.3) (Lalonde, 2022).

$$ITC [h] = OC [h] + OH [h] \quad (1.1)$$

$$OC[h] = \sum_j^{8760} OC_j$$

$$\text{où } OC_j = 1 \text{ SI } T_{int} > T_{min.croissance} \quad (1.2)$$

$$OC_j = 0 \text{ SI } T_{int} < T_{min.croissance}$$

$$OH[h] = \sum_j^{8760} OH_j \quad (1.3)$$

$$\text{où } OH_j = 1 \text{ SI } T_{int} > T_{max.croissance}$$

$$OH_j = 0 \text{ SI } T_{int} < T_{max.croissance}$$

Dans le domaine de l'agriculture végétale, cet indicateur thermique est peu utilisé dans la littérature, et se concentre surtout sur les indices de gel (Tschurr et al., 2023).

1.3.1.4 Durée de la saison de croissance thermique

La durée de la saison de croissance thermique (*TGSL*) est caractérisée par le nombre de jours par année pendant lesquels la température de l'environnement permet la croissance d'une plante. Le début et la fin de la *TGSL* est défini selon différents critères dans la littérature ;

- i. Wang (1963) définit la *TGSL* comme le nombre de jours entre la dernière gelée meurtrière au printemps et la première gelée meurtrière (température suffisamment basse pour causer des dommages irréversibles aux plantes) à l'automne de la même année.
- ii. Davis (1972) définit la *TGSL* par le nombre de jours entre le premier jour du printemps et le dernier jour de la saison de croissance. Le premier jour du printemps est défini comme le moment où la température maximale moyenne sur cinq jours dépasse 10°C sans redescendre en dessous de 6.1°C. Le dernier jour de l'automne est celui où la température maximale moyenne sur cinq jours est inférieure à 6.1°C.
- iii. Bootsma (1994) utilise une approche simplifiée, similaire à celle de Davis (1972), où le début de la *TGSL* est défini comme le moment où la moyenne pondérée des températures sur cinq jours consécutifs atteint 5.5°C. La fin de la saison de croissance est définie par la date où cette moyenne descend et reste en dessous de 5.5°C.
- iv. Frich et al. (2002) défini plus globalement la *TGSL* en stipulant que le début de la saison de croissance est la date où la température dépasse 5°C pendant cinq jours consécutifs, et la fin correspond à la date où la température reste en dessous de 5°C pendant cinq jours consécutifs.

Il est à noter que ces définitions ne sont pas universelles pour toutes les cultures, car chacune réagit à des seuils de température différents pour débuter leur croissance (Wang, 1963). Il est

donc important de fixer un seuil de température spécifique à la culture étudiée (Skaggs & Baker, 1985).

1.3.1.5 Degré-jour de croissance

Le concept de degrés-jour de croissance (*GDD*) repose sur l'idée que chaque plante réagit différemment aux variations de température. En effet, chaque espèce végétale possède une température de base spécifique, en dessous de laquelle son développement reste sous-optimal. Ainsi, Edey (1977) définit les *GDD* comme la quantité de chaleur accumulée par une plante au cours d'une journée, ce qui permet de quantifier l'impact de la température sur son développement. Les *GDD* peuvent être mesurés sur différentes périodes, allant d'une semaine à un mois, et jusqu'à ce que la plante atteigne sa pleine maturité (Edey, 1977).

McMaster et Wilhelm (1997) proposent une méthode pour déterminer les *GDD* à l'aide de l'équation (1.4) où T_{\max} et T_{\min} sont respectivement la température maximale et minimale quotidienne, T_{base} est la température de base spécifique à la plante et n est le nombre de jours de la période étudiée. Cette approche permet ainsi de mieux comprendre et prévoir le développement des cultures en fonction des conditions climatiques et d'ainsi optimiser la gestion du climat (Edey, 1977).

$$GDD[\text{degrés-jour}] = \sum_1^n \left(\frac{T_{\max} [\text{K}] + T_{\min} [\text{K}]}{2} - T_{base} [\text{K}] \right) \quad (1.4)$$

Il permet entre autres d'évaluer les stades de croissance des plantes que ce soit pour la culture en serre (Quang, Nha, Hang, Phuoc, & Xuan, 2024) ou les grandes cultures (Anandhi, 2016; Swan, Schneider, Moncrief, Paulson, & Peterson, 1987; Worthington & Hutchinson, 2005). De plus, les *GDD* ont émergé comme une variable clé dans les modèles numériques de la croissance des plantes dynamiques, étant utilisées par plusieurs chercheurs pour mieux prédire les rendements et les besoins en gestion climatique des cultures (Abbasi et al., 2023; Fang et al., 2022; Q. Yang, Liu, Zhou, Rogers, & Jin, 2024).

1.3.1.6 Déficit de pression de vapeur

Le déficit de pression de vapeur (*VPD*), calculé à partir de l'équation (1.5), est un concept clé en agronomie et en sciences environnementales. Il mesure l'écart entre la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air (à saturation) peut contenir à une température donnée $e_s(T_i)$ et la quantité réelle de vapeur d'eau présente dans l'air e_a calculé à partir de l'équation (1.6) (Anderson, 1936).

$$VPD[kPa] = e_s(T_i)[kPa] - e_a[kPa] \quad (1.5)$$

$$\text{où, } RH[\%] = 100 \cdot \frac{e_s(T_i)[kPa]}{e_a[kPa]} \quad (1.6)$$

Le *VPD* est largement utilisé dans la recherche pour analyser le stress hydrique des plantes et optimiser la gestion de l'eau en agriculture (Seager et al., 2015). Plusieurs études ont exploré son impact sur la croissance et la physiologie des cultures. Par exemple, Inoue et al. (2021) ont démontré que le contrôle du *VPD* peut améliorer la conductance stomatique et la photosynthèse, favorisant ainsi une croissance optimale, notamment dans la culture de la laitue. Tulva, Välbe, et Merilo (2023) ont étudié l'effet d'un *VPD* élevé sur la réduction de la conductance stomatique, entraînant un ralentissement de la croissance des plantes. De leur côté, Jiao, Song, Zhang, Du, et Li (2019) ont examiné l'interaction entre le *VPD* et la concentration de CO₂ dans la culture de tomates en serre, mettant en évidence l'importance du *VPD* dans la régulation de la photosynthèse et l'optimisation du rendement. Ces recherches soulignent le rôle central du *VPD* comme indicateur clé dans l'étude des performances des cultures en environnement contrôlé.

Les indicateurs thermiques sont fondamentaux pour l'évaluation des performances énergétiques des serres et la gestion des conditions climatiques internes. Une modélisation de ces indicateurs permet d'analyser les transferts thermiques et d'optimiser le contrôle de la

température afin d'améliorer la productivité des cultures. Différentes approches ont été développées dans la littérature pour quantifier et prédire l'évolution thermique au sein des serres.

Gupta, Tiwari, et Santosh (2019) ont proposé un modèle statique basé sur les principes des transferts de chaleur pour estimer la température de l'air intérieur, du couvert végétal et du matériau de couverture. Ce modèle, implémenté sous MATLAB, permet d'étudier la réponse thermique de la serre sous des conditions fixes. Dans une approche quasi-statique, Shakir et Farhan (2019) ainsi que Choab et al. (2021) ont comparé l'effet de différents paramètres de conception de serre sur la gestion du climat interne, en mettant l'accent sur la température comme variable clé.

Les modèles dynamiques, mieux adaptés à la représentation des conditions transitoires, ont fait l'objet de plusieurs développements au cours des dernières années. Esmaeli et Roshandel (2020) ont d'abord proposé un modèle centré sur la prédition des fluctuations de température, dans le but d'optimiser le contrôle climatique. Par la suite, Costantino, Comba, Sicardi, Bariani, et Fabrizio (2021) ont enrichi cette approche en intégrant simultanément la température et l'humidité relative, permettant une analyse plus complète des interactions thermiques à l'intérieur de la serre. Plus récemment, Beaulac et al. (2024) ont utilisé la température intérieure comme variable centrale dans la calibration d'un modèle dynamique, permettant une meilleure représentation des variations thermiques au fil du temps.

Ces différentes approches de modélisation illustrent l'importance des indicateurs thermiques dans l'optimisation de la gestion énergétique des serres. En intégrant ces modèles dans les simulations climatiques, il devient possible d'améliorer la régulation de la température et, par conséquent, d'accroître l'efficacité des systèmes de production en environnement contrôlé.

1.3.2 Indicateurs radiatifs

La deuxième classe d'*IDP* regroupe les indicateurs radiatifs, qui sont liés à la quantité accessible de rayonnement solaire à l'intérieur de la serre. Ces indicateurs sont essentiels pour

évaluer l'apport en éclairage naturel, un facteur déterminant pour la photosynthèse et, par conséquent, la croissance des cultures. Intégrés aux modèles numériques, ces indicateurs offrent une meilleure compréhension de l'efficacité de l'éclairage et de son impact sur le rendement des cultures, tout en contribuant à l'optimisation du design et du contrôle climatique des serres.

1.3.2.1 Intégrales de l'éclairage journalier

L'intégrale de l'éclairage journalier (*DLI*), comme définie par Craver et Lopez (2016), décrit le nombre cumulé de photons photosynthétiques actifs (*PAR*; 400-700 nm) reçus au cours d'une période de 24 heures. L'équation (1.7) définit le *DLI* à partir de la valeur horaire moyenne de la densité de flux de photons photosynthétiques (*PPFD*) (Lalonde, 2022).

$$DLI [mol \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}] = \sum_{h=0}^{24} \overline{PPFD} [\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}] \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \quad (1.7)$$

Plusieurs études mettent en évidence l'impact significatif du *DLI* sur la croissance et la morphologie des plantes, évaluées notamment par la croissance et l'accumulation de biomasse de la plante (Baumbauer, Schmidt, & Burgess, 2019; Cui, Song, Yu, & Liu, 2021; Lee, Lee, An, Park, & Kim, 2019; Zhang, He, Niu, Yan, & Song, 2018), les valeurs nutritionnelles (Yan, He, Niu, Zhou, & Qu, 2019) et le taux d'irrigation journalier (Van Iersel, Dove, Kang, & Burnett, 2010).

1.3.2.2 Facteur d'autonomie solaire

Le facteur d'autonomie solaire (*DAF*) est un indicateur qui mesure la proportion du *DLI* nécessaire à la croissance des plantes et fourni par l'éclairage naturel, par rapport aux besoins totaux de la plante en éclairage comme défini par Kesik et Stern (2007) selon l'équation (1.8). En d'autres termes, il quantifie dans quelle mesure l'éclairage naturel est suffisant pour la

croissance des plantes et si le recours à d'autres sources d'éclairage comme l'éclairage artificiel est nécessaire.

$$DAF [-] = \frac{DLI_{reçu}}{DLI_{optimal}} \quad (1.8)$$

Un *DAF* élevé indique que l'éclairage naturel comble les besoins de la plante, tandis qu'un *DAF* plus faible indique une plus grande nécessité à recourir à un éclairage artificiel, particulièrement dans des environnements où l'éclairage naturel est limité (Lalonde, 2022). Cet indicateur est couramment utilisé dans la littérature comme méthode pour réguler l'utilisation d'éclairage artificiel en serre (Moe, Grimstad, & Gislerod, 2005; Pereira, Mouazen, Foo, & Ahmed, 2021).

Les indicateurs radiatifs jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des rendements des cultures en serre, notamment en ce qui concerne la gestion de l'éclairage et l'efficacité de la photosynthèse. Une évaluation de ces indicateurs, y compris dans les simulations énergétiques, est donc nécessaire pour améliorer la performance des systèmes de culture en environnement contrôlé. Plusieurs études ont ainsi mis en évidence l'importance de la modélisation pour analyser la distribution et l'impact de la radiation solaire en serre.

Par exemple, Zhang et al. (2020) ont développé un modèle mathématique permettant de simuler la répartition du rayonnement solaire à l'intérieur des serres pour comprendre la performance de l'éclairage et optimiser la conception des serres en fonction de leur géométrie et des matériaux de couverture utilisés. Dans une perspective plus dynamique, Joubert et al. (2023) ont conçu un modèle de photosynthèse intégrant les fluctuations naturelles de l'irradiance permettant de mieux comprendre l'impact de celles-ci sur les cultures. D'autres travaux se sont concentrés sur la modélisation tridimensionnelle pour mieux comprendre l'interaction entre l'éclairage et les cultures. Par exemple, De Visser, Buck-Sorlin, Van Der Heijden, et Marcelis (2012) ont utilisé ce type de modèle pour simuler la distribution de l'éclairage et son influence sur la photosynthèse des cultures. De leur côté, Kahlen et Stützel

(2011) ont étudié l'impact des conditions d'éclairage sur l'allongement intermodal des plants de concombre, démontrant l'importance de l'éclairage dans l'architecture et la croissance des plantes. Enfin, Yang et Wang (2015) ont étudié les effets du rayonnement solaire et des matériaux de couverture des serres sur l'environnement lumineux, en proposant un modèle de simulation des conditions de lumière permettant d'améliorer les choix de conception des serres.

Ces différentes études soulignent l'intérêt des modèles pour quantifier et optimiser l'impact de la radiation solaire sur les cultures sous serre. En intégrant ces approches dans les simulations énergétiques, il devient possible d'améliorer la gestion de l'éclairage naturel et artificiel, contribuant ainsi à une agriculture en environnement contrôlé plus efficiente et durable.

1.3.3 Indicateur photo-thermique

Cette section présente le ratio photo-thermique (*PTR*), un *IDP* permettant le croisement entre les indicateurs thermiques de la section 1.3.1 et les indicateurs radiatifs de la section 1.3.2. Celui-ci est défini comme le rapport entre l'énergie issue du rayonnement (éclairage) et l'énergie thermique (température) (Liu, 1999). Le calcul de *PTR* est défini à l'équation (1.9) à l'aide de l'intégrale de l'éclairage journalier moyen (DLI_{moy}) et nombre de degrés-jour journaliers moyens (GDD_{moy}) sur la période à l'étude (Niu, Heins, Cameron, & Carlson, 2001).

$$PTR [mol \cdot m^{-2} \cdot degrés-jour^{-1}] = \frac{DLI_{moy} [mol \cdot m^{-2}]}{GDD_{moy} [degrés-jour]} \quad (1.9)$$

Islam et Morison (1992) soutiennent que le *PTR* a une plus grande importance physiologique pour les plantes que la température ou le rayonnement pris individuellement. Par conséquent, ils recommandent que le *PTR* soit considéré comme un indicateur important dans l'analyse de régression pour prédire le rendement des cultures.

1.3.4 Indicateurs énergétiques

La troisième classe d'IDP regroupe les indicateurs énergétiques, qui permettent d'évaluer la consommation, l'efficacité et les flux énergétiques au sein de la serre. Ces indicateurs sont nécessaires pour analyser les besoins en chauffage, en refroidissement et en éclairage artificiel, ainsi que pour optimiser l'utilisation des ressources énergétiques. Ils fournissent une vision globale des performances énergétiques en tenant compte des interactions entre les apports solaires, les pertes thermiques et les stratégies de régulation du climat. Intégrés aux modèles numériques, les indicateurs énergétiques facilitent l'identification des leviers d'amélioration pour réduire la consommation d'énergie, améliorer l'efficacité des systèmes de contrôle climatique et favoriser des pratiques plus durables en agriculture en environnement contrôlé.

1.3.4.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie (E) d'une serre est un indicateur essentiel dans l'évaluation de son efficacité énergétique (Lalonde, 2022). Dans leur article, Iddio, Wang, Thomas, McMorrow, et Denzer (2020) définissent la consommation d'énergie comme la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir des conditions environnementales optimales à l'intérieur de la serre, telles que la température, l'humidité, l'éclairage et la gestion du CO₂. Pour permettre des comparaisons plus objectives entre serres de tailles ou de types différents, cette consommation est souvent rapportée à la surface cultivée, donnant lieu à un indicateur normalisé appelé intensité énergétique (EUI), généralement exprimée en kWh/m². Ce dernier permet de quantifier l'énergie nécessaire par unité de surface pour atteindre les conditions de production souhaitée (Vadiee & Martin, 2014).

Son utilisation permet de comparer les performances énergétiques entre différentes méthodes de culture et de gestion, et d'identifier des pistes d'amélioration pour réduire les coûts (Engler & Krarti, 2021; Harbick & Albright, 2016; Iddio et al., 2020), ainsi que l'analyse de l'empreinte environnementale (Harbick & Albright, 2016; Risoud, 2009) de l'exploitation serricole.

1.3.4.2 Consommation d'énergie spécifique

La consommation d'énergie spécifique (*SEU*) d'une serre est un *IDP* qui mesure l'efficacité de l'utilisation de l'énergie dans la production agricole à l'intérieur d'une serre. Il évalue la relation entre la quantité d'énergie consommée par la serre pour conserver un environnement intérieur adéquat et la production agricole obtenue en retour (Risoud, 2009). Cette mesure est cruciale pour évaluer la viabilité économique et environnementale des systèmes de production en serre et guider les efforts visant à améliorer l'efficacité énergétique (Iddio et al., 2020). La *SEU* est calculée à l'aide de l'équation (1.10), où *M* représente la masse de produit obtenue et *E* représente la consommation d'énergie liée à cette production sur la même période (Golzar, Heeren, Hellweg, & Roshandel, 2018).

$$SEU [kWh \cdot kg^{-1}] = \frac{E [kWh]}{M [kg]} \quad (1.10)$$

L'analyse du lien entre la consommation d'énergie et la productivité des cultures sous serre prend une importance croissante dans les bilans énergétiques et économiques. La consommation d'énergie spécifique est notamment utilisée pour comparer les performances entre les serres et les enceintes de production végétale intérieure (*EPVI*), permettant d'évaluer leur efficacité respective en matière d'utilisation des ressources énergétiques (Graamans, Baeza, van den Dobbelen, Tsafaras, & Stanghellini, 2018; Harbick & Albright, 2016). Il peut aussi permettre d'analyser la viabilité des *EPVI*, par rapport aux serres modernes en fonction de leur emplacement géographique, en prenant en compte les variations climatiques et les coûts énergétiques spécifiques à différentes régions (Weidner, Yang, & Hamm, 2021).

1.3.4.3 Appel de puissance maximal

L'appel de puissance maximal (*P*) représente la puissance maximale en chauffage nécessaire pour maintenir des conditions climatiques optimales à l'intérieur de la serre sur une période donnée (Iddio et al., 2020). Il est particulièrement pertinent lorsqu'il s'agit de comparer différentes stratégies d'efficacité énergétique, telles que l'intégration du stockage thermique ou l'optimisation des systèmes de chauffage et de refroidissement. L'analyse de la puissance

permet non seulement d'évaluer l'impact des variations climatiques externes sur les besoins énergétiques de la serre, mais aussi d'identifier les périodes où la demande énergétique est la plus élevée (Engler & Krarti, 2021; Harbick & Albright, 2016).

En conclusion, l'optimisation de la consommation d'énergie constitue un enjeu central pour les espaces d'agriculture en environnement contrôlé. Les indicateurs énergétiques permettent d'évaluer l'efficacité des serres et sont souvent intégrés à des modèles numériques pour analyser et améliorer la gestion énergétique. Plusieurs études ont ainsi mis en évidence l'importance de la modélisation dans l'optimisation des performances énergétiques des serres.

Par exemple, Chen et al. (2015) ont d'abord développé un modèle basé sur des algorithmes d'optimisation hybrides afin d'anticiper la consommation d'énergie des serres et d'identifier les tendances d'utilisation de l'énergie. Par la suite, Rasheed et al. (2018) se sont intéressés à l'impact de différents concepts de serres sur la demande énergétique annuelle, mettant en évidence que les toits en forme gothique permettent de réduire la consommation d'énergie par rapport à d'autres formes architecturales. Dans une perspective d'optimisation de la consommation d'énergie spécifique, Golzar et al. (2018) ont évalué différentes approches à l'aide de modèles dynamiques, tandis que Shen, Wei, et Xu (2018) ont développé un modèle de prévision de la consommation d'énergie des serres et exploré diverses stratégies pour maintenir la température interne, un facteur clé influençant la demande énergétique. Poursuivant ces travaux, Belkadi et al. (2019) ont analysé la consommation d'énergie des systèmes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage, proposant des stratégies pour optimiser l'utilisation de l'énergie tout en assurant la qualité des cultures. Plus récemment, Adesanya et al. (2022) et Beaulac et al. (2024) ont utilisé le logiciel de simulation TRNSYS pour simuler et valider la demande en chauffage des serres, fournissant ainsi des données essentielles sur les besoins énergétiques en fonction des conditions climatiques.

Ces études démontrent l'importance des modèles numériques pour analyser et optimiser la consommation d'énergie en serre. En développant des modèles numériques axés sur des

indicateurs énergétiques, il devient possible de mieux comprendre les différentes interactions et leurs impacts sur la consommation d'énergie.

1.4 Synthèse de la revue de littérature

Le secteur des serres au Québec est en pleine expansion dans plusieurs régions, notamment grâce aux initiatives gouvernementales visant à renforcer l'autonomie alimentaire, avec une superficie atteignant près de 190 ha en 2024 (Gouvernement du Québec, 2024). Il se distingue par une prédominance d'entreprises de petite et moyenne taille, bien que la majorité des superficies cultivées soient concentrées entre les mains d'un nombre restreint de grandes exploitations. La plupart des producteurs exploitent des serres de petite taille, avec une utilisation majoritaire de structures recouvertes de polyéthylène. La culture des fruits et légumes en serre est majoritairement saisonnière, bien que certaines installations jumelées permettent une production à l'année. Par ailleurs, 93 % des serres québécoises sont chauffées, mais les énergies fossiles restent la principale source d'énergie, malgré les incitatifs gouvernementaux favorisant l'électrification (Gouvernement du Québec, 2024). Enfin, le climat québécois influence fortement la gestion des serres, et l'amélioration des pratiques culturales représente un levier essentiel pour accroître la production locale et réduire la dépendance aux importations alimentaires dans plusieurs régions.

Les modèles numériques sont des outils facilement accessibles pour analyser ces pratiques culturales dans les différentes régions. Grâce à ceux-ci, des données pertinentes sur le climat et la consommation d'énergie en serre peuvent facilement être utilisées pour générer des indicateurs de performances. Cette dernière est une étape qui manque dans la majorité des études énergétiques en serre; soit utilisé des indicateurs majoritairement agronomiques pour analyser les serres. Le Tableau 1.3 présente différents travaux portant sur l'utilisation de modèles numériques en serre, classés selon les types de résultats générés. Il regroupe également les IDP couramment utilisés dans cette revue de littérature, ainsi que les études pertinentes où ils ont été appliqués.

Tableau 1.3 Travaux pertinents sur des modèles numériques et des IDP couramment utilisées selon leurs classes

Classes	Travaux pertinents sur les modèles numériques	Indicateurs	Unité	Travaux pertinents sur les IDP
Indicateurs thermiques	Température intérieure ($\bar{T}_{ai,ND}, T_{ai,min}, T_{ai,max}$)	[°C]	- Bakker et al. (1995) - Bartok (2001)	
	Oscillation de la température ($T_{ai-swing,ND}$)	[°C]	- Abbas et al. (2023) - Myster et Moe (1995)	
	Indice de confort thermique (TCI)	[h]	- Al-Rikabi et al. (2023) - Tschurr et al. (2023)	
	Durée de la saison de croissance thermique ($TGSL$)	[j]	- Frich et al. (2002) - Wang (1963)	
	Degré-jour de croissance (GDD)	[degrés-jour]	- Edey (1977) - Quang et al. (2024)	
	Déficit de pression de vapeur (VPD)	[kPa]	- Inoue et al. (2021) - Tulva et al. (2023)	
	Intégrale de l'éclairage journalier (DLI)	[mol.m ⁻² .j ⁻¹]	- Baumbauer (2019) - Zhang et al. (2018)	
Indicateurs radiatifs	Zhang et al. (2020)			
	Joubert et al. (2023)			
	De Visser et al. (2012)			
	Yang et Wang (2015)	Facteur d'autonomie solaire (DAF)	[-]	- Kesik et Stern (2007) - Pereira et al. (2021)

Tableau 1.3 Travaux pertinents sur des modèles numériques et des IDP couramment utilisées selon leurs classes (suite)

Classes	Travaux pertinents sur les modèles numériques	Indicateurs	Unité	Travaux pertinents sur les IDP
Indicateur photo-thermique (<i>PTR</i>)			[mol.m ⁻² . degrés.jour ⁻¹]	- Islam et Morison (1992) - Liu (1999)
Indicateurs énergétiques	<ul style="list-style-type: none"> - Beaulac et al. (2024) - Rasheed et al. (2018) - Adesanya et al. (2022) - Shen et al. (2018) 	<ul style="list-style-type: none"> Consommation d'énergie (<i>E</i>) Intensité énergétique (<i>EUI</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> [kWh] [kWh.m⁻²] 	<ul style="list-style-type: none"> - Iddio et al. (2020) - Harbick et Albright (2016) - Vadiee et Martin (2014)
		Consommation d'énergie spécifique (<i>SEU</i>)	[kWh.kg ⁻¹]	<ul style="list-style-type: none"> - Risoud (2009) - Graamans et al. (2018)
		Appel de puissance maximal (<i>P</i>)	[kW]	<ul style="list-style-type: none"> - Iddio et al. (2020) - Engler et Krarti (2021)

CHAPITRE 2

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET CONTRIBUTION ATTENDUE

L'objectif principal de cette étude est de générer un ensemble d'indicateurs de performance (IDP) facilement exploitables et adaptés au contexte serricole, en vue d'évaluer leur pertinence et de proposer des pistes d'amélioration. Cette démarche s'inscrit dans un effort plus large visant à renforcer l'efficacité énergétique et environnementale des serres au Québec en proposant une méthode efficace pour l'analyse des performances des systèmes serricoles.

Pour y parvenir, deux approches complémentaires ont été mises en œuvre à l'aide de modèles numériques de serres. Pour chaque approche, une sélection ciblée des indicateurs à générer a été effectuée à partir de la littérature scientifique (Tableau 1.3), en fonction des objectifs de l'analyse et des capacités spécifiques des modèles utilisés. Une attention particulière a été portée à l'élimination des redondances afin de conserver, pour chaque dimension de performance évaluée, l'indicateur le plus pertinent ou le plus représentatif. Cette stratégie vise à optimiser la qualité de l'analyse en minimisant les chevauchements et en assurant la clarté des comparaisons. Cette méthode permet de bonifier l'évaluation en minimisant les chevauchements.

Les caractéristiques propres à chacune des deux approches utilisées sont détaillées à la section 2.1. La méthodologie de validation, essentielle pour assurer la fiabilité des résultats, est présentée à la section 2.2. Enfin, la section 2.3 présente les différents climats utilisés par les modèles pour générer les indicateurs.

2.1 Description des modèles

Comme discuté à la section 1.2, cette étude s'appuie sur deux approches de modélisation complémentaires pour générer les indicateurs de performance. La première approche utilise un modèle quasi-statique, basé sur un bilan thermique horaire intégré dans un chiffrier Microsoft

Excel tandis que la seconde repose sur un modèle dynamique simulé avec le logiciel de simulation énergétique TRNSYS 18 (Klein et al., 2017). Chacune de ces approches présente des avantages et des limites en ce qui concerne l'extraction des IDP. La méthode quasi-statique, bien que simplifiée et facile à utiliser, peut manquer de précision dans les scénarios de modélisation plus complexes. En revanche, le modèle dynamique, plus détaillé, permet une meilleure modélisation des processus thermiques et radiatifs, mais nécessite une plus grande capacité de calcul et une mise en œuvre plus complexe. Les sections 2.1.1 et 2.1.2 suivantes décrivent les caractéristiques de chacune des approches de modélisation, en mettant en évidence les étapes de mise en œuvre, les hypothèses sous-jacentes et les outils utilisés pour l'évaluation des performances des serres.

2.1.1 Modèle quasi-statique

La première méthode repose sur la création et l'utilisation d'un outil de calcul basé sur un modèle quasi-statique, conçu pour le grand public. Son objectif est d'extraire des indicateurs de performance énergétique pertinents afin de comparer l'efficacité des serres. Cet outil flexible permet de modéliser différents types de serres et d'évaluer leurs performances dans diverses régions climatiques.

Les objectifs spécifiques de cette méthode sont :

- développer un outil simple pour le calcul d'indicateurs de performance énergétique;
- évaluer la performance des enveloppes de serres à l'aide d'indicateurs appropriés;
- comparer l'appel de puissance et le dimensionnement des systèmes de chauffage;
- tester la capacité de l'outil à générer des indicateurs tout en identifiant ses limites.

Il est à noter que ce modèle a abouti à la publication, en septembre 2024, de la nouvelle référence économique du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), intitulée « Chauffage d'une serre – Comment calculer la consommation mensuelle » (Monfet, Haillot, Sylvain, & Caouette, 2024).

2.1.2 Modèle dynamique

La deuxième méthode utilise un modèle dynamique de serre individuelle, intégrant un modèle de laitue avec un indice de surface foliaire (LAI) constant, simulé avec le logiciel TRNSYS. Ce modèle a été sélectionné pour sa capacité à analyser en détail l'environnement intérieur de la serre, en intégrant les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA) ainsi que l'impact thermique des plantes. Cette approche permet d'examiner plus précisément les interactions entre les différentes variables, générant ainsi un ensemble d'indicateurs rigoureux sur la performance des serres.

Les objectifs spécifiques de cette méthode sont :

- vérifier la capacité du modèle dynamique à produire des indicateurs de performance thermiques, radiatifs et énergétiques pertinents pour les espaces AEC;
- identifier les limites des indicateurs générés et proposer des ajustements si nécessaire.

Cette approche exploite les avantages de la simulation dynamique pour générer des indicateurs de performance détaillés, tout en testant la pertinence et la robustesse de cette approche pour comparer différents scénarios de serres.

Cette deuxième approche a abouti à la soumission d'un article scientifique à la revue *Agricultural Systems*. Cet article, qui synthétise les principales méthodologies, analyses et résultats obtenus, est présenté en détail dans le CHAPITRE 4. Il constitue une contribution significative à la compréhension et à l'application des IDP à l'aide du modèle dynamique, en mettant en lumière leurs performances et leurs limites tout en proposant certaines propositions d'amélioration à des IDP existants.

2.2 Validation des modèles

Les modèles utilisés dans cette étude, qu'ils soient de type quasi-statique ou dynamique, ont été validés afin de s'assurer de leur représentativité et de leur fiabilité. La validation a consisté à comparer les résultats de simulation à des données expérimentales disponibles. La validation de l'outil quasi-statique a été effectuée en comparant les estimations de consommation d'énergie générées par l'outil avec des valeurs réelles mesurées pour plusieurs installations de serres. Dans un premier temps, les données de consommation réelle ont été collectées à partir d'une enquête réalisée à l'automne 2023, en collaboration avec les partenaires du projet, soit Gobeil Dion & Associés et Climax Conseil, deux références dans le milieu serricole québécois. Les producteurs et productrices ayant accepté de participer ont rempli une fiche détaillant leurs installations, les caractéristiques spécifiques de leurs serres, ainsi que leur consommation d'énergie (annuelle, mais quelquefois mensuelle). Dix sites, situés dans différentes régions du Québec et représentant une variété de configurations, de source d'énergie et de conditions climatiques, ont été sélectionnés pour la validation. Pour chaque site, les données météorologiques de la saison spécifiée par la fiche ont été intégrées dans l'outil de calcul, en utilisant les informations climatiques de la station météorologique la plus proche afin d'assurer la pertinence des données. Par la suite, les estimations simulées de consommation d'énergie ont été comparées aux valeurs observées pour évaluer la précision de l'outil.

En ce qui concerne le modèle dynamique, celui-ci a été spécifiquement conçu pour représenter la serre du CÉTAB+, le Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité situé à Victoriaville, au Canada. La validation du modèle a été réalisée en comparant les données mesurées à l'aide de capteurs installés dans la serre aux résultats de simulation. Ces simulations ont été effectuées en utilisant comme données météorologiques celles enregistrées par la station météo installée sur le site.

À la suite de cette étape de validation, les modèles ont été jugés suffisamment fiables pour être utilisés dans la génération des indicateurs de performance. Ceux-ci sont ensuite calculés pour chacun des climats représentatifs présentés dans la section 2.3.

2.3 Étude de cas : analyse des différents climats étudiés

Le Québec présente une grande diversité climatique en raison de sa vaste superficie et de sa géographie variée (Gouvernement du Québec, 2022b). Cette diversité influence directement les pratiques agricoles, notamment la culture en serre, qui permet de prolonger la saison de production malgré des conditions météorologiques parfois extrêmes.

Dans la présente étude, trois régions représentatives du climat et ayant des initiatives serricoles (CISA et al., 2024) ont été sélectionnées afin d'y utiliser les modèles, soit Montréal, Baie-Comeau et Kuujjuaq. Le Tableau 2.1 compare ces trois régions climatiques en fonction de plusieurs critères. Il inclut la localisation géographique des zones étudiées, leur classification climatique selon le système de Köppen-Geiger, qui décrit les grandes catégories de climats en fonction des températures et des précipitations, ainsi que leur zone climatique selon la norme ASHRAE, utilisée pour évaluer les conditions de chauffage et de construction des bâtiments. Enfin, le tableau présente les degrés-jour de chauffage (DJC), un indicateur clé permettant d'estimer les besoins énergétiques en chauffage selon la rigueur du climat.

Parmi les variables climatiques les plus influentes, la température extérieure et le rayonnement solaire jouent un rôle central dans la dynamique thermique et radiative des structures. Les sections 2.3.1 et 2.3.2 suivantes présentent donc ces deux facteurs pour les trois climats étudiés. Celles-ci s'appuient sur les normales climatiques, définies comme des moyennes statistiques calculées sur une période de 30 ans, ici de 1991 à 2020, qui permettent de représenter les tendances climatiques typiques d'une région donnée.

Tableau 2.1 Caractéristiques des climats étudiés

Type de climat	Localisation	Classification climatique Köppen-Geiger ¹	Zone climatique ASHRAE ²	$DJC_{18^\circ C}^3$
Froid (Montréal)	45.5°N; 73.6°O	Dfa	6A	4 257
Très froid (Baie-Comeau)	49.1°N; 68.3°O	Dfb	7	5 588
Subarctique (Kuujjuaq)	58.1°N; 68.5°O	Dfc	8	8 186

¹ Plantmaps (2024)
² ASHRAE (2021b)
³ Degrés-jour de chauffage (ASHRAE, 2021a)

2.3.1 Température extérieure

La température extérieure influence directement la gestion thermique des serres. Par temps froid, les pertes de chaleur convectives, et par infiltration et exfiltration abaissent la température intérieure, nécessitant un chauffage pour assurer des conditions optimales à la croissance des plantes (Bakker et al., 1995). La Figure 2.1 présente les normales climatiques de la température extérieure au Québec pour la période 1991 à 2020 pour les trois climats étudiés (Gouvernement du Canada, 2024).

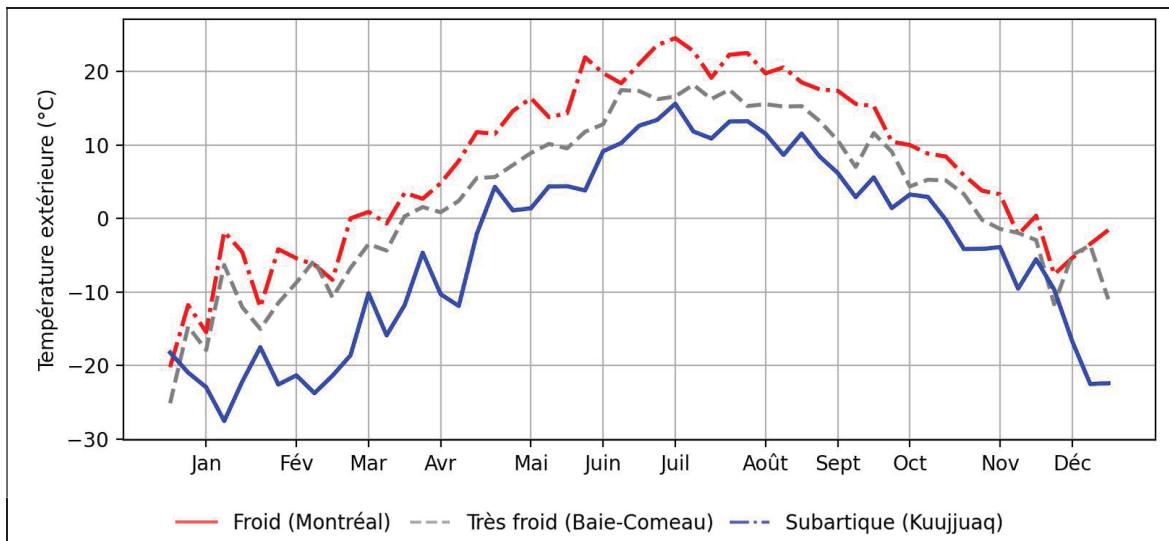


Figure 2.1 Moyenne hebdomadaire de la température extérieure selon la normale climatique (1991-2020) pour trois climats représentatifs du Québec
 Données tirées de Gouvernement du Canada (2024)

On y constate une forte influence des régions étudiées sur les températures extérieures, avec des valeurs hivernales particulièrement basses, descendant jusqu'à -30 °C, pour le climat subarctique. En été, la température augmente progressivement dans les trois climats, atteignant une valeur maximale en juillet. Ces tendances saisonnières sont bien marquées entre les climats montrant des écarts plus importants en hiver qu'en été, soulignant l'impact des conditions climatiques nordiques sur les températures hivernales.

2.3.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est essentiel à la croissance des plantes, mais peut être insuffisant, surtout en hiver dans les régions nord-américaines centrales et septentrionales (ASHRAE, 2019). Il se divise en rayonnement direct, provenant du soleil, et diffus, dispersé par l'atmosphère ou les nuages ou réfléchi par les surfaces environnantes. Environ 99 % des longueurs d'onde et donc de l'énergie associée au rayonnement se situent entre 300 et 2 500 nm (Bakker et al., 1995). La transmission du rayonnement solaire en serre dépend des propriétés optiques des revêtements (qui dépendent aussi de la longueur d'onde), de l'angle d'incidence et de la géométrie de la structure, avec un facteur de transmittance variant généralement entre 60 % et 90 % (Bartok, 2001).

Seul le rayonnement photosynthétique actif (PAR), entre 400 et 700 nm, est directement utilisé par les plantes. Il représente environ la moitié du rayonnement solaire total et seulement une partie est absorbée pour la photosynthèse, le reste étant réfléchi ou converti en chaleur (Bakker et al., 1995; Grimenes & Thue-Hansen, 2019). La Figure 2.2 présente les normales climatiques du rayonnement solaire total au Québec pour la période 1991 à 2020 pour les trois climats étudiés (Gouvernement du Canada, 2024).

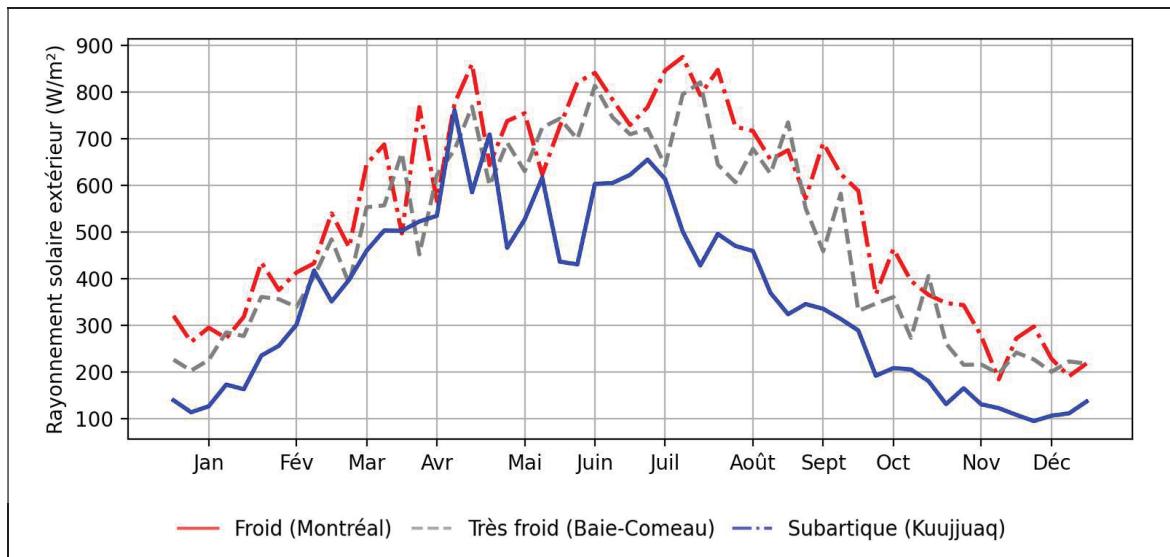


Figure 2.2 Moyenne hebdomadaire du rayonnement solaire extérieur maximum quotidien selon la normale climatique (1991-2020) pour trois climats représentatifs du Québec
Données tirées de Gouvernement du Canada (2024)

La Figure 2.2 met en évidence une variation saisonnière marquée, avec des valeurs plus faibles en hiver et un rayonnement solaire extérieur maximal atteint durant l'été. Le climat froid et très froid enregistre des niveaux de rayonnement similaires, bien que le climat froid présente légèrement des valeurs plus élevées. En revanche, le climat subarctique, situé plus au nord, affiche un rayonnement nettement plus bas en raison de sa latitude, avec une montée plus progressive au printemps et un déclin plus rapide à l'automne. Ces tendances soulignent l'impact de la géographie sur l'ensoleillement naturel disponible.

Une meilleure compréhension des climats utilisés pour générer les indicateurs à l'aide des deux modèles facilitera l'interprétation de leur impact sur les résultats et permettra de tirer des conclusions plus solides.

2.4 Contribution attendue

Cette recherche propose une méthode pour générer des indicateurs de performance des serres, en utilisant deux modèles numériques appliqués à trois climats représentatifs du Québec. Le premier, un modèle quasi-statique, est simple et rapide à utiliser, permettant de produire des

indicateurs énergétiques facilement exploitables. Le second, un modèle dynamique, intègre les interactions thermiques et les systèmes présents dans la serre, offrant une analyse plus détaillée des performances.

Cette double approche permet d'extraire des indicateurs pertinents tout en évaluant les limites de chaque modèle. En combinant la simplicité du modèle quasi-statique et la précision du modèle dynamique, la méthode vise à fournir une vision complète des performances des serres dans différents contextes climatiques.

Par ailleurs, la standardisation des indicateurs issus de ces modèles permet d'établir une base comparative objective et rigoureuse, essentielle pour améliorer les pratiques culturales et énergétiques du secteur serricole. En contribuant à une meilleure évaluation des performances et en identifiant des pistes d'amélioration, cette étude apporte une valeur significative à la recherche appliquée en agriculture sous serre.

CHAPITRE 3

MODÈLE QUASI-STATIQUE

Cette première section explore l'utilisation du modèle quasi-statique pour la génération des IDP. La section 3.1 présente une description détaillée du modèle, suivie, en section 3.3 , de l'étude de cas utilisée pour produire ces indicateurs. Enfin, la section 3.4 expose les résultats obtenus et propose une analyse des IDP générés.

3.1 Description du modèle

Dans la première étape de cette recherche, un bilan thermique simplifié (équation (3.1)) d'une serre a été élaboré pour l'outil de calcul quasi-statique, permettant de générer rapidement des indicateurs de performance énergétique pour les serres. Ce bilan thermique permet d'estimer les besoins en chauffage et la consommation d'énergie associée en fonction de plusieurs paramètres : les données météorologiques locales, les températures de consigne à maintenir, le type d'installation et les équipements utilisés. Ce calcul, effectué sur une base horaire, repose sur les données météorologiques spécifiques à la localisation choisie et les températures de consigne définies pour la culture en question. L'outil de calcul est structuré en deux sections : un onglet pour les données d'entrée, permettant de personnaliser la serre selon les paramètres ci-dessous, et un second affichant les résultats des besoins de chauffage.

Les données d'entrée incluent celles provenant des fichiers météorologiques canadiens pour le calcul énergétique (FMCCE) de normales climatiques (Gouvernement du Canada, 2024) pour 69 localisations au Québec, avec possibilité de manuellement ajouter des données pour une année spécifique aux besoins. La température diurne (T_d) et nocturne (T_n) sont ajustées en fonction des conditions de production, influencées par les variétés cultivées. Les paramètres de l'installation comprennent l'architecture [gothique, Venlo, ou tunnel comme illustré à la Figure 3.1 (Bartok, 2001)], les dimensions de la serre, les caractéristiques physiques des revêtements, le type de construction et le facteur d'infiltration.

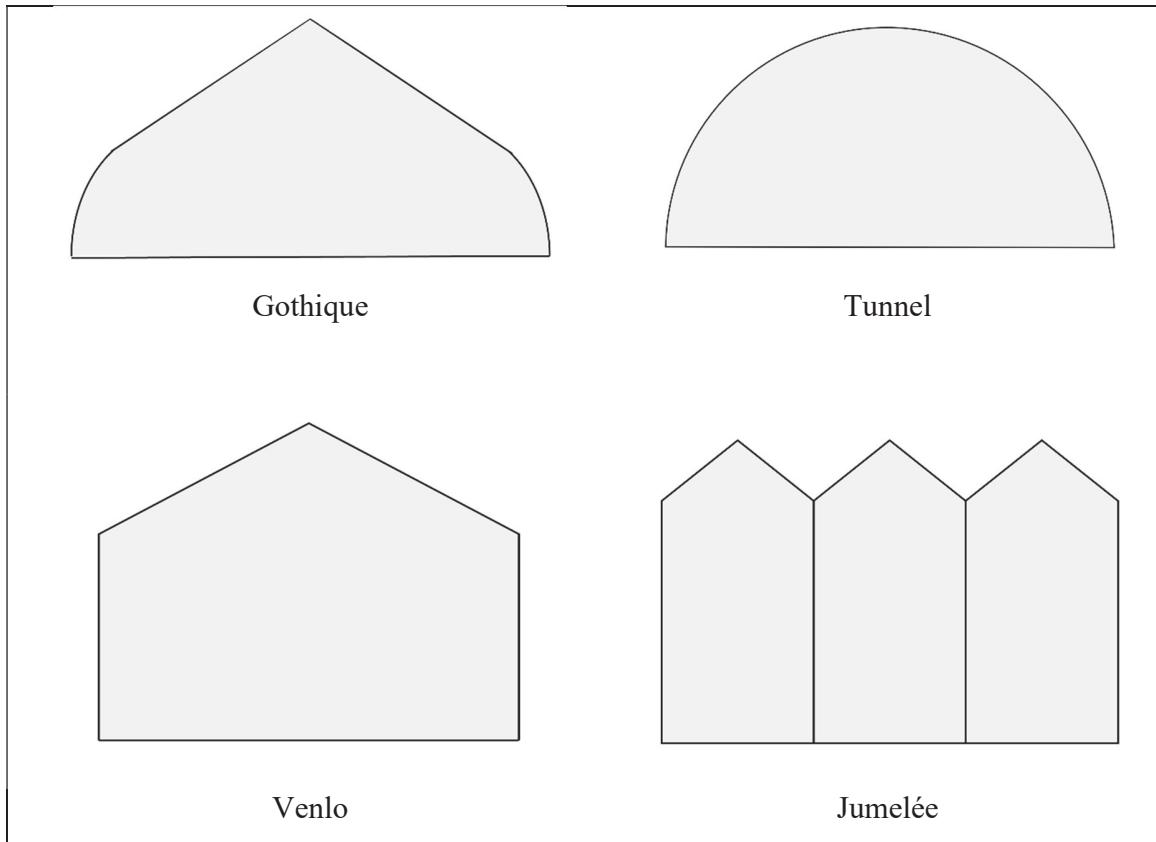


Figure 3.1 Forme de serres

À partir de ses données d'entrée, le bilan thermique de l'équation (3.1) est effectué à chaque pas de temps horaire pour déterminer le besoin de chauffage nécessaire pour respecter la température de consigne. Différents indicateurs énergétiques sont affichés dans l'onglet résultats de l'outil réalisé sur le tableur Excel. Il s'agit d'un modèle quasi-statique puisque l'inertie thermique des éléments à l'intérieur de la serre n'est pas considérée.

Le bilan thermique utilisé [équation (3.1)] inclut les principaux flux thermiques (gains et pertes) à travers l'enveloppe de la serre et les infiltrations d'air, calculés sur une base horaire pour estimer les besoins de chauffage (Figure 3.2). Les besoins énergétiques d'une serre sont étroitement liés aux pertes thermiques à travers son enveloppe et son sol. Ces pertes comprennent des échanges conductifs, convectifs et radiatifs, influencés par le coefficient de transfert thermique et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre.

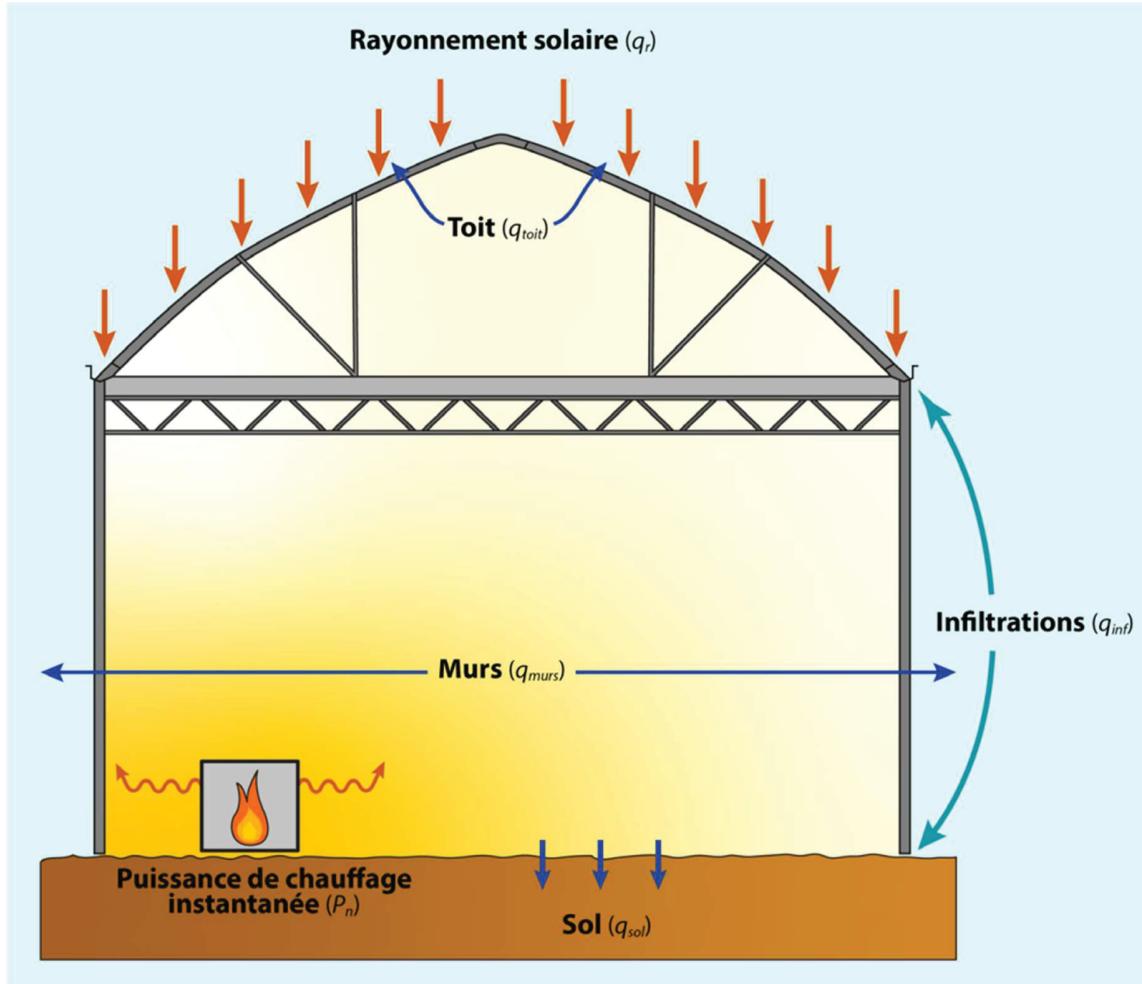


Figure 3.2 Bilan thermique considéré pour l'outil de calcul statique
Tiré de Monfet et al. (2024)

Le schéma de calcul (Figure 3.3) est implémenté pour calculer des consommations énergétiques. Il se décompose en trois phases principales : la collecte de données d'entrée, les calculs intermédiaires, et enfin l'estimation des résultats en termes de consommation d'énergie.

Dans la première phase, les données d'entrée sont collectées, comprenant :

- Données météorologiques : température extérieure, rayonnement solaire, et autres paramètres climatiques qui influencent les pertes et gains thermiques de la serre.

- Températures de consigne : température souhaitée à l'intérieur de la serre pour garantir des conditions optimales pour les cultures.
- Forme et caractéristiques structurelles : dimensions, matériaux de construction, et propriétés thermiques de la serre, qui influencent les échanges thermiques.
- Équipement de chauffage : spécifications techniques de l'équipement de chauffage, son efficacité énergétique, et le type d'énergie utilisé, qui sont essentiels pour évaluer la consommation d'énergie.

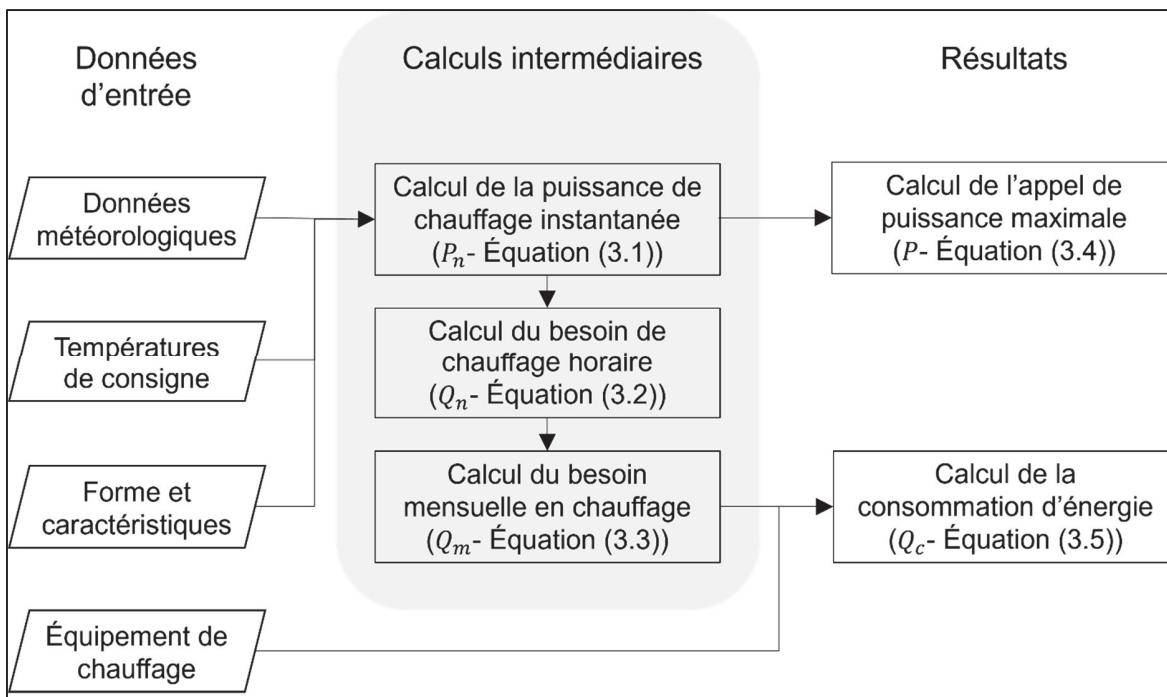


Figure 3.3 Aperçu de l'approche de calcul

Ensuite, les calculs intermédiaires (détailés au Tableau 3.1) permettent de modéliser les échanges thermiques de la serre et se déroulent en trois étapes. D'abord, la puissance instantanée de chauffage [P_n , équation (3.1)] est calculée afin d'évaluer la quantité d'énergie requise pour maintenir la température de consigne en fonction des pertes thermiques (par l'enveloppe et par infiltration) et des gains solaires. Si la puissance calculée est négative, indiquant qu'aucun chauffage n'est nécessaire, elle est fixée à zéro. Ensuite, les besoins de chauffage horaires [Q_n , équation (3.2)] sont estimés en multipliant P_n par la durée de chaque

intervalle de temps, donnant ainsi une estimation de la consommation d'énergie horaire pour compenser les pertes thermiques. Enfin, la consommation mensuelle de chauffage [Q_m , équation (3.3)] est obtenue en additionnant les besoins horaires pour chaque jour du mois, permettant d'observer les variations mensuelles et saisonnières de la consommation d'énergie.

La phase finale consiste à estimer la consommation totale d'énergie [Q_c , équation (3.5)] pour la période souhaitée en ajustant les besoins en fonction de l'efficacité de l'équipement de chauffage et du pouvoir calorifique de la source d'énergie utilisée, ici le propane. En tenant compte de ces paramètres, ce modèle permet de fournir une estimation précise de l'énergie nécessaire pour maintenir des conditions optimales dans la serre, tout en intégrant les variations de performance dues aux caractéristiques de l'environnement et de l'équipement.

Après avoir détaillé la structure, les hypothèses et les équations utilisées pour élaborer le modèle quasi-statique, il est essentiel d'en évaluer la fiabilité. La section suivante présente donc la validation de l'outil, réalisée à partir de données réelles de consommation énergétique de serres, afin de vérifier la précision des résultats générés par le modèle.

.

Tableau 3.1 Liste des équations de l'outil de calculs quasi-statique

Éléments calculés	Équations	Définition des paramètres	#
Puissance instantanée de chauffage	$P_n = [q_{murs} + q_{toit} + q_{sol} + q_{inf}] - q_r$ où $P_n = 0$ si $P_n < 0$	- P_n : Puissance instantanée de chauffage nécessaire pour équilibrer le bilan thermique [W]. - q_{murs} : Pertes par les murs de la serre [W], équation (3.6). - q_{toit} : Pertes issues du toit de la serre [W], équation (3.6). - q_{sol} : Perte par le sol due au périmètre [W], équation (3.1). - q_{inf} : Perte par infiltration de la serre [W], équation (3.8). - q_r : Gain dû au rayonnement solaire [W], équation (3.9).	
Besoin de chauffage	$Q_n = P_n \cdot dt$	- Q_n : Quantité d'énergie requise chaque heure [Wh], - dt : Pas de temps du fichier météo [h].	(3.2)
Consommation mensuelle de chauffage	$Q_m = \sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^{n=24} Q_n$	- Q_m : Consommation mensuelle de chauffage [Wh]. - j : Jour du mois. - n : Heure du jour. - m : Nombre de jours dans le mois.	(3.3)
Appel de puissance maximale	$P = \max(P_n)$	- P : Appel de puissance maximale sur la période [W].	(3.4)

Tableau 3.1 Liste des équations de l'outil de calculs quasi-statique (suite)

Éléments calculés	Équations	Définition des paramètres	#
Consommation d'énergie	$Q_c = \frac{Q_m \cdot B}{\eta \cdot CC}$	<ul style="list-style-type: none"> - Q_c : Consommation mensuelle d'énergie [L^1]. - η : Efficacité moyenne de combustion ou de l'unité de chauffage, par exemple 0,85 pour une efficacité de 85 % pour le propane. - CC : Capacité calorifique brute de la source d'énergie [kJ], voir Tableau AI.5 - B : Facteur de conversion [3,6 $\text{kJ} \cdot \text{Wh}^{-1}$] 	(3.5)
Pertes par les murs et le toit	$q_{murs} \text{ ou } q_{toit} = K \cdot \sum U_x \cdot A_x \cdot [T_{int} - T_{ext}]$	<ul style="list-style-type: none"> - U_x : Coefficient de transfert thermique du revêtement de la surface x [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], voir Tableau AI.1 - A_x : Aire de la surface x [m^2]. - K : Facteur de construction [-], voir Tableau AI.2 - T_{int} : Température de consigne [K]. - T_{ext} : Température extérieure [K]. 	(3.6)
Pertes par le sol	$q_{sol} = U_p \cdot L \cdot [T_{int} - T_{sol}]$	<ul style="list-style-type: none"> - U_p : Coefficient de perte thermique par le périmètre [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$], voir Tableau AI.3 - L : Périmètre de la serre [m]. - T_{sol} : Température du sol (8°C en moyenne au Québec (Gouvernement du Québec, 2012)) [K]. 	(3.7)

Tableau 3.1 Liste des équations de l'outil de calculs quasi-statique (suite)

Éléments calculés	Équations	Définition des paramètres	#
Pertes par infiltration	$q_{inf} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot N \cdot V_{int}}{C1} \cdot [T_{int} - T_{ext}]$	<ul style="list-style-type: none"> - c_p : Chaleur spécifique de l'air [$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$], 1 004 $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ à -20 C. - ρ : Masse volumique de l'air [$kg \cdot m^{-3}$], 1,395 $kg \cdot m^{-3}$ à -20 C. - N : Taux d'infiltration d'air de la serre [h^{-1}], voir Tableau AI.4 - V_{int} : Volume intérieur de la serre considéré [m^3]. - C1 : constante de conversion d'unité [$3600 s \cdot h^{-1}$]. 	(3.8)
Gains dus au rayonnement solaire	$q_r = E_b \cdot e \cdot A_{sol}$	<ul style="list-style-type: none"> - E_b' : Rayonnement solaire total sur une surface horizontale utilisée pour les calculs [$W \cdot m^{-2}$]. - e : Coefficient de captage de radiation solaire du revêtement [-], voir Tableau AI.1 - A_{sol} : Empreinte (superficie) au sol de la serre [m^2]. 	(3.9)
Coefficient déperdition par surface au sol	$\text{de } U_{ds} \text{ par } = \frac{[K \cdot (q_{murs} + q_{toit} + q_{sol}) + q_{inj}]}{A_{sol} \cdot [T_{int} - T_{ext}]}$	<ul style="list-style-type: none"> - U_{ds} : Coefficient de déperdition par surface au sol [$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$]. - A_{sol} : Empreinte (superficie) au sol de la serre [m^2]. 	(3.10)

¹ Le litre [L] est utilisé comme unité pour la consommation mensuelle d'énergie puisque l'exemple du propane est utilisé.

3.2 Validation du calcul

Comme décrit en détail à la section 2.2, la validation de l'outil quasi-statique repose sur la comparaison entre les consommations d'énergie simulées et les données réelles recueillies auprès de dix producteurs répartis dans différentes régions du Québec. Le Tableau 3.2 présente les résultats de cette validation basée sur l'erreur relative entre les données mesurées et calculées.

Globalement, l'erreur relative annuelle varie de -18.1 % à 22.5 %, ce qui a été déterminé comme acceptable pour un modèle quasi-statique simplifié sur une base horaire permettant la modélisation d'une aussi grande diversité de serres puisqu'il est sous la barre des ± 30% recommandé par l'ASHRAE (2014). En effet, bien que l'ASHRAE Guideline 14-2014 recommande d'évaluer la précision des modèles à l'aide d'indicateurs comme le NMBE et le CV(RMSE) calculés sur des pas de temps horaires ou mensuels, l'utilisation de l'erreur relative annuelle est justifiée par le caractère exploratoire et comparatif de la présente démarche. Cette approche vise à estimer les tendances globales de consommation énergétique plutôt qu'à effectuer une calibration détaillée, ce qui est cohérent avec les objectifs de ce modèle. Les écarts peuvent être expliqués par des différences entre l'efficacité réelle et modélisée des équipements de chauffage, les conditions climatiques locales, et les spécificités des structures des serres, qui ne sont pas totalement intégrées dans un modèle quasi-statique ou même considéré par les producteurs lors de l'enquête. De plus, cette validation a aussi indiqué qu'une des limites de l'outil est que les températures de consigne doivent être comprises entre 10°C et 30°C afin d'obtenir des résultats plus représentatifs.

Tableau 3.2 Validation de l'outil quasi-statique

#	Localisation	Type de serre	Superficie, m ²	Autres spécificités	Données –source d'énergie & année	E.R., %
1	Assomption	Jumelée	7062	N/A	Gaz naturel 2023	19.9
2	Assomption	Individuelle (3 serres)	139 279 348	N/A	Propane 2023	22.5
3	Sherbrooke	Individuelle	341	N/A	Propane 2023	-18.1
4	Sherbrooke	Jumelée Individuelle (2 serres)	1229 2 x 476	N/A	Granule 2022-2023	21.6
5	St-Clothide	Individuelle (Pépinière Production)	93 307	N/A	Propane 2023	9.8
6	Rivière-du-Loup	Individuelle	332	Mur nord isolé	Propane 2023	11.6
7	Rimouski	Individuelle	111	N/A	Mazout 2023	15.0
8	Rimouski	Individuelle (2 serres)	251 297	Utilisation 03 à 10	Propane 2022-2023	-14.7
9	Carleton	Individuelle (2 serres)	279	Utilisation 05 à 09	Électrique 2023	-11.1
10	Saguenay	Individuelle (3 serres)	326 390 390	Utilisation 02 à 05	Électricité 2024	17.7

En conclusion, l'outil permet aux utilisateurs de comparer les performances énergétiques de différentes serres sans nécessiter de données météorologiques complexes d'un site ou de paramètres dynamiques, ce qui en fait un choix pertinent pour des analyses préliminaires d'indicateurs de performance énergétique.

3.3 Étude de cas

Dans le cadre de cette étude de cas, deux serres ont été utilisées pour comparer différents indicateurs de performance. La première serre (Serre 1) possède les caractéristiques de celle du CÉTAB+, Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité, localisée à Victoriaville, Canada, qui a une superficie au sol de 247 m². La seconde serre (Serre 2), est une structure de plus grande envergure, inspirée du site 1 du Tableau 3.2, où le nombre de chapelles a été réduit à trois. Cette serre à une superficie au sol de 2 304 m² et présente des caractéristiques distinctes qui permettent d'explorer une gamme plus large de scénarios et exploiter de façons plus distingue les indicateurs

Le Tableau 3.3 présente en détail les caractéristiques techniques et les paramètres spécifiques des deux serres modélisées. Les deux serres étudiées sont considérées comme chauffées toute l'année, avec une température de consigne constante de 15 °C, de jour comme de nuit. Cette température correspond à la limite inférieure généralement recommandée pour assurer une croissance adéquate de la laitue (Abbas et al., 2023; Gent, 2017; Grahn, Hellier, Benedict, & Miles, 2015; Wang et al., 2023). L'énergie utilisée pour le chauffage est l'électricité et donc une efficacité de conversion en chaleur de 100 % est considérée.

Tableau 3.3 Caractéristiques des serres étudiées

Section	Facteur	Serre 1	Serre 2
Géométrie	Type de serre	Serre individuelle	Serre jumelée
	Architecture	Gothique	Gothique
	Orientation	Est-Ouest	Nord-Sud
Dimensions	Largeur de chapelle	10.7 m	9.6 m
	Longueur	23.2 m	80 m
	Hauteur du muret	0 m	0.9 m
	Hauteur totale du mur	-	6 m
	Nombre de chapelles	-	3
Construction	Revêtement	Mur Nord	Polyéthylène double
		Mur Sud	Polyéthylène double
		Mur Est	Polyéthylène double
		Mur Ouest	Polyéthylène double
	Toit	-	Polyéthylène double
		-	Mur isolé
	Facteur de construction	Film plastique sur ossature métallique	Feuille plastique structurée 8 mm
			Isolé avec 50mm (2 po) de polystyrène expansé s'étendant 610mm (24 po) dans le sol
	Type de périmètre	Non isolé	
	Infiltration	Standard	Standard

3.4 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats obtenus à partir de l'outil quasi-statique, ainsi que leur interprétation en lien avec les objectifs d'analyse énergétique des serres. La première étape des résultats consiste à sélectionner les indicateurs pertinents pour l'outil quasi-statique (section 3.4.1) pour ensuite les générer pour les trois climats décrits à la section 2.3 (section 3.4.2). Dans cette dernière section, les résultats seront comparés aussi afin de discuter la viabilité et la pertinence de chacun de ces indicateurs.

3.4.1 Sélection des indicateurs de performance pertinents

Plusieurs indicateurs de performance ont été identifiés comme pertinents pour exploiter l'outil de calcul quasi-statique. Le principal indicateur identifié est la consommation mensuelle d'énergie pour le chauffage, désignée sous le symbole Q_c , dans l'équation (3.5). Cet indicateur fournit une estimation de l'énergie totale requise pour maintenir la température souhaitée à l'intérieur de la serre sur une période d'un mois. Il permet ainsi d'évaluer la demande énergétique nécessaire pour garantir des conditions optimales de croissance, et offre une première approche pour juger de l'efficacité énergétique de la serre dans le temps. Dans cette étude, les valeurs mensuelles de Q_c seront additionnées pour obtenir la consommation d'énergie annuelle pour le chauffage de la serre (E). Similairement, l'intensité énergétique (EUI) a aussi été sélectionnée pour évaluer E par rapport à la surface au sol de la serre.

En complément, un autre indicateur important est l'appel de puissance maximal en chauffage, noté P telle que défini à l'équation (3.4). Cet indicateur fournit une mesure de la demande en chauffage à un instant donné, permettant d'observer la variation de la consommation d'énergie en fonction des fluctuations des conditions climatiques et des besoins thermiques de la serre. En suivant l'évolution de l'appel de puissance, il est possible de mieux comprendre les dynamiques de chauffage au cours des différentes périodes de la journée et de l'année, ce qui est essentiel pour l'optimisation de la gestion énergétique.

Un quatrième indicateur clé ayant été identifié comme pertinent est le coefficient de déperdition thermique par unité de surface au sol, désigné par U_{ds} . Ce coefficient, défini par l'équation (3.10) permet d'évaluer l'efficacité thermique de la serre indépendamment de son emplacement géographique ou de sa taille. Plus précisément, U_{ds} représente la somme des pertes de chaleur par les surfaces q (murs, toit, sol) et par infiltration q_i , divisée par l'empreinte au sol de la serre. En permettant une mesure standardisée des pertes thermiques, il offre une manière de juger de l'impact des différents éléments structurels (comme le type de revêtement,

l'isolation, et la gestion de l'infiltration) sur l'efficacité énergétique globale. En outre, cet indicateur permet d'exclure les spécificités géographiques, en offrant une mesure qui peut être appliquée à différents types de serres, quel que soit leur emplacement.

En résumé, quatre indicateurs de performance énergétique ont été retenus, soit la consommation d'énergie annuelle (E), l'intensité énergétique (EUI), l'appel de puissance maximal (P) et le coefficient de déperdition thermique rapporté à la surface au sol (U_{ds}). Les résultats associés à ces indicateurs sont présentés et analysés à la section 3.4.2.

3.4.2 Analyse des indicateurs de performance

Le Tableau 3.4 présente les quatre indicateurs sélectionnés à la section 3.4.1 pour la Serre 1 (248 m^2) et la Serre 2 ($2\ 304 \text{ m}^2$) pour les trois climats.

Tableau 3.4 Indicateurs de performances du modèle quasi-statique générés pour les deux serres à l'étude

	E [MWh]		EUI [kWh· m ⁻²]		P [kW]		U_{ds} [W· K ⁻¹ · m ⁻²]	
	Serre 1	Serre 2	Serre 1	Serre 2	Serre 1	Serre 2	Serre 1	Serre 2
Froid (Montréal)	121	1 061	490	460	83	732		
Très froid (Baie-Comeau)		166	1 460	672	633	81	715	8.0
Subarctique (Kuujjuaq)	269	2 365	1 089	1 026	105	930		7.7

Les résultats obtenus, présentés au Tableau 3.4, soulignent l'impact de la dimension et l'enveloppe d'une serre sur ses besoins énergétiques, en particulier dans des climats froids et subarctiques. Bien que les matériaux et l'isolation diffèrent légèrement entre les deux serres (voir Tableau 3.3), les différences observées de E et P s'expliquent principalement en raison

de la surface près de dix fois supérieure entre la serre Serre 1 et la Serre 2 (247 m^2 contre $2\,304 \text{ m}^2$).

La consommation annuelle d'énergie (E) est ainsi en moyenne 8.8 fois plus élevée dans la Serre 2 que dans la Serre 1, tous climats confondus. Cette différence est cohérente avec les dimensions plus grandes de la structure, mais elle indique également une efficacité énergétique légèrement supérieure, confirmée par l' EUI . En effet, l' EUI de la Serre 2 est systématiquement plus faible, avec une réduction moyenne de 5 à 6 %, ce qui signifie qu'elle consomme moins d'énergie par mètre carré de surface cultivée. Ce gain d'efficacité est attribuable à un meilleur rapport surface/volume, qui réduit les pertes thermiques relatives. La puissance maximale (P), en revanche, se révèle encore plus sensible à la taille de la serre que la E . Pour la Serre 2, la puissance de chauffage requise est environ 9 à 11 fois plus élevée que pour la Serre 1, ce qui dépasse le ratio observé pour E . Cela s'explique par le fait que les pics de puissance dépendent fortement du volume à chauffer instantanément.

Le coefficient U_{ds} , qui représente les pertes thermiques par unité de surface au sol est le seul indicateur à présenter des valeurs relativement stables entre les climats et les deux serres. La Serre 1 affiche un U_{ds} de $8.0 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, tandis que celui de la Serre 2 est légèrement plus faible, à $7.7 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Cette diminution de 3.75 % peut être attribuée à un compromis typique des grandes serres : bien que leurs besoins énergétiques globaux soient plus élevés, elles bénéficient d'un meilleur ratio surface/volume, entraînant ainsi des coûts en énergie plus faibles par unité de surface cultivée. Cette variation est aussi cohérente avec l'évaluation de l' EUI où la variation est proportionnelle. Ainsi, U_{ds} constitue un indicateur normalisé utile pour comparer rapidement différentes structures, indépendamment du climat ou de la taille.

En résumé, chacun des indicateurs joue un rôle complémentaire. La consommation énergétique annuelle et l'intensité énergétique permettent d'évaluer les besoins en énergie, mais dépendent fortement de la structure et du climat. L'appel de puissance maximal permet de saisir les

besoins de pointe, essentiels pour le dimensionnement du chauffage. Enfin, le coefficient U_{ds} , en étant indépendant du contexte climatique, est un bon indicateur structurel pour comparer les performances thermiques des enveloppes. Ensemble, ces indicateurs permettent une analyse complète et cohérente de la performance énergétique des serres dans divers contextes climatiques, soit un enjeu crucial dans les climats froids, où la maîtrise des pertes thermiques représente un enjeu majeur pour la viabilité économique et environnementale des installations serricoles.

CHAPITRE 4

MODÈLE DYNAMIQUE : STANDARDISED FRAMEWORK FOR ANALYSIS OF GREENHOUSE PERFORMANCE USING KEY PERFORMANCE INDICATORS

William Sylvain^a, Timothé Lalonde^b, Danielle Monfet^c, Didier Haillot^d

^{a,b,c} Département de Génie de mécanique, École de technologie supérieure,
1100 rue Notre-Dame Ouest, H3C 1K3, Montreal, QC, Canada

^d Département de Génie de la construction, École de technologie supérieure,
1100 rue Notre-Dame Ouest, H3C 1K3, Montreal, QC, Canada

Article soumis pour publication, juin 2025.

4.1 Abstract

There is a growing interest in sustainable and year-round food production through protected agriculture. Greenhouses play a key role in this transition, but their performance varies significantly with climate conditions and operational strategies. As a result, this study proposes a standardised and practical framework for evaluating greenhouse performance, grounded in a systematic analysis of key performance indicators (KPI). A total of 16 indicators were identified from the literature and classified into three main categories—thermal, daylighting, and energy. From these, a refined set of 10 KPI was selected based on their applicability, non-redundancy, and relevance for both passive and active greenhouses. These KPI were applied to a case study involving a naturally ventilated, free-standing Gothic arch greenhouse, modelled using the TRNSYS dynamic simulation software. The model was validated using measured data and used to assess greenhouse performance under three distinct Canadian climates: cold (Montréal), very cold (Baie-Comeau), and subarctic (Kuujjuaq). The analysis revealed that while some KPI were critical for crop survival, others provided insights into growing potential, operational climate control or the environmental and economic viability of the system. Two additional indicators were also proposed to capture thermal and daylighting constraints affecting crop viability. These demonstrated that combining different classes of KPI enabled more meaningful, comparative assessments of greenhouse suitability, offering

practical guidance for optimising crop production and energy use under diverse climates. This work contributes to a standardised and practical framework for evaluating greenhouse performance, paving the way for more informed decision-making in controlled environment agriculture.

4.2 Introduction

There has been a rising interest in year-round local food production solutions in recent years. Greenhouses are an effective way to control indoor environmental conditions and optimise crop growth in cold climates. The most common designs are free-standing single or multi-span with either saw-tooth, round arch, or gothic roof shapes (von Zabelitz, 2011). Greenhouses can also be classified according to the type of environmental control, which can be either passive or active (Tiwari, 2003). Passive greenhouses are protected agricultural spaces where the only energy input is solar radiation, whereas in active greenhouses, indoor environmental conditions, such as temperature, humidity, CO₂ concentration and photosynthetically active radiation (PAR), can be controlled using additional energy sources to enhance crop growth (Mosey & Supple, 2020).

The performance of greenhouses is influenced by climatic conditions (McCartney & Lefsrud, 2018). Therefore, to compare different greenhouse designs located in various locations, appropriate key performance indicators (KPI) are required (Dorr, Goldstein, Horvath, Aubry, & Gabrielle, 2021). Greenhouse performance can be evaluated using a range of indicators, with temperature, solar radiation, and energy consumption being among the most critical factors. Temperature is essential for ensuring uniform crop growth, while solar radiation is the primary driver of photosynthesis and contributes to passive heat gains. Similarly, energy consumption directly impacts the sustainability and cost-effectiveness of greenhouse operations (Rubanga, Hatanaka, & Shimada, 2018). These indicators can be grouped into three main categories: thermal, daylighting and energy. This classification becomes especially relevant in northern climates, where harsh external conditions heavily influence the indoor greenhouse environment and, in turn, crop productivity (Liu et al., 2022).

Thermal indicators are essential for comparing greenhouse performance across different regions, particularly in colder climates, since a greenhouse system must manage indoor temperatures to protect crops from external environmental fluctuations. This is particularly relevant for passive greenhouses, which rely on natural ventilation and thermal mass to regulate their indoor climate. Hence, maintaining stable and sufficient temperatures is crucial for ensuring that crops receive the necessary conditions for growth and survival (Liu et al., 2022). Moreover, indoor temperature affects the physiological processes of crops, including photosynthesis and respiration. Maintaining an optimal temperature range is essential for maximising crop yield, as deviations can result in reduced growth rates and lower-quality produce (Roy, Fatnassi, Boulard, Pouillard, & Grisey, 2017). This balance can vary greatly throughout the year.

Daylighting, i.e., the amount of solar radiation, is also a critical performance indicator in greenhouse management, as it directly influences crop growth, energy efficiency, and sustainability. Natural light is essential for photosynthesis; therefore, optimising greenhouse design to maximise light capture is crucial (Xu, Ren, & Zhang, 2023). Zhang et al. (2020) stated the significance of integrating solar radiation indicators into greenhouse performance assessments. By quantifying solar radiation levels and their spatial distribution, Zhang et al. (2020) provided valuable insights into how a greenhouse can be optimised for specific environmental conditions. This approach enhanced information about crop yields and contributed to evaluating the economic viability of greenhouse operations by reducing energy consumption associated with artificial lighting and improving resource use efficiency (Zhang et al., 2020).

Energy indicators are another crucial dimension, especially for comparing greenhouse designs in regions with varying energy demands for heating or cooling (Kaur, Sonawane, & Rosha, 2023). Commonly used energy indicators for large-scale commercial greenhouses include energy consumption metrics for heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems under identical environmental conditions (Rasheed et al., 2018). Additionally, energy performance is often assessed by relating energy input (in kWh equivalent) to agronomic

output, such as the dry weight (kg) of crops produced (Vadiee & Martin, 2014). While these indicators are suitable for evaluating specialised, large-scale operations focused on monoculture production, they are less applicable to small-scale, passive greenhouses. In small-scale systems, where crop cycles often align with seasonal climatic variations to maximise passive operation, traditional energy indicators may fail to capture the complexity of performance (N. Castilla & Montero, 2008). The need to adjust metrics for small-scale and diversified greenhouse operations underscores the importance of developing context-specific energy indicators for these systems.

This brief review highlights three main categories of KPI: thermal (Costantino et al., 2021; Esmaeli & Roshandel, 2020; Gupta et al., 2019; Shakir & Farhan, 2019), daylighting (De Visser et al., 2012; Joubert et al., 2023; Yang & Wang, 2015; Zhang et al., 2020) and energy (Adesanya et al., 2022; Beaulac et al., 2024; Rasheed et al., 2018; Shen et al., 2018) based KPI. These KPI can be derived from either experimental or modelling results. Among the various tools available for greenhouse modelling, TRNSYS is one of the most widely used dynamic simulation tools in the literature (Klein et al., 2017). Between 2013 and 2023, at least 32 studies have used TRNSYS to develop greenhouse energy models (Beaulac et al., 2023). While these studies have significantly advanced technical understanding of greenhouse systems using energy simulation, they often fail to connect simulation outputs with practical KPI-based decision-making frameworks. This gap limits the usefulness of research findings for growers and policymakers, who require actionable insights to optimise greenhouse performance in real-world conditions. This study addresses this gap by incorporating agronomic KPI as key outputs in greenhouse models, establishing a standardised framework for performance comparison. A comprehensive and consistent methodology will enable comparative analyses across different greenhouse systems, supporting the adoption of efficient and sustainable practices tailored to various environmental conditions and climates.

The objectives of this study are twofold: first, to identify and propose key performance indicators for evaluating the thermal, daylighting, and energy performance of greenhouses; and

second, to demonstrate their relevance through a case study assessing a naturally ventilated, free-standing arch greenhouse across multiple climates using a greenhouse model.

The remainder of this paper is structured as follows: Section 0 details the methodology for selecting and analysing the KPI, while Section 4.4 applies them to evaluate greenhouse performance across different climates and explores a more standardised and pertinent approach for their use. It examines their relevance, strengths and limitations in the context of greenhouse performance across varying environmental conditions. Finally, a conclusion (Section 4.5) synthesises the findings and provides insights into the practical application of KPI for optimising greenhouse systems.

4.3 Methods

This paper proposes an innovative approach that combines KPI-based evaluations with a greenhouse model to establish standardised indicators for comparing greenhouse performance. The proposed methodology includes four main steps, as illustrated in Figure 4.1. It involves selecting relevant KPI, selecting and validating a greenhouse model, analysing results across climates, and refining indicators to enhance their accuracy and pertinence.

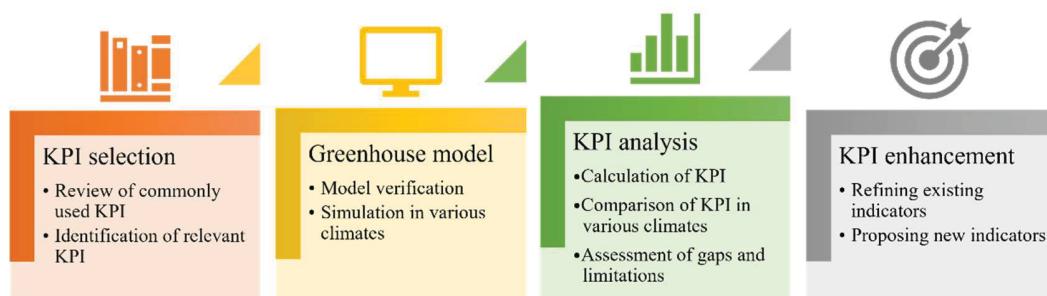


Figure 4.1 Research methodology

In this study, greenhouse models are used to generate the selected KPI (see section 4.3.1) across various cold climates, assessing their performance. These models, based on a small-scale greenhouse and simulated using TRNSYS (Klein et al., 2017) (see section 4.3.2), are used for three cities in the province of Quebec, Canada, representing cold, very cold and subarctic climates (Tableau 4.1). These cities were selected to illustrate the use of the selected

KPI and to compare the greenhouse performance across different climates. This region of the world has seen significant growth in Nordic greenhouse activities, driven by recent policies aimed at doubling the cultivated surface area (Gouvernement du Québec, 2020). The first location represents an example of community urban agriculture (Gailloux et al., 2023), while the other two locations were selected for their distinct climates and the presence of greenhouse projects (Centre D'innovation Sociale En Agriculture [CISA], 2024; Lalonde, Monfet, & Haillot, 2022).

Each of these climates is modelled using typical year weather files sourced from the Canadian Weather Year for Energy Calculation (CWEC) database. These files are created by combining twelve typical meteorological months selected from a database containing up to 30 years of hourly data (Gouvernement du Canada, 2024). Although this study focuses on specific regions, the results apply to all areas with similar climates. The proposed indicators can be adapted for use in warmer regions and applied to various types of greenhouses.

Tableau 4.1 Compared climatic regions

Climate type	ASHRAE climate zone	Köppen-Geiger climate classification		City	HDD _{18°C} ¹	Location
Cold $4000 < \text{HDD}_{18^\circ\text{C}} \leq 5000$	6A	Dfa ²	Montréal	4257	45.5°N;73.6°W	
Very Cold $5000 < \text{HDD}_{18^\circ\text{C}} \leq 7000$	7	Dfb ³	Baie-Comeau	5588	49.1°N;68.3°W	
Subarctic $7000 < \text{HDD}_{18^\circ\text{C}}$	8	Dfc ⁴	Kuujjuaq	8186	58.1°N;68.5°W	

¹HDD: Heating degree days (ASHRAE, 2021a)
²Dfa: continental, no dry season, hot summer
³Dfb: continental, no dry season, warm summer
⁴Dfc: continental, no dry season, cold summer

Once the KPI are generated for the various climates, they are analysed based on their applicability and relevance (see Section 4.3.3). This analysis informs the development of enhanced and standardised KPI to improve their consistency and usability (see Section 4.3.4).

4.3.1 Key performance indicators selection

The first step in this study involves a comprehensive literature review to identify all potentially relevant indicators for evaluating greenhouse performance, drawing from both agronomy and building engineering fields. From this extensive set of indicators, a refined selection is made to enable a focused and efficient analysis. This selection process follows a systematic approach to eliminate redundancy by retaining the most representative or informative indicators when multiple indicators assess the same aspect of performance. This ensures a streamlined evaluation, reducing overlap while maintaining analytical depth and accuracy.

The chosen indicators are specifically designed to assess the key performance areas of thermal, daylighting, and energy performance. These focus areas are prioritised due to their significant influence on both crop growth outcomes and operational costs, enabling a more comprehensive evaluation of greenhouse performance.

4.3.2 Greenhouse model

The studied greenhouse is a 247 m² existing commercially available greenhouse with a typical Gothic arch roof design oriented 40° to the northeast, as illustrated in Figure 4.2. The envelope consists of double-layer polyethylene films, with the end walls being made of 6 mm clear polycarbonate panels. The greenhouse structure is made of 5 cm steel braces, resulting in a disposition such that the glazed surface of the envelope is about 93% of the total surface. The greenhouse is cooled by natural and forced ventilation using side vents, and two 2030 L·s⁻¹ positive pressure fans controlled independently. The side vents are located 1 m above the ground and are 22 m long by 1 m high. They open gradually when the indoor temperature rises above 20°C. The first fan starts when the indoor temperature is above 22°C, and the second one if the indoor temperature is above 24°C. The side vents are shut closed for temperatures below the freezing point. Additionally, four air circulation fans are used to continuously mix the air in the greenhouse, each having a flow rate of 700 L·s⁻¹ and dissipating 30 W of heat. If heating is provided, it is estimated as the rate of energy required by the space to maintain the indoor environment at desired conditions.

A lettuce model is used to estimate the heat gain/loss from crops (Talbot & Monfet, 2020), simulating their impact on indoor environmental conditions, particularly indoor relative humidity and vapour pressure deficit (VPD), and consequently, the heating loads and overall greenhouse performance. The lettuce variety, “Othilie”, is cultivated in a 30 cm layer of soil atop a 30 cm layer of compacted gravel. The crop density is set to 20 heads.m⁻², corresponding to an estimated cultivated density of 60%. The Leaf Area Index (LAI) is set to a fixed (constant) value of 2.1 m².m⁻² throughout the growing season (Graamans et al., 2018).

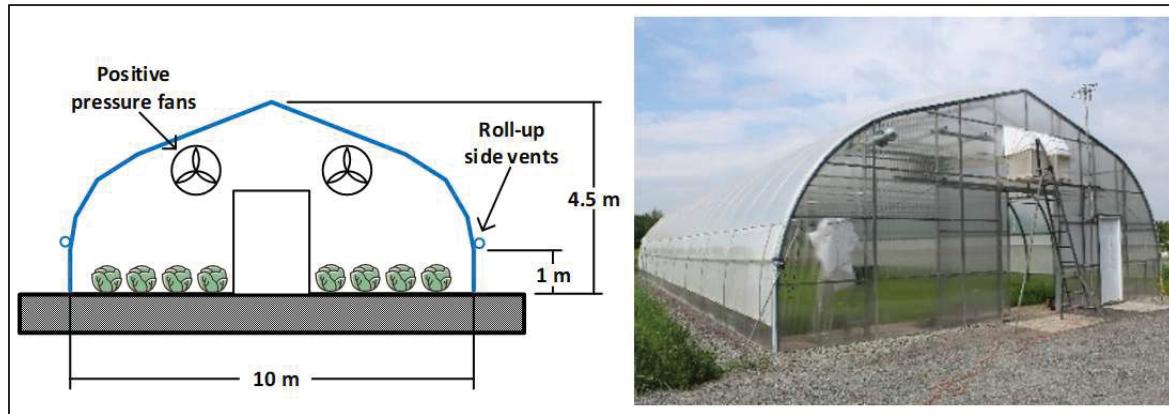


Figure 4.2 Existing Gothic arch greenhouse under study

The greenhouse model was initially developed by Lalonde (Lalonde, 2022) and calibrated and validated by Beaulac et al. (Beaulac et al., 2024). Sub-hourly measured data collected from an existing greenhouse located in Victoriaville, QC, were used to complete both the calibration and validation of the model. Calibration was performed using a 56-day set under free-floating and ventilated operating conditions, resulting in a combined root mean square error (RMSE) of 1.6°C for indoor air temperature and 8.3% for relative humidity. Validation was then completed using two additional datasets to test the predictive capabilities of the calibrated model. In both cases, the simulated results closely matched the indoor environment measurements, with an RMSE below 2°C for air temperature and below 10% for relative humidity, which aligns favourably with values reported in the literature (Beaulac et al., 2024).

Before assessing the indicators across various climates, a comparison is conducted between the selected indicators derived from measured data and those obtained from simulation results (section 4.4.2). Six statistical criteria are used for the comparison: Root Mean Square Error (RMSE), the Normalised RMSE (NRMSE), the Mean Absolute Error (MAE), the Normalised Mean Bias Error (NMBE), the Coefficient of Variance of the RMSE (CVRMSE) and the R^2 , are used for comparison. This preliminary step is crucial to verify the accuracy and reliability of the developed model, ensuring its suitability for this type of analysis. By confirming the model's validity, a solid foundation is established for comparing KPI and assessing greenhouse performance across diverse climatic conditions.

4.3.3 KPI analysis

The greenhouse model is simulated for each of the climate zones specified in Tableau 4.1. The results are then compared to assess the relevance and effectiveness of the selected indicators. This comparison aims to determine the extent to which each indicator could provide meaningful insights into greenhouse performance, specifically by highlighting differences in thermal, daylight, and energy performances across various climates. The analysis also focuses on identifying gaps and limitations in the information provided by the selected indicators.

The results from each climate zone are then compared to assess the relevance and effectiveness of the selected indicators. This comparison aims to determine the extent to which each indicator could provide meaningful insights into greenhouse performance, specifically by highlighting differences in thermal, daylight, and energy performances across various climates. The analysis also focuses on identifying gaps and limitations in the information provided by the selected indicators.

4.3.4 Enhancement of KPI

The last step of this study involves conducting a comprehensive review of all generated indicators. This includes assessing the relevance of each indicator for various applications and

identifying potential gaps or limitations. Based on these insights, improvements are proposed through refinement or the introduction of new indicators to enhance greenhouse performance assessment across different climates. This includes proposing new calculations and supplementary indicators to address these gaps, contributing to the establishment of standardised and actionable KPI.

4.4 Results and discussion

The primary objective of this study is to identify the most important and relevant KPI from the literature to assess greenhouse performance (Section 4.4.1). Once the pertinent KPI are selected, the accuracy of the chosen greenhouse model is verified by comparing its results to data from an experimental greenhouse located in Victoriaville, Québec (section 4.4.2). This comparison is used to verify the model's predictions against real-world measurements, ensuring its accuracy in representing greenhouse conditions before assessing the indicators across different climates. This is essential to ensure that the selected indicators derived from measured data align with those generated by the simulation results. Then, the model is used to simulate greenhouse indoor conditions in three different cold climates represented by the cities of Montréal, Baie-Comeau, and Kuujjuaq (as described in Tableau 4.1), for different setpoints. The simulation results are then used to calculate and compare the KPI, evaluating their overall application in describing the greenhouse performance in these locations (section 4.4.3). Finally, the KPI are further reviewed to assess their significance and relevance for greenhouse production and propose improvements (section 4.4.4 and 4.4.5).

4.4.1 Selection of Key performance indicators

The selection of key performance indicators (KPI) in this study focuses on thermal, daylighting, and energy, which are crucial for the viability and profitability of greenhouses. This section provides an overview of the most commonly used indicators from the literature, highlighting those that offer valuable insights into greenhouse performance (Section 4.4.1.1). The subsequent Section 4.4.1.2 narrows down these indicators, selecting the most relevant based on their applicability and significance, as outlined in the methodology. This targeted

approach ensures a focused analysis of factors that directly influence crop productivity and operational efficiency, aligning with the objectives of this study.

4.4.1.1 Review of commonly used KPI

A total of 16 indicators have been identified from the literature and divided into three main categories: thermal, daylighting (including photothermal), and energy. The first category focuses solely on indoor temperature and humidity indicators and their impact on maintaining appropriate air conditions for crop growth. The second category pertains to the amount of solar radiation received by the crop, including a photothermal indicator. Lastly, the third category addresses energy consumption associated with maintaining specific indoor conditions.

As such, the first three indicators are related to the maintained indoor air temperature within the greenhouse. The temperature limits for these indicators vary according to the optimal temperature range and biological limits, which are distinct for different crops (Larcher, 2003). As such, average indoor temperature is usually defined over different periods: nyctheleron ($\bar{T}_{a_i,ND}$), daytime ($\bar{T}_{a_i,D}$), or nighttime ($\bar{T}_{a_i,N}$).

Peak temperatures ($T_{a_i,max}$, $T_{a_i,min}$) are used to assess the thermal performance of greenhouses since frequent sub-optimal air temperatures result in slow physiological processes and growth of crops, even for cold-adapted crops such as lettuce (Bierhuizen, Ebbens, & Koomen, 1973; Hatfield & Prueger, 2015). As such, freezing temperatures are widely reported to cause important damage to crop tissues and roots (Snyder & Melo-Abreu, 2005). High temperatures can also induce physiological harm to lettuce, including stem elongation, premature head opening, heightened bitterness, and an increased incidence of physiological disorders such as tip burn, particularly when the daily average temperature exceeds 21°C (Manrique, 1993).

The temperature swing ($T_{a_i-swing}$) is another essential indicator to evaluate the thermal response of a space subjected to solar gains (Myster & Moe, 1995). The daily temperature swing affects

the growth of crops: when there is a temperature difference of 5 to 7°C between photosynthesis and dark periods, crops tend to grow more effectively (Castilla 2013; FAO 1988).

Three additional indicators commonly used in building performance analysis can be considered based on the indoor air temperature: the thermal comfort index, the overheating/overcooling indexes and the unmet temperature hours (UH_T). The thermal comfort index (TCI) indicates the number of hours within a specific temperature range. It is a significant indicator for characterising the environment around crops and assessing the likelihood of thermal stress. This range depends on the cultivated crop and the activity of the crop (photosynthesis or respiration). In passive greenhouses, the thermal comfort index can identify which crops would grow best at different times of the year, helping growers schedule crop cycling (Al-Rikabi et al., 2023). The overheating (OH) and overcooling (OC) indexes indicate the number of hours when the indoor air temperature is above and below the crop temperature limits, i.e., the occurrence of extreme low- and high-temperature events. Overheating leads to heat stress, which affects growth and reproductive processes and often results in severe yield loss (Sato, Peet, & Thomas, 2000). The overheating index is particularly important, as natural ventilation is often insufficient to cool greenhouses properly during the summer (ASHRAE, 2015). In active greenhouses, these indicate whether the HVAC systems used to control the environmental conditions are sized adequately. Related to these indicators, when active systems are used, the UH_T can then be compiled (Kesik & Stern, 2007). These represent the number of hours when the indoor temperature setpoint is not met, i.e., when the installed active systems are unable to deliver enough heating or cooling.

The thermal growing season length ($TGSL$) is a key thermal indicator frequently used in agricultural and climate science. It is primarily used to compare outdoor growing seasons across different locations or years, and is a valuable tool in assessing environmental shifts and the potential for thermal stress (Linderholm, 2006; Peltonen-Sainio, Jauhainen, Hakala, & Ojanen, 2009; Robeson, 2002). The $TGSL$ represents the theoretical number of days crop growth is possible, limited solely by the outdoor air temperature (Wang, 1963). This indicator could be useful for comparing passive greenhouses, i.e., greenhouses with no heating system.

Different approaches have been proposed to determine the *TGSL*. Some researchers used the interval in days between the last spring frost and the first fall frost. Others suggest that for cold climates, the most reasonable approach is to use an average daily outdoor temperature above or below 5°C over 5 days at the beginning and 10 days at the end of the thermal growing season (Walther & Linderholm, 2006). The mean temperature setpoint of 5°C is consistent with observations made on photosynthesis and temperature requirements for crop growth (Ward et al., 2015). It is also worth noting that prolonged periods of temperatures below 10°C can negatively impact crop yield (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1988).

The growing degree days (*GDD*), also linked to the indoor temperature, are based on the notion that each crop responds differently to temperature fluctuations. Every crop has its own base temperature, below which its development slows down or ceases altogether. The *GDD* is defined as the amount of heat accumulated by a crop over a day. *GDD* can be calculated over various periods, ranging from a week to a month, or even until the crop reaches full maturity (Edey, 1977). The *GDD* is widely used in agronomy to evaluate the crop growth stages (Quang et al., 2024).

Crop growth is also influenced by evapotranspiration, which depends on the water vapour pressure deficit (*VPD*), between the leaves and the air (Hand, 1988). The *VPD* is the difference between the theoretical pressure exerted by water vapour held in saturated air (100% relative humidity at a given temperature) and the pressure exerted by the water vapour that is held in the air being measured at the same given temperature, i.e., the difference between the vapour pressure inside the leaf to the vapour pressure of the air. High *VPD* causes excess transpiration of the crop, which crops react to by closing stomata, limiting CO₂ fixation, while low *VPD* limits transpiration, restricting water uptake (Hand, 1988).

Indicators for daylighting performance analysis can also be computed, as in addition to optimal thermal conditions, crops require sufficient photoactive radiation (*PAR*) to enable photosynthesis. *PAR* includes the wavelengths between 400 and 700 nm of the solar spectrum

(Akitsu et al., 2022). It is often assessed using the photoactive photon flux density (*PPFD*), which measures the number of photons inside the *PAR* spectrum hitting a square meter per second. This indicator is useful for evaluating lighting requirements. However, to assess the *PAR* required by crops, the use of the daily light integral (*DLI*) is more common. The *DLI* is the daily integral of the *PPFD* received by the crop canopy. *DLI* required for optimal growth varies according to the type of crop being cultivated (Craver & Lopez, 2016). Most greenhouse crops can be classified into two categories depending on their *DLI* requirements. Leafy greens such as herbs, lettuce, kale and spinach require *DLI* between 8 to 14 mol m⁻² day⁻¹, while fruiting vegetables such as tomatoes, peppers, and cucumber requires a minimum of 10 mol·m⁻² day⁻¹ and have optimum growth between 20 and 30 mol·m⁻²·day⁻¹ (Baumbauer, 2019; Moe et al., 2005; Torres & Lopez, 2011). The *PPFD* considered in the measurement of the crop *DLI* should remain below the light-saturation limit of photosynthesis of the specific cultivated crop (Chidiac, 2016; Zhou, Wang, Hang, & Li, 2020). Several studies highlighted the significant impact of *DLI* on crop growth and morphology, assessed notably through biomass accumulation (Baumbauer, 2019; Cui et al., 2021; Zhang et al., 2018), nutritional values (Yan et al., 2019), and daily irrigation rates (Van Iersel et al., 2010).

Another indicator, the Daylight Autonomy Factor (*DAF*), is commonly used in building daylighting simulations to evaluate the role of daylight illuminance in meeting minimal luminosity requirements (Kesik & Stern, 2007). For greenhouses, it can be valuable to compare daylight PAR to the optimal *DLI* for growth of a particular crop in greenhouses. If computed monthly or daily, the *DAF_d* can be calculated according to equation (4.1).

$$DAF_d[-] = \frac{DLI_{received}[\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}]}{DLI_{optimal}[\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}]} \quad (4.1)$$

Where, *DLI_{received}* is the *DLI* received from the sun and the *DLI_{optimal}* is the optimal *DLI* for a considered crop. In other words, it quantifies the extent to which natural light is sufficient for the crop to grow and whether supplementary lighting sources, such as artificial lighting, are

necessary. A high DAF indicates that natural light meets the crop's needs, while a lower DAF suggests a greater need for supplementary artificial lighting, especially in environments with limited natural light.

The photothermal ratio (*PTR*) is an indicator defined as the ratio between radiant and thermal energy (B. Liu, 1999). The calculation of *PTR* is defined using the integral of mean daily light integral (\overline{DLI}) and mean daily growing degree days (\overline{GDD}) over the selected period (Niu et al., 2001).

$$PTR [mol \cdot m^{-2} \cdot degree - days^{-1}] = \frac{\overline{DLI} [mol \cdot m^{-2}]}{\overline{GDD} [degree - days]} \quad (4.2)$$

Assessing the effects of two main variables (light and temperature) on crop growth is valuable. *PTR* holds greater physiological significance than temperature or radiation, accounted for individually when temperature and radiation have low variation over time (Islam & Morison, 1992). The *PTR* can be integrated over any period and has been used to estimate dry matter production for different crops (Xu et al., 2010).

Three additional energy indicators can be defined for greenhouses with active systems. Energy consumption is the most obvious indicator, often reported as the energy use intensity (*EUI*) or energy consumption per surface area (Vadiee & Martin, 2014). This indicator focuses on the energy needed to maintain optimal indoor conditions for crop growth, including temperature (heating or cooling), humidity, light, and CO₂ concentration. It is expressed over a period of time, typically on a monthly or annual basis (Iddio et al., 2020).

Another interesting energy indicator is the peak demand (*P*), which is the maximum power required to maintain indoor conditions. It is especially relevant for comparing energy efficiency strategies, such as thermal storage (Engler & Krarti, 2021; Harbick & Albright, 2016; Iddio et al., 2020).

A final key energy indicator is the specific energy use (SEU), which represents the relationship between the amount of energy consumed by the greenhouse to maintain an adequate indoor environment and the yield (i.e., the kWh per kg produced) (Weidner et al., 2021). This indicator is crucial for evaluating the economic and environmental viability of greenhouse production systems and comparing multiple types of controlled environment agriculture (CEA) (Graamans et al., 2018; Talbot, Lalonde, Beaulac, Haillot, & Monfet, 2022)

The performance indicators identified in the literature are listed in Tableau 4.2. They are grouped into three main categories—thermal, daylighting, and energy—and include the corresponding symbol, definition, unit, and reference. This classification provides a structured basis for the indicator selection process presented in the next section.

Tableau 4.2 Performance indicators in the literature

Category	Indicators	Symbol	Definition	Unit	References
Thermal	Mean temperature (nychthemeron, daytime, nighttime)	$\bar{T}_{a_i,ND}$, $\bar{T}_{a_i,D}$, $\bar{T}_{a_i,N}$	Average indoor air temperature over nychthemeron, daytime or nighttime	[°C]	Larcher (2003)
	Peak temperature	$T_{a_i,max}$, $T_{a_i,min}$	Maximum or minimum hourly indoor air temperature	[°C]	Bierhuizen et al. (1973), Snyder et Melo-Abreu (2005), Hatfield et Prueger (2015)
	Daily temperature swing (nychthemeron, daytime, nighttime)	$T_{a_i-swi_ND}$, $T_{a_i-swi_D}$, $T_{a_i-swi_N}$	Temperature difference between maximum and minimum indoor air temperature over nychthemeron, daytime or nighttime	[°C]	Manrique (1993), Myster et Moe (1995), Nicolás Castilla (2013)
	Thermal comfort index	TCI	Hours during which the temperature is within an acceptable range	[h]	Al-Rikabi et al. (2023)
	Overheating and overcooling index	OH, OC	Hours during which the indoor air temperature is within an acceptable range	[h]	Sato et al. (2000), ASHRAE (2015)
	Unmet temperature hours	UH_T	Number of hours when the indoor temperature set point is not met	[h]	Kesik et Stern (2007)
	Thermal growing season length	$TGSL$	Period between the last spring frost and the first fall frost when crop growth is theoretically possible	[d]	Wang (1963), Robeson (2002), Linderholm (2006), Walther et Linderholm (2006), Peltonen-Sainio et al. (2009), Ward et al. (2015)
	Growing degree days	GDD	Number of degree-days within the optimum growth temperature range	[degr ee-days]	Edey (1977), Quang et al. (2024)
	Vapour pressure deficit	VPD	Vapour pressure deficit between saturated air at the leaves and the indoor air	[kPa]	Hand (1988)

Tableau 4.2 Performance indicators in the literature (continued)

Category	Indicators	Symbol	Definition	Unit	References
Daylighting	Photosynthetic Photon Flux Density	<i>PPFD</i>	Instantaneous PAR available for crop growth	[$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$]	Akitsu et al. (2022)
	Daily Light Integral	<i>DLI</i>	Daily PAR available for crop growth	[$\text{mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$]	Moe et al. (2005), Torres et Lopez (2011), Craver et Lopez (2016), Baumbauer (2019), Zhou et al. (2020), Akitsu et al. (2022)
	Daylight autonomy factor	<i>DAF</i>	Percentage or fraction of daylighting target met by solar radiation	[% or -]	Kesik et Stern (2007)
Photo-thermal	Photothermal ratio	<i>PTR</i>	Combination of the impact of temperature and available PAR on crop photosynthesis	[$\text{mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{degree-days}^{-1}$]	Islam et Morison (1992), Liu (1999), Niu et al. (2001), Xu et al. (2010)
Energy	Energy use intensity	<i>EUI</i>	Energy consumption per surface area	[$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$]	Vadiee et Martin (2014), Iddio et al. (2020)
	Peak demand	<i>P</i>	Peak energy demand to maintain the temperature setpoint	[kW]	Iddio et al. (2020)
	Specific energy use	<i>SEU</i>	Energy consumption (kWh) of the space over the weight (kg) of the crop produced	[$\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$]	Graamans et al. (2018), Weidner et al. (2021) Talbot et al. (2022),

4.4.1.2 Identification of the relevant indicators

Among the 16 performance indicators previously identified, six thermal, two daylighting and two energy indicators are selected for further analysis, as shown in Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Summary of selected KPI

Category	Indicator	Operating scenario	Specifications
Thermal	$\bar{T}_{a_i,ND}, T_{a_i,max}, T_{a_i,min},$	Unheated	
	$T_{a_i-swing,ND}$	Unheated, minimally heated, heated	Optimal $T_{a_i-swing,ND}$ fixed between 5 °C and 7 °C (Nicolás Castilla, 2013). i.Acceptable range between 5°C and 30°C (Frantz et al., 2004)
	TCI	Unheated	ii.Optimal range between 15°C and 25°C (Gent, 2017; Grahn et al., 2015; Wang et al., 2023)
	<i>TGSL</i>	Unheated	The season starts when $\bar{T}_{a_i,ND}$ is higher than 5°C for at least five consecutive days. The season ends when the $\bar{T}_{a_i,ND}$ is below 5°C for five consecutive days.
	GDD	Unheated	Base temperature fixed at 5°C: minimum growth for lettuce (Frantz et al., 2004)
	VPD	Unheated, minimally heated, heated	Acceptable VPD fixed between 0.2 kPa and 1.2 kPa (Çaylı & Baytorun, 2021)
Daylighting	<i>DLI</i>	Unheated	
	DAF	Unheated	Used to calculate the suitable growing season with the minimum <i>DLI</i> for lettuce growth fixed to 8 mol·d ⁻¹ ·m ⁻² (Glenn, Cardran, & Thompson, 1984).
Energy	<i>EUI</i>	Minimally heated, heated	Calculated over the total area of the greenhouse
	<i>P</i>	Minimally heated, heated	

These selected indicators have been chosen to provide a comprehensive and practical evaluation of greenhouse performance under different operating scenarios: unheated, minimally heated (5°C) and heated (15°C). Thermal indicators not included in the selection were omitted because they are inherently included within the selected ones. For instance, the overheating (*OH*) and overcooling (*OC*) indices, along with the unmet temperature hours (UH_T), are encompassed by the thermal comfort index (*TCI*), making them redundant. A similar selection approach was applied across all categories. Regarding daylighting indicators, *PPFD* was excluded since *DLI* more effectively represents its impact and is more relevant to the study. *PTR* was also omitted because its primary influence is on crop growth, and given that the crop model assumes a static LAI, its effect could not be adequately represented. Similarly, *SEU* was not considered, as it could not be accurately calculated under the static crop model.

The selected indicators strike a balance between ease of measurement and the comprehensiveness of the information they provide, ensuring a practical yet thorough evaluation. Focusing on a smaller set of high-impact indicators, the analysis remains precise and manageable while capturing the essential aspects of greenhouse performance. This approach ensures that the chosen indicators are not only scientifically robust but also aligned with the study's objectives and applicable across various climates and operating scenarios.

4.4.2 Verification of the greenhouse model

The greenhouse model is verified using measured data and simulation results as a preliminary step. The data used are for the experimental greenhouse of the CETAB+ in Victoriaville, Québec. The measured dataset includes outdoor and indoor environmental data collected using a weather station installed nearby, about 100 m away, and using a Hobonet Remote Monitoring Station. Weather data included dry-bulb air temperature and relative humidity, global horizontal radiation, wind direction and speed, atmospheric pressure and snow depth. In contrast, indoor conditions included dry-bulb air temperature and relative humidity, PAR (PPFD), ground temperature, vents and fans actuators status. Additional details about the

measured data can be found in (Haillot, Coudret, Baulac, Laliberté, & Monfet, 2023). The measurement period extended from July 2022 to June 2023.

Figure 4.3 presents the verification of the greenhouse model using the hourly temperature and *DLI* over two weeks of March 2023. These indicators were chosen due to their critical role in assessing greenhouse climate conditions and crop growth. In the model, the LAI is set to a fixed (constant) value of 2.1; however, this is not the case in the actual greenhouse, which might explain some of the noted discrepancies.

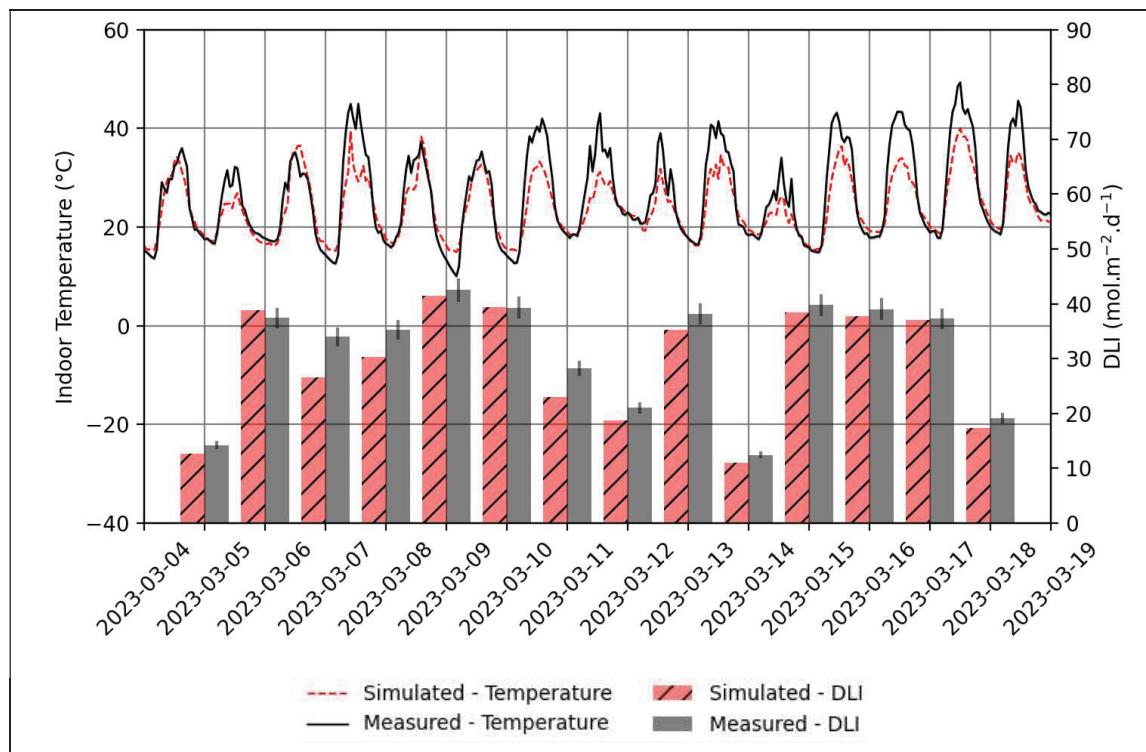


Figure 4.3 Measured versus simulated indicators for the greenhouse located in Victoriaville for March 2023 for (a) indoor temperature and (b) DLI

Various statistical criteria, as shown in Tableau 4.4, were used to complete the comparison. For the temperature, an RMSE of 1.9°C indicates a relatively low residual deviation, indicating that the model demonstrates accurate model performance. The NRMSE of 4.2% confirms minor errors relative to the measured values, while an MAE of 1.5°C highlights consistent predictions with minimal outliers. The NMSE of -0.4% suggests negligible systematic bias, and a CVRMSE of 14.7% remains within acceptable limits, despite some variability. The R^2

value of 0.96 indicates that the model explains 96% of the variance in temperature, reinforcing its accuracy. Additional verification for peak (maximum and minimum) and swing air temperatures show RMSE of 4.6°C ($R^2=0.83$) for $T_{a_i,max}$, 2.4°C ($R^2=0.93$) for $T_{a_i,min}$, and 5.3°C ($R^2=0.47$) for $T_{a_i-swing,ND}$, suggesting more significant variability and less predictive accuracy in the latter.

For DLI , the RMSE (2.8 mol.d⁻¹.m⁻²) and NRMSE (8.2%) are higher than for temperature, but still within reasonable and acceptable range. The MAE (2.2 mol.d⁻¹.m⁻²) suggests a moderate average deviation, indicating consistent performance. However, the NMBE (11.3%) shows a tendency for the model to overestimate DLI . The CVRMSE (17.4%) suggests a higher level of variability in the errors compared to temperature, but still within a range that could be considered acceptable for DLI predictions. Finally, the R^2 value of 0.92 indicates that the model explained 92% of the variance in DLI , although slightly lower than for temperature, it still represents a strong fit.

Tableau 4.4 Measured versus simulated indicators for the greenhouse located in Victoriaville

	Temperature	$T_{a_i,max}$	$T_{a_i,min}$	$T_{a_i-swing,ND}$	DLI
RMSE	1.9°C	4.6°C	2.4°C	5.3°C	2.8 mol.d ⁻¹ .m ⁻²
NRMSE	4.2%	9.3%	5.3%	11.5%	8.2%
MAE	1.5 °C	3.3 °C	1.8 °C	3.8 °C	2.2 mol.d ⁻¹ .m ⁻²
NMBE	-0.4%	-4.1%	12.9%	-9.7%	11.3%
CVRMSE	14.7%	20.3%	42.8%	31.1%	17.4%
R^2	0.96	0.83	0.93	0.47	0.92

4.4.3 Calculation and comparison of KPI

The greenhouse simulation results are used to calculate the selected KPI for each climate listed in Tableau 4.1. The results for the thermal indicators are presented in section 4.4.3.1, followed by the daylighting KPI in section 4.4.3.2 and the energy-based KPI in section 4.4.3.3.

Comparing these KPI across different climates (cold, very cold and subarctic), represented by three different locations, aims to provide a comprehensive assessment of their application and limitations.

4.4.3.1 Thermal indicators

The first indicator presented is the indoor air temperature distribution throughout each month of a typical year for the unheated greenhouse. Tableau 4.5, Tableau 4.6 and Tableau 4.7 display the frequency of hours for each month within specific temperature ranges for the cold, very cold and subarctic climates, respectively, represented by the locations of Montréal, Baie-Comeau, and Kuujjuaq. The optimal temperature range for lettuce growth (15°C to 25°C) (Gent, 2017; Grahn et al., 2015; Wang et al., 2023) is highlighted by two dotted lines, while the acceptable range (5°C to 30°C) (Frantz et al., 2004) is shown using double lines. Additionally, the overall frequency of hours within the acceptable and optimal ranges is summarised at the bottom of each table, providing an annual overview of growing conditions. The tables also display the monthly average temperature, highlighted by the darkest cell, while the minimum and maximum temperatures are shown as the extreme intervals for each month.

Tableau 4.5 Simulated indoor air temperature distributions in the greenhouse for a cold climate (Montréal)

Temperature interval [°C]	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
	[%]											
>35	-	-	-	-	-	0.4	2.7	1.2	-	-	-	-
30 to 35	-	-	-	0.4	0.7	6.0	13.8	10.1	0.8	-	-	-
25 to 30	-	-	0.1	1.5	5.4	19.9	26.5	20.2	9.9	0.5	-	-
20 to 25	-	-	0.8	5.7	16.4	33.5	34.7	38.6	23.1	2.7	-	-
15 to 20	2.0	8.0	21.1	31.9	49.3	39.4	21.6	28.5	51.5	28.0	5.8	1.2
10 to 15	6.9	10.2	17.5	26.4	23.7	0.8	0.7	1.5	13.9	37.0	18.8	3.3
5 to 10	9.9	13.5	23.3	20.3	4.6	-	-	-	0.8	23.8	36.3	11.0
0 to 5	17.6	16.4	19.1	11.3	-	-	-	-	-	7.7	21.3	28.8
-5 to 0	19.9	27.9	11.7	2.5	-	-	-	-	-	0.4	14.7	27.9
-10 to -5	22.2	19.5	6.0	-	-	-	-	-	-	-	3.2	26.2
-15 to -10	16.8	4.2	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5
-20 to -15	3.8	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-25 to -20	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-30 to -25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Optimal range 15 to 25 (--)	2.0	8.0	21.9	37.6	65.7	72.9	56.3	67.1	74.6	30.7	5.8	1.2
Acceptable range 5 to 30 (=)	18.8	31.8	62.8	85.8	99.3	93.6	83.5	88.7	99.2	91.9	60.8	15.5

Tableau 4.6 Simulated indoor air temperature distributions in the greenhouse for a very cold climate (Baie-Comeau)

Temperature interval [°C]	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
	[%]											
>35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30 to 35	-	-	-	-	-	1.1	1.1	-	-	-	-	-
25 to 30	-	-	-	-	0.1	6.5	10.8	4.4	0.1	-	-	-
20 to 25	-	0.1	-	1.8	3.4	17.4	25.7	22.4	6.3	0.9	-	-
15 to 20	-	2.7	11.3	26.4	46.4	50.7	55.1	61.3	44.4	10.5	1.8	0.1
10 to 15	1.5	8.6	18.8	22.9	31.5	21.3	7.4	11.8	34.7	28.0	6.4	2.1
5 to 10	4.8	8.9	10.5	24.9	18.1	3.1	-	-	14.0	42.6	14.4	8.0
0 to 5	7.1	9.6	22.6	23.3	0.5	-	-	-	0.4	18.0	45.4	10.8
-5 to 0	17.5	24.7	21.5	0.7	-	-	-	-	-	-	25.8	31.6
-10 to -5	23.9	22.4	10.3	-	-	-	-	-	-	-	6.1	30.9
-15 to -10	20.7	14.5	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-	14.4
-20 to -15	15.9	7.9	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.8
-25 to -20	8.6	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
-30 to -25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Optimal range 15 to 25 (--)	-	2.8	11.3	28.2	49.8	68.1	80.8	83.7	50.7	11.4	1.8	0.1
Acceptable range 5 to 30 (=)	6.3	20.4	40.6	76.0	99.5	98.9	98.9	100.0	99.6	82.0	22.6	10.3

Tableau 4.7 Simulated indoor air temperature distributions in the greenhouse for a subarctic climate (Kuujjuaq)

Temperature interval [°C]	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
	[%]											
>35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30 to 35	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	-	-
25 to 30	-	-	-	-	1.1	3.1	2.8	1.3	-	-	-	-
20 to 25	-	-	-	-	2.7	6.7	13.2	9.3	-	-	-	-
15 to 20	-	-	1.6	10.6	28.9	39.4	55.4	47.3	23.8	2.2	-	-
10 to 15	-	0.6	11.7	23.6	27.6	30.1	23.9	31.9	34.2	14.1	0.7	-
5 to 10	-	1.1	6.6	11.1	22.2	18.2	4.0	10.2	28.1	26.9	3.9	-
0 to 5	-	1.6	6.5	14.7	15.5	2.5	-	-	14.0	45.8	15.8	0.4
-5 to 0	-	8.0	16.4	24.6	2.2	-	-	-	-	11.0	49.3	13.2
-10 to -5	3.4	17.8	18.8	10.3	-	-	-	-	-	-	20.8	12.6
-15 to -10	17.2	22.3	19.1	4.9	-	-	-	-	-	-	8.6	29.4
-20 to -15	29.0	24.7	12.0	0.3	-	-	-	-	-	-	0.8	18.6
-25 to -20	29.7	16.8	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	17.9
-30 to -25	17.3	6.9	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	7.9
<-30	3.4	0.1	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Optimal range 15 to 25 (--)	-	-	1.6	10.6	31.6	46.1	68.6	56.6	23.8	2.2	-	-
Acceptable range 5 to 30 (=)	-	1.7	19.9	45.3	82.4	97.5	99.3	100.0	86.0	43.1	4.6	-

The temperature distributions shown in Tableau 4.5 to Tableau 4.7 highlight notable regional differences in greenhouse suitability for lettuce cultivation. For the cold climate, the greenhouse maintains temperatures within the acceptable range for up to 99.2% of the hours in September, with optimal conditions reaching a peak of 74.6% during the same month. For the very cold region, despite colder conditions, it still achieves 83.7% of hours in the optimal range in August, indicating strong potential for seasonal production between May and September. As expected, the subarctic region faces substantial thermal challenges, with temperatures frequently dropping below the acceptable threshold, significantly limiting production viability.

The following generated KPI is the $T_{a_i\text{-}swing,ND}$, representing the difference between the maximum and minimum daily temperatures. Figure 4.4 illustrates this KPI monthly across different climates, presented as a box plot. Each box represents the interquartile range (25th to 75th percentile), with the central bar indicating the monthly average. The whiskers show the

maximum and minimum $T_{a_i-swi_ND}$ values. The grey area on the figure represents the acceptable range for $T_{a_i-swi_ND}$, between 5°C and 7°C, as highlighted in Tableau 4.3 (Nicolás Castilla, 2013).

The data reveal that in an unheated greenhouse (Figure 4.4a), $T_{a_i-swing,ND}$ is hardly applicable as a KPI during the colder months. This is because indoor temperatures, shown in Tableau 4.5, to Tableau 4.7, often drop below levels suitable for crop growth. Nevertheless, it remains useful for assessing other KPI (see section 4.4.3.3) by highlighting the extent of natural temperature fluctuations. This KPI can also inform strategies for managing temperature, such as thermal storage (Chen et al., 2018). With minimal heating set to 5 °C (Figure 4.4b), $T_{a_i-swing,ND}$ emerges as far more insightful KPI, as temperature fluctuations stabilise and temperatures better support sustainable crop growth. Notably, both cold and very cold climates exhibit suitable $T_{a_i-swing,ND}$ values for most months, emphasising the role of minimal heating in stabilising temperature swings. When heating is raised to 15°C (Figure 4.4c), $T_{a_i-swing,ND}$ falls below the optimal temperature swing threshold, indicating its relevance in climate control decision-making.

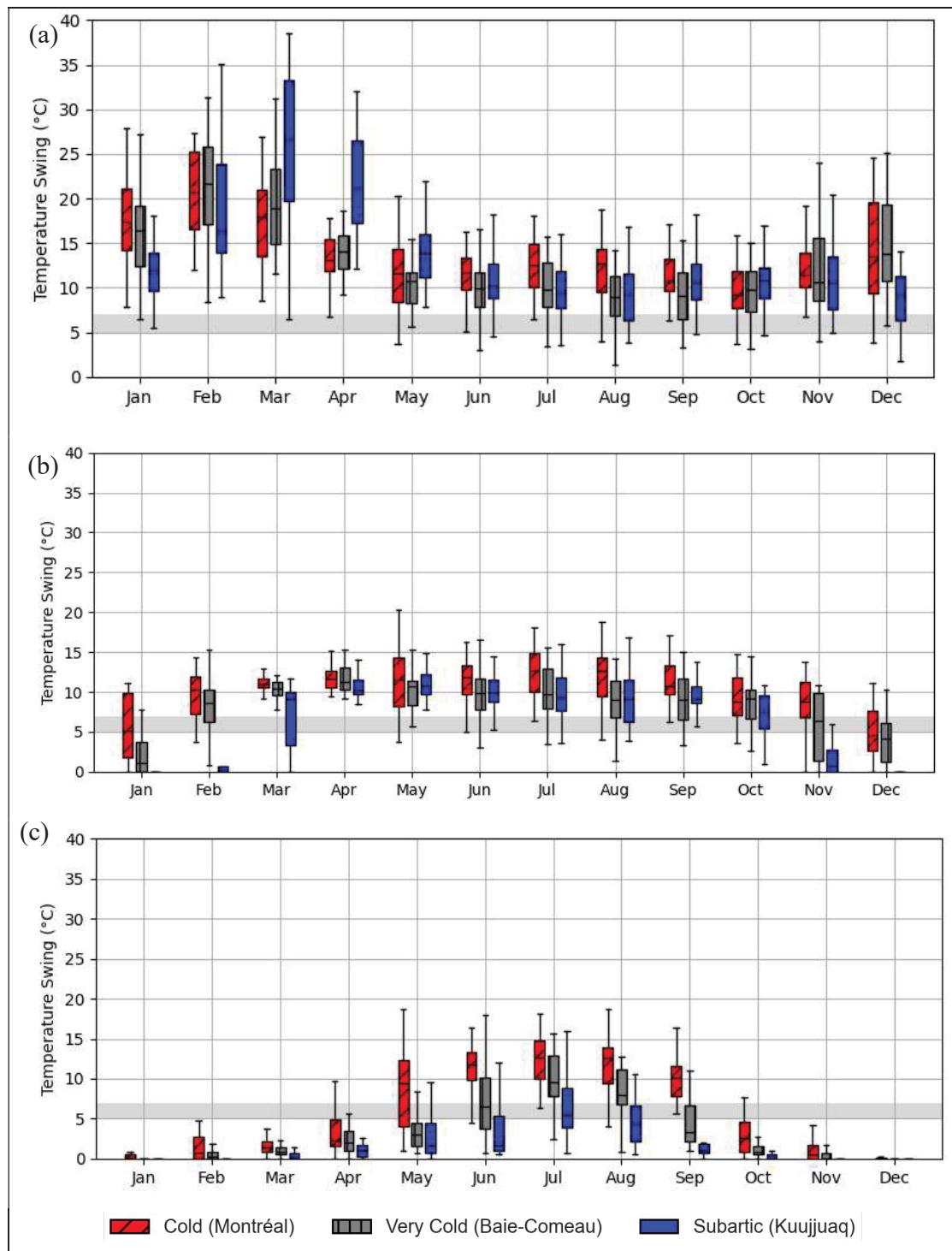


Figure 4.4 Simulated monthly temperature swing in the greenhouse for each climate: (a) unheated greenhouse, (b) heated at 5°C, and (c) heated at 15°C

As such, Tableau 4.8 presents three additional key thermal indicators: the yearly average daily temperature ($\bar{T}_{a_i,ND}$), the thermal comfort index (TCI) for both the optimal and acceptable temperature ranges of lettuce and the thermal growing season length (TGSL).

Tableau 4.8 Simulated yearly thermal indicators in the greenhouse across different climates

	$\bar{T}_{a_i,ND}$, [°C]	$TCI_{[5,30]}$	$TCI_{[15,25]}$	TGSL Date [mm-dd] start	end
		[h]	[days]		
Cold (Montréal)	11.8	6 083	3 253	269	03-02 11-25
Very Cold (Baie-Comeau)	7.8	5 534	2 855	245	03-08 11-07
Subarctic (Kuujjuaq)	1.8	4 257	1 773	192	04-19 10-27

First, the average daily temperature ($\bar{T}_{a_i,ND}$) serves as a key factor for comparing a location's general suitability for crop production. Locations with higher average temperatures, such as Montréal (11.8°C) in a cold climate, typically offer more favourable growing conditions, whereas colder locations like Kuujjuaq (1.8°C) in a subarctic climate pose significant challenges for greenhouse cultivation. However, on its own, this indicator does not provide a detailed overview of the climate variability throughout the year.

The $TCI_{[5,30]}$ represents the total number of hours within the acceptable temperature range for each climate: 6083 hours for the cold (Montréal), 5534 hours for the very cold (Baie-Comeau), and 4257 hours for the subarctic climate (Kuujjuaq). For optimal growing conditions ($TCI_{[15,25]}$), Montréal leads with 3253 hours followed by Baie-Comeau's at 2855 hours and Kuujjuaq at 1773 hours. While Baie-Comeau may have an advantage in optimal temperatures during the warm season (

Tableau 4.6), its overall duration remains shorter than Montréal. Moreover, as presented in Figure 4.9 through the unmet temperature hours (the opposite of the TCI), the TCI alone may not fully capture the severity of climatic conditions across climates. For example, a temperature

deviation of just 1°C below the acceptable range is treated the same as a 10°C deviation, despite their vastly different impacts on the greenhouse environment.

The TGSL measures the duration of favourable conditions for lettuce growth at a specific location. Montréal has the highest TGSL at 269 days, followed closely by Baie-Comeau at 245 days, and Kuujjuaq at 192 days, limiting its production window. Overall, these two KPI, even though they focus solely on temperature, provide a clear picture of climatic constraints and opportunities for crop production in unheated greenhouses with quantitative data. Nonetheless, both TCI and TGSL fail to capture short-term temperature variability, such as temperature drops, which can be lethal for crops.

Figure 4.5 presents the monthly growing degree days (*GDD*) with a 5°C base heating set point for each location, along with the cumulative annual *GDD* for the unheated greenhouse.

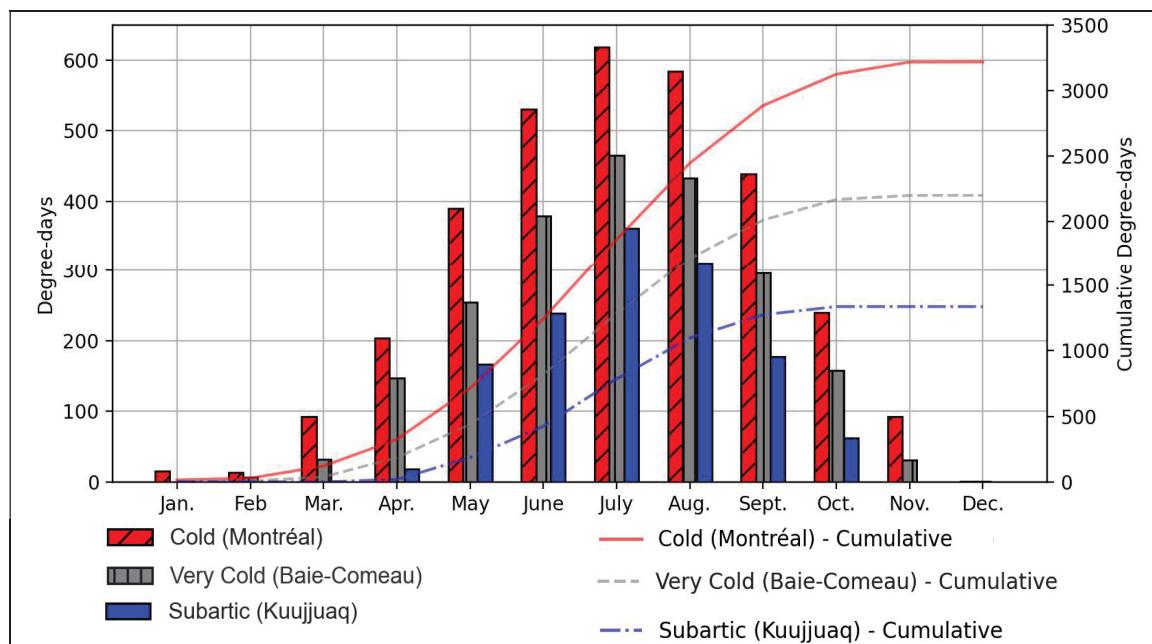


Figure 4.5 Simulated monthly and cumulated degree-days in the greenhouse for each climate for a 5°C base

The data shows that *GDD* do not accumulate in January and December across all climates, underscoring the limited growth during the colder months. A clear variation in *GDD*

accumulation across locations highlights the significance of this indicator in assessing climate suitability for crop growth. Montréal (cold) consistently records the highest *GDD* (3218 degree-days per year), followed by Baie-Comeau (very cold) with 2201 degree-days per year and then Kuujjuaq (subarctic) with 1337 degree-days per year across all months. This pattern aligns with previous findings that noted similar temperature trends for the three studied climates.

The *GDD* is a major agronomic KPI to evaluate crop growth potential. It suggests that lettuce grown in the subarctic greenhouse will grow more slowly than in a cold climate. Also, while Montréal (cold) has the highest *GDD*, it is important to note that the temperature may exceed optimal growth thresholds for lettuce during the warm season, as indicated in Tableau 4.5. Due to its definition, *GDD* does not account for overheating periods. This could potentially lead to stress on the crops, affecting their overall health and yield. Therefore, while *GDD* serves as a valuable indicator for assessing moderate temperature conditions, its effectiveness declines during warmer seasons when excessive heat may hinder crop growth.

The use of temperature-based KPI is a practical first step in evaluating the feasibility of greenhouse production across different climates, providing a quantitative basis for further optimisation strategies such as heating, insulation, and climate control. However, these indicators alone cannot fully determine the suitability of a greenhouse for crop growth. To achieve a comprehensive assessment of crop performance potential and suitability, it is essential to include additional indicators, such as the VPD presented below, and the DLI (section 4.4.3.2).

As such, Figure 4.6 presents the analysis of the vapour pressure deficit (*VPD*) for the unheated (Figure 4.6a), heated at 5°C (Figure 4.6b) and heated at 15°C (Figure 4.6c) simulated greenhouse. Each box represents the interquartile range (25th to 75th percentile), with the central bar indicating the monthly average. The whiskers indicate the maximum and minimum *VPD* monthly values. The grey area on the figure represents the limit of the acceptable *VPD* between 0.2 and 1.2 kPa, as highlighted in Tableau 4.3 (Çaylı & Baytorun, 2021).

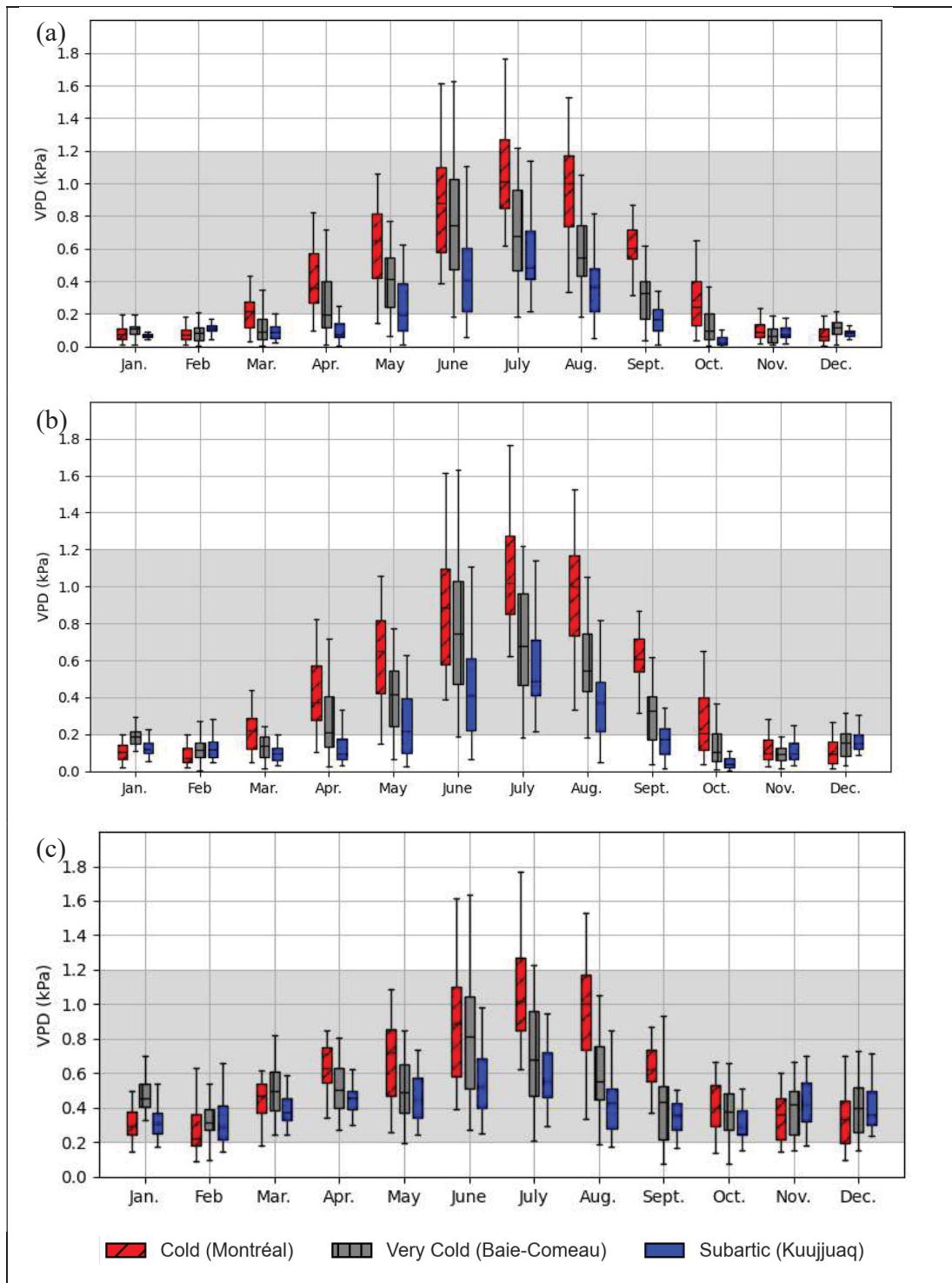


Figure 4.6 Simulated vapour pressure deficit in the greenhouse for each climate for (a) the unheated greenhouse, (b) heated at 5°C and (c) heated at 15°C

Figure 4.6 shows a strong seasonal variation, with higher *VPD* values in summer (June to August) and lower values in winter months (December to February). It also shows that the heating setpoints significantly influence *VPD*, particularly in the colder months. In the unheated greenhouse (Figure 4.6a), *VPD* remains low during winter, often falling below the optimal range, especially in very cold and subarctic climates, indicating excessive humidity. In the greenhouse heated to 5°C (Figure 4.6b), winter *VPD* values increase slightly compared to the unheated scenario but not enough to be within the acceptable range, indicating that even with minimal heating, humidity control is necessary. The greenhouse heated to 15°C (Figure 4.6c) shows the most consistent *VPD* values throughout the year, with winter values largely within or closer to the optimal range. This suggests that maintaining a higher baseline temperature improves greenhouse air saturation, reducing excessive humidity in colder months. However, the increased temperature does not significantly impact summer *VPD*, which remains high, reinforcing the need for additional cooling or humidity control strategies during warm periods. As highlighted, *VPD* is a key agronomic indicator that considers both temperature and humidity and can be used to improve greenhouse climate control, helping fine-tune heating, cooling, and humidity management strategies to ensure optimal crop growth throughout the year.

4.4.3.2 Daylighting indicators

The daily light integral (*DLI*) is the first daylighting indicator evaluated due to its widespread use in the literature and its relevance for crop production. Figure 4.7 shows the average monthly *DLI* for each location, with a required minimum *DLI* of 8 mol.m⁻².d⁻¹ for lettuce growth (Glenn et al., 1984).

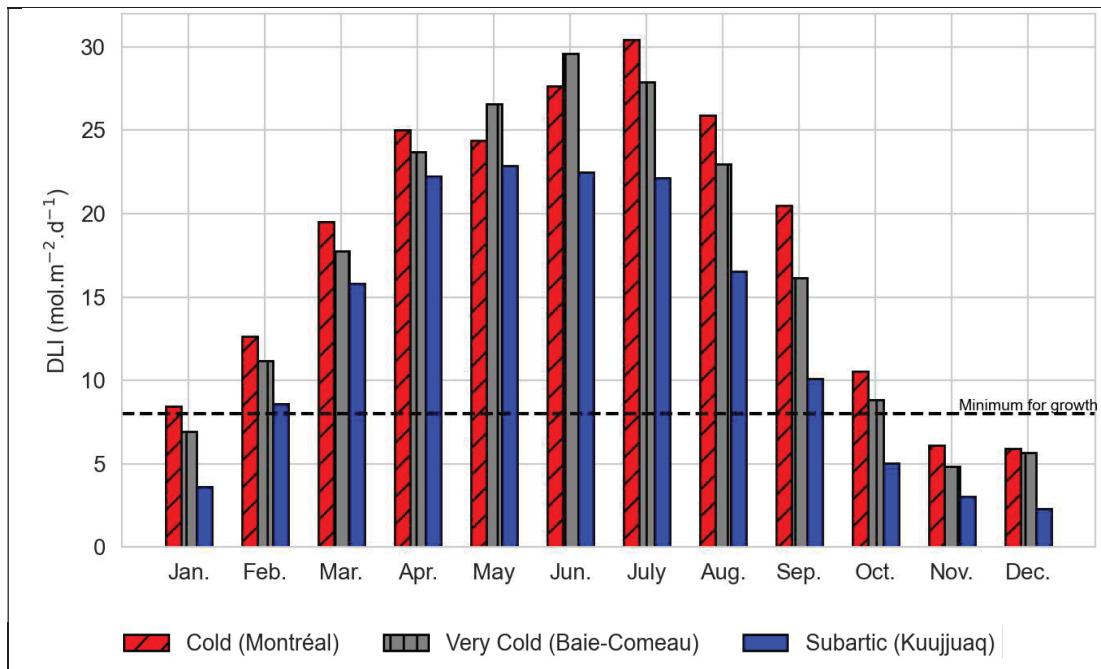


Figure 4.7 Simulated average monthly daily light integral in the greenhouse for each climate

Figure 4.7 reveals that although all climates exhibit similar seasonal trends, their suitability for lettuce production can be more precisely assessed by key indicators. The *DLI* analysis highlights potential growing periods, revealing varying suitability levels throughout the year, largely influenced by latitude (Tableau 4.1). Additionally, the analysis emphasises the need for artificial lighting from November to December across all locations to meet the minimum *DLI* requirements. Although Figure 4.7 does not capture short-term variability, it provides a valuable overview of available *DLI*. It serves as an essential first step in evaluating the crop sustainability of a specific region.

Tableau 4.9 provides a more complete daylighting portrait for each climate by presenting yearly mean, minimum and maximum *DLI* and the daylight growing season length computed using the daylight autonomy factor (*DAF*).

Tableau 4.9 Simulated global daylighting indicators in the greenhouse for each climate

	DLI [mol. d ⁻¹ .m ⁻²]				DAF			
	Mean	Min	Date [mm-dd]	Max	Date [mm-dd]	Duration [days]	Date [mm-dd] start	end
Cold (Montréal)	18.1	0.72	12-17	44.8	06-12	291	01-20	11-06
Very Cold (Baie-Comeau)	16.9	1.0	11-22	42.2	05-30	254	01-20	09-30
Subarctic (Kuujjuaq)	12.9	0.5	12-05	44.9	06-15	242	02-05	10-04

While the annual mean, minimum and maximum *DLI*, as presented in Tableau 4.9, do not directly determine the greenhouse production potential, they provide essential insight into light availability, which is a crucial factor for assessing regional differences. The *DAF* provides an additional evaluation of the growing season by quantifying the number of consecutive days suitable for lettuce growth based solely on available solar radiation. Tableau 4.9 highlights the differences in the *DAF*-based growing season lengths across the three climates. The cold climate exhibits the longest suitable period (291 days), followed by very cold (254 days) and subarctic (242 days) climates. This KPI offers useful quantitative insight into the length of the growing season for a greenhouse without artificial lighting.

As discussed, analysing *DLI* and *DAF* is crucial for assessing crop growth and sustainability. However, these indicators should be used alongside thermal KPI to comprehensively evaluate greenhouse potential since while a temporary *DLI* deficit may slow crop development, a temperature drop below critical thresholds can be far more damaging to crop viability.

4.4.3.3 Energy indicators

The final category of KPI includes energy indicators, offering valuable insights into the energy requirements for maintaining suitable indoor conditions. Figure 4.8 presents the energy use intensity (*EUI*), while Figure 4.10 presents the monthly peak energy demand (*P*) required to maintain two indoor air temperature setpoints (5°C and 15°C) across the three locations. These setpoints were selected as they correspond to the lower limits of the acceptable and optimal temperature ranges for lettuce production.

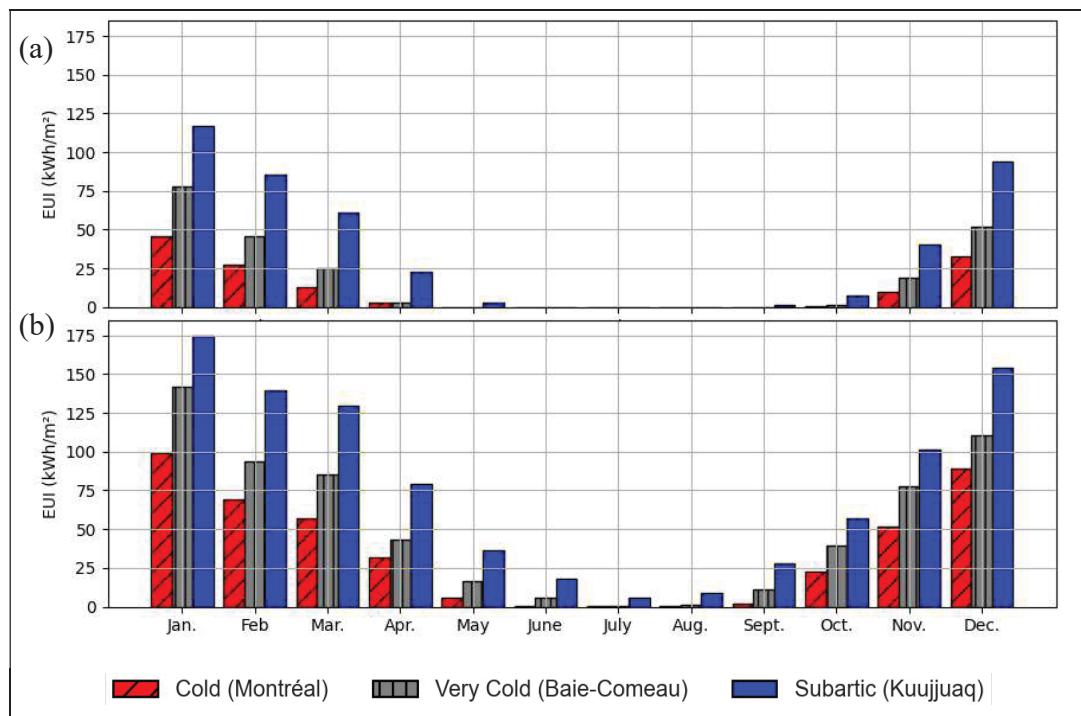


Figure 4.8 Simulated monthly energy use intensity (EUI) for each climate for a greenhouse
(a) heated at 5°C and (b) heated at 15°C

Figure 4.8 illustrates how *EUI* can be used to assess the energy demands associated with maintaining different indoor temperatures across locations. This indicator helps quantify the impact of climatic conditions on greenhouse energy consumption, highlighting the relationship between temperature and heating requirements.

An alternative representation of *EUI* is shown in Figure 4.9a and Figure 4.9c. It consists of two subplots, each depicting the cumulative *EUI* over a year for different setpoints. This representation enables the estimation of total energy consumption based on the production start and end dates by integrating the area under the curve. July is set as the reference point (0) since it has been heuristically determined to always fall within the thermal and daylight-based growing season, making it a logical baseline for comparing different start dates. This approach offers a practical tool for estimating energy use based on more specific production timing.

In addition, to better contextualise heating requirements, Figure 4.9b and Figure 4.9d illustrate the cumulative unmet temperature hours (UH_T), representing the total number of hours when an unheated greenhouse's indoor temperature drops below 5°C or 15°C , respectively. At first glance, these curves appear similar across different regions during the colder months, suggesting comparable frequencies of suboptimal conditions. However, when compared with the cumulative *EUI* curves (Figure 4.9a and Figure 4.9c), it becomes clear that not all suboptimal periods carry the same energy cost. Even if different climates or time periods experience a similar number of UH , the energy needed to compensate for these conditions can vary greatly. This highlights the importance of considering energy indicators like *EUI* when planning to extend the growing season with heating.

While *EUI* offers an overview of total energy consumption, the peak energy demand (P) shown in Figure 4.10 highlights the monthly hourly peak energy demand required to maintain the temperature setpoints, with important implications for heating system sizing and operational efficiency. This indicator is particularly valuable for understanding how climatic variability influences heating strategies. For instance, in climates with more significant temperature fluctuations (see Figure 4.4a), heating systems may need to respond more aggressively to sudden temperature drops, resulting in higher peaks in energy demand. These differences become even more pronounced at higher temperature setpoints. For example, although Kuujuaq consistently has the highest *EUI* due to its colder climate, it does not always show the highest energy demand. Peak energy demand refers to short-term spikes in energy requirements rather than the total energy consumption. In milder climates, such as Baie-

Comeau, where temperature fluctuations are more pronounced, heating must respond more aggressively to sudden drops in temperature, resulting in higher peak energy demands. These differences between *EUI* and peak energy demands become more pronounced for higher temperature setpoints.

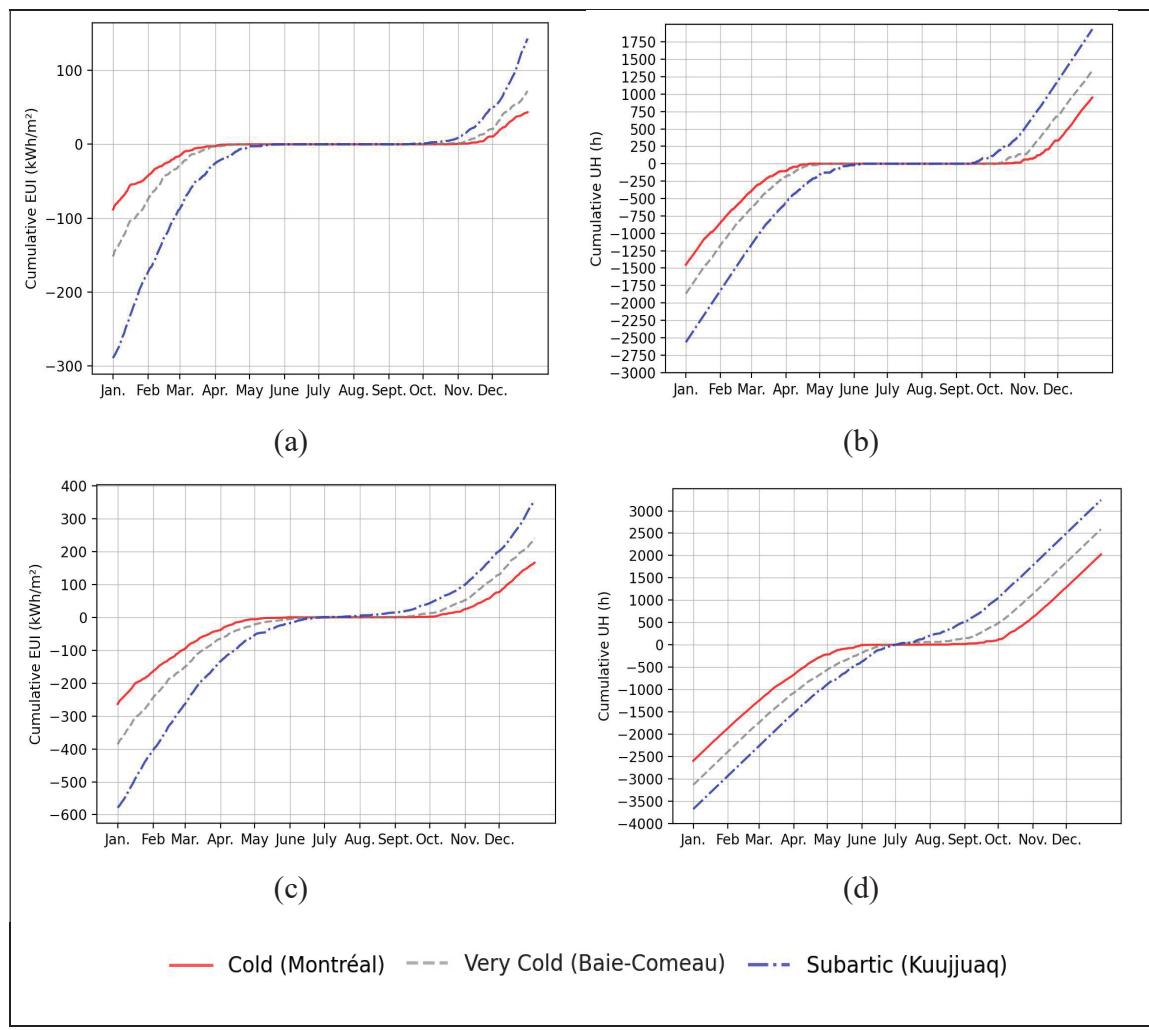


Figure 4.9 Simulated cumulated energy use intensity (*EUI*) and unmet temperature hours (UH_T) for each climate for (a) and (b) heated at 5°C , (c) and (d) heated at 15°C

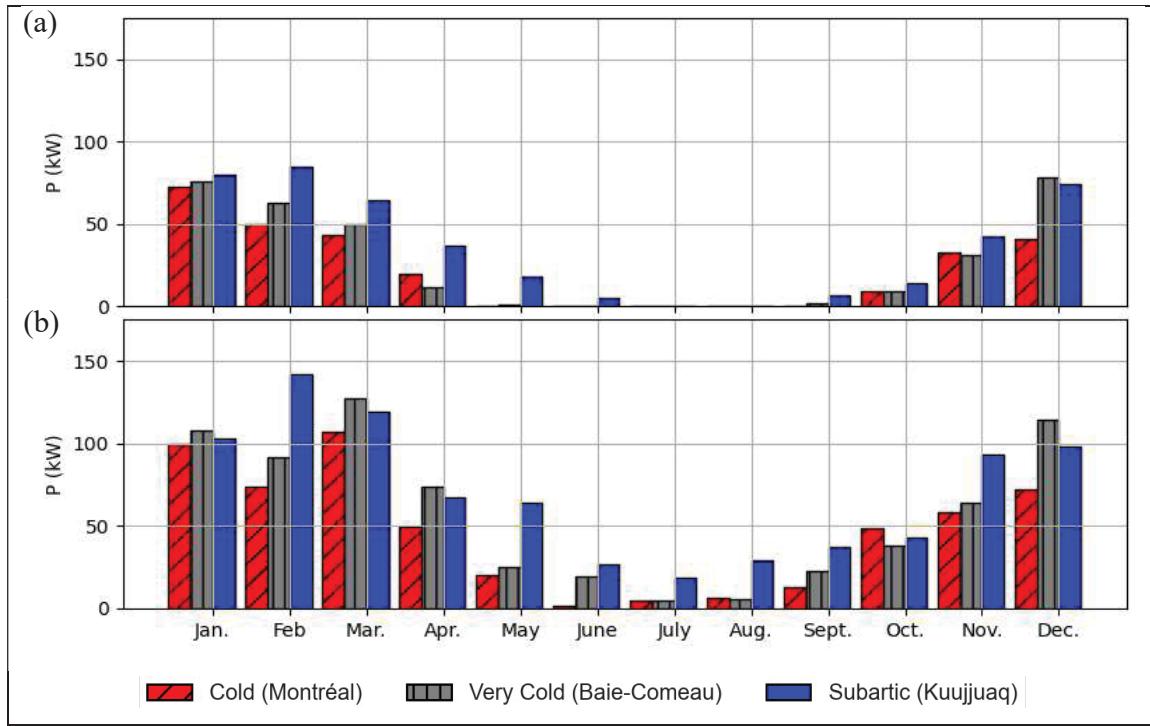


Figure 4.10 Simulated monthly peak energy demand for each climate for the greenhouse (a) heated at 5°C and (b) heated at 15°C

Finally, Tableau 4.10 summarises the key energy indicators, including annual EUI and P , demonstrating the relevance of these metrics in assessing energy consumption and power requirements based on geographic location. For example, for the same simulated greenhouse with a heating setpoint of 5°C, the EUI increases from 132 kWh.m⁻² in Montréal to 433 kWh.m⁻² in Kuujjuaq, while the peak energy demand rises from 72 kW to 85 kW.

Tableau 4.10 Simulated global energy indicators in the greenhouse for each climate

	EUI [kWh.m ⁻²]		P [kW]	
	5°C	15°C	5°C	15°C
Cold (Montréal)	132	429	72	107
Very Cold (Baie-Comeau)	225	627	79	127
Subarctic (Kuujjuaq)	433	934	85	142

These KPI highlight how harsh climates substantially increase heating requirements, leading to increased energy consumption and peak demand. They are critical for assessing the energy requirements to maintain optimal growing conditions in active greenhouses. Additionally, they can be used to evaluate the heating system sizing and the profitability of integrating various energy efficiency technologies in greenhouse operations, such as daily or seasonal thermal storage (Chen et al., 2018). As discussed, these indicators are highly relevant for evaluating the economic and environmental challenges of greenhouse operations across different climates; however, they are limited by their focus on a specific setpoint. To gain a more comprehensive understanding of heating efficiency, these indicators should be analysed in conjunction with thermal and daylighting indicators, such as those shown in Figure 4.9. This would help identify periods when heating is less effective, particularly when other indicators may suggest that crop growth requirements are not being met. Additionally, linking the energy KPI to greenhouse yield using the specific energy use (*SEU*) (Tableau 4.2) provides a more robust evaluation of the overall greenhouse viability.

4.4.4 Assessment of gaps and limitations

Tableau 4.11 summarises the KPI analysed, outlining their advantages and limitations. As discussed, these indicators offer critical insights into greenhouse thermal conditions, daylight availability, and energy efficiency, serving as the foundation for comparing different greenhouses in terms of crop suitability and system efficiency. However, each KPI has its own constraints, such as a limited scope of analysis, reliance on specific environmental factors, or the inability to capture short-term variations. Additionally, each category of KPI shares common limitations that are not listed in the table; notably, they only describe suitability within their respective category. Most KPI cannot assess suitability across multiple dimensions, which is insufficient for fully evaluating overall greenhouse performance. This summary serves as a concluding assessment, emphasising the need for a combined approach when interpreting results to ensure a comprehensive evaluation of greenhouse performance.

Tableau 4.11 Advantages and limitations of the generated KPI

Category	Indicator	Advantages	Limitations
Thermal	$\bar{T}_{a_i,ND}, T_{a_i,max}, T_{a_i,min},$	<ul style="list-style-type: none"> - Provides a global view of thermal variability, crop suitability and greenhouse performance 	<ul style="list-style-type: none"> - Lacks short-term variation analysis
	$T_{a_i-swing,ND}$	<ul style="list-style-type: none"> - Measures daily temperature amplitude - Provides insight into heating system performance 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited insight into crop suitability
	TCI	<ul style="list-style-type: none"> - Simple quantitative KPI for comparing unheated greenhouse thermal suitability 	<ul style="list-style-type: none"> - Does not account for non-consecutive hours
	$TGSL$	<ul style="list-style-type: none"> - Simple quantitative KPI for comparing unheated greenhouses suitable thermal season length 	<ul style="list-style-type: none"> - Does not capture short-term critical temperature drops
	GDD	<ul style="list-style-type: none"> - Assesses crop growth potential 	<ul style="list-style-type: none"> - Does not capture overheating
	VPD	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluates crop growth potential using temperature and humidity - Provides insights for heating management 	<ul style="list-style-type: none"> - Lacks suitability insights when used alone
Daylighting	DLI	<ul style="list-style-type: none"> - Provides an annual overview of daylighting and crop suitability 	<ul style="list-style-type: none"> - Lacks short-term variation analysis
	DAF	<ul style="list-style-type: none"> - Simple quantitative KPI for comparing greenhouse suitable growing season length based on daylighting 	<ul style="list-style-type: none"> - Does not capture short-term critical daylighting variations
Energy	EUI	<ul style="list-style-type: none"> - Assesses greenhouse viability over the year 	<ul style="list-style-type: none"> - Does not assess crop suitability
	P	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluates greenhouse heating system requirements 	

4.4.5 Review and improvement of KPI

Building on the analysis of the simulated results from section 4.4.3, the following section will classify the different indicators based on their relevance and refine selected ones to enhance their applicability, considering the advantages and limitations presented in Tableau 4.11. Additionally, attention will be given to exploring the interactions between thermal, daylighting, and energy indicators, as each provides unique insights into the conditions influencing lettuce cultivation.

First of all, temperature indicators, such as $\bar{T}_{a_i,ND}$, TCI and $TGSL$, provide direct and quantifiable measures of environmental suitability for crop growth. These indicators are well established in agronomic and building research and are widely used for performance assessment and comparative analysis across different climates. Their ability to identify favourable growing conditions is particularly valuable when evaluating potential sites for year-round production, as they help determine whether natural temperature conditions align with crop requirements. However, due to their definitions, they primarily provide a broad assessment of climatic suitability over extended periods, making them less effective in detecting short-term temperature fluctuations.

The gap in the $TGSL$ can be addressed by identifying the period when the temperatures fall below -4°C , the tolerance limit for lettuce (Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador, 2021). A review of temperature data reveals that within the previously calculated $TGSL$, temperatures dropped below -4°C for 10 days in the cold climate, 13 days in the very cold climate, and 6 days in the subarctic climate. These low temperatures pose a significant risk to lettuce health and should be excluded from the growing season length. As such, an updated definition of $TGSL$, referred to as $TGSL_{limit}$, is presented in Tableau 4.12. This new definition affects the start date of the growing season, especially for the very cold climates, where the revised data differs by almost three days from the initially calculated value.

Other thermal KPI, such as GDD , $T_{a_i\text{-}swing,ND}$ and VPD , complement these broader indicators by offering more nuanced insights into the greenhouse microclimate. While they may not directly indicate whether crops can survive in a given location, they provide essential information on the overall growing conditions and system performance. For example, GDD is a crucial agronomic indicator for understanding crop development rates, while $T_{a_i\text{-}sw,ND}$ helps assess daily temperature fluctuations that could affect crop stress and metabolic efficiency. Similarly, VPD plays a key role in evaluating crop transpiration and water-use efficiency, which are critical factors for both crop health and climate control strategies.

Daylighting KPI, such as the DLI and DAF , assess the availability of natural light for photosynthesis and are critical elements in successful crop production. These indicators are particularly useful in identifying periods of insufficient light, especially in higher latitudes where daylight can be limited.

Similar to the $TGSL$, the use of DAF to establish a daylight growing season length has limitations in capturing short-term fluctuations in light availability, which could potentially disrupt crop growth during crucial periods. An improvement to the $TGSL$ is proposed by incorporating a daylighting component, resulting in the overall growing season length ($OGSL$). For the $OGSL$, both the $TGSL_{limit}$ and DAF -based growing season length must be satisfied simultaneously. This combined approach results in a shortened growing season for all locations, with a particularly notable impact on the end date, as shown in Tableau 4.12.

These two modifications ($TGSL_{limit}$ and $OGSL$) significantly enhance these indicators, transforming it into a dual-element indicator that accounts for both thermal fluctuations and daylight availability. Consequently, the growing seasons in cold and subarctic climates are reduced by approximately one month, while the growing season in very cold is shortened by around two months when compared with the original $TGSL$ calculation as seen in Tableau 4.8.

Tableau 4.12 Modified thermal growing season length compared to its initial value for each climate

	$TGSL_{limit}$			$\Delta TGSL_{limit}$		$OGSL$			$\Delta OGSL$		
	[date]			[date]							
	[days]	start	end	[days]	[days]	start	end	[days]			
Cold (Montréal)	255	03-13	11-23	-14	239	03-13	11-06	-30			
Very Cold (Baie-Comeau)	224	03-28	11-07	-21	184	03-28	09-30	-61			
Subarctic (Kuujjuaq)	182	04-28	10-27	-10	160	04-28	10-04	-32			

Energy KPI, such as EUI and P , are critical for assessing the energy requirements to maintain optimal growing conditions in active greenhouses, particularly in colder climates. These indicators reveal variations in energy consumption across different locations, with colder climates requiring more energy to reach the setpoint temperatures. While these indicators are highly relevant for evaluating the economic and environmental challenges of greenhouse operations across different climates, they focus on a specific setpoint that limits their scope. To gain a more comprehensive understanding of heating efficiency, these indicators should be conjunction with thermal and daylighting indicators, as shown in Figure 4.9 where correlating EUI with UH reveals that similar frequencies of suboptimal temperatures can have very different energy demands. This can help identify periods when heating is less effective, as other indicators, such as daylighting, may reveal that crop growth requirements are still unmet.

By refining key indicators and integrating thermal and daylighting constraints, the proposed KPI give a more complete picture of crop viability in cold-climate greenhouses. Rather than treating environmental, agronomic, and energy aspects separately, they underscore how these dimensions interact and shape overall system performance.

4.5 Conclusions

This study proposes a standardised framework of key performance indicators (KPI) for evaluating greenhouse performance, specifically tested for cold climates. Simulations conducted across three distinct Canadian climatic zones demonstrate the effectiveness of selected indicators in capturing variations in thermal conditions, daylight availability, and energy requirements. The analysis shows that while individual KPI are useful within their respective categories—thermal, daylighting, and energy—they have limitations when used in isolation.

Certain KPI, such as the average indoor air temperature over nychthemeron ($\bar{T}_{a_i,ND}$) and daily light integral (DLI) are essential for assessing crop survival, as they indicate whether basic growth conditions are met. Others, including the thermal comfort index (TCI), the thermal growing season length ($TGSL$) and the daylight autonomy factor (DAF), offer valuable insights into the overall climate, helping assess the suitability for greenhouse production. More detailed indicators, such as the growing degree days (GDD), the temperature difference between maximum and minimum indoor air temperature over nychthemeron (T_{a_i-swi},ND) and the vapour pressure deficit (VPD) inform operational strategies for climate control. In contrast, energy-based KPI such as energy use intensity (EUI) and peak demand (P) are essential for understanding the economic and environmental viability of greenhouse operations.

In addition to the standard set of KPI analysed, this study introduces two refined indicators aimed at enhancing decision-making for greenhouse cultivation in cold climates. The $TGSL_{limit}$ accounts for lethal cold events by defining a growing season that excludes short-term temperature drops below critical thresholds. The overall growing season length ($OGSL$) builds on this by identifying periods during which both temperature and daylight conditions meet the minimum requirements for crop growth, providing a more integrated and realistic measure of optimal growing conditions.

Together, these findings highlight the importance of a multidimensional KPI framework in supporting informed and sustainable decision-making in greenhouse design and operation. Future research could explore the integration of crop yield and economic performance indicators to build a more comprehensive picture of greenhouse viability, thereby supporting the development of resilient food production systems in various climates.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif d'explorer l'évaluation et l'analyse d'indicateurs de performance pour les serres, à travers deux approches de modélisation complémentaires : un modèle quasi-statique simplifié, conçu pour être accessible au milieu professionnel, et un modèle dynamique plus détaillé, basé sur le logiciel TRNSYS. Ces deux outils ont permis de produire, comparer et analyser un ensemble d'indicateurs regroupés en trois grandes familles : thermiques, radiatifs, et énergétiques.

Le modèle quasi-statique, élaboré dans un chiffrier Excel, a permis de développer un outil pratique et accessible destiné aux producteurs et conseillers techniques. Il permet d'estimer rapidement les besoins de chauffage d'une serre selon différents paramètres : 69 localisations climatiques, différents types d'enveloppes de serres typiques de l'industrie, consignes de température diurne et nocturne, caractéristiques de l'équipement de chauffage, etc. Ce modèle a été validé à partir de données de consommation réelle en chauffage de 10 sites du Québec avec une erreur relative maximale de $\pm 22\%$. Sa simplicité d'utilisation et sa capacité à générer des résultats pertinents en font un support d'aide à la décision, notamment dans le contexte québécois, où une grande diversité de serres coexiste sur le territoire. L'outil a d'ailleurs été reconnu par le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) comme nouvelle référence économique, témoignant de sa robustesse et de son utilité concrète pour le secteur. Cependant, le modèle quasi-statique atteint ses limites lorsqu'on cherche à analyser la dynamique horaire des paramètres climatiques (température, rayonnement, humidité, etc.), essentiels dans les environnements contrôlés. C'est dans ce contexte que l'apport du modèle dynamique TRNSYS prend tout son sens.

En effet, le modèle dynamique développé sous TRNSYS a permis d'approfondir l'analyse en simulant les interactions complexes entre les variables climatiques extérieures, les caractéristiques de la serre, les systèmes de ventilation ou de chauffage, et le comportement thermique du couvert végétal. Ce modèle a été appliqué à une serre type de 247 m², modélisée dans trois climats distincts du Québec (froid, très froid, subarctique), et selon trois scénarios de chauffage (non chauffé, chauffage minimal à 5 °C, et à 15 °C). Grâce à cette approche, il a

été possible d'évaluer la robustesse et les limites des indicateurs utilisés pour caractériser la performance des serres.

Plusieurs indicateurs thermiques couramment utilisés dans la littérature comme la température moyenne, le *TCI* (indice de confort thermique), le *TGSL* (saison de croissance thermique) et les *GDD* (dégrée jours de croissance) ont montré leur capacité à présenter des tendances générales sur la viabilité thermique. Par exemple, le *TGSL* annuel pour la serre non chauffée atteignait 230 jours pour le climat froid (Montréal), 180 jours pour le climat très froid (Baie-Comeau) et seulement 142 jours pour le climat subarctique (Kuujjuaq). Cependant, ces durées surestiment la réalité puisqu'elles peuvent inclure des journées ponctuées de gel. En réponse, l'étude a proposé une version corrigée du *TGSL*, soit le *TGSL_{limit}* qui exclue ces épisodes avec une température intérieure inférieure à -4°C , soit le seuil limite pour la laitue. Ce simple ajustement réduit la saison de croissance théorique à 192 jours à Montréal et 106 jours à Kuujjuaq, soulignant l'importance de filtrer les épisodes thermiquement critiques.

Sur le plan radiatif, deux indicateurs ont été analysés. Le *DLI* (integral d'éclairage journalier), exprimé en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$, indique l'énergie lumineuse utile reçue par les plantes. En croisant cette donnée avec les besoins de la laitue (minimum $8 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$), le facteur d'autonomie solaire (*DAF*) a été calculé pour quantifier le nombre de jours où l'éclairage naturel est suffisant. Pour le climat très froid (Baie-Comeau), par exemple, le rayonnement solaire est insuffisant pour environ quatre mois par an, impliquant un recours important à l'éclairage artificiel en dehors de cette période. C'est à partir de cette lecture croisée qu'un nouvel indicateur composite, l'*OGSL* (saison de croissance globale), a été proposé. En combinant les contraintes de température (*TGSL_{limit}*) et de lumière (*DAF*), il permet d'identifier la durée effective de la saison culturelle sans assistance (éclairage artificiel et chauffage) par exemple, 110 jours/an à Baie-Comeau, contre 160 selon le *TGSL_{limit}* seul.

Enfin, sur le plan énergétique, les résultats ont permis d'évaluer le compromis entre performance thermique et consommation. L'intensité énergétique (*EUI*), exprimée en $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$, a montré une hausse importante avec le chauffage à 15°C , atteignant plus de 550

$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ pour le climat subarctique (Kuujjuaq), contre moins de $200 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ pour le climat froid (Montréal). L'appel de puissance maximal (P), correspondant à la puissance maximale requise au courant d'une année, variait fortement selon le scénario, avec des pointes atteignant plus de $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Ces résultats démontrent que chaque indicateur possède une valeur propre, mais aussi des limites qu'il est crucial de reconnaître. Pris isolément, certains peuvent conduire à des interprétations erronées ou incomplètes. L'étude souligne donc l'importance de recouper plusieurs IDP (thermiques, radiatifs et énergétiques) pour obtenir une image réaliste et exploitable de la performance d'une serre. Elle justifie également le développement d'un cadre d'évaluation standardisé, tel que proposé dans ce mémoire, où les indicateurs sont sélectionnés, combinés et interprétés selon les besoins agronomiques, les contraintes climatiques et les scénarios énergétiques considérés pour contribuer à l'amélioration des pratiques agricoles dans un contexte d'électrification, de durabilité et d'adaptation aux conditions climatiques nordiques.

La comparaison entre les deux modèles utilisés renforce cette conclusion : le modèle quasi-statique s'est révélé pertinent pour générer rapidement des indicateurs énergétiques globaux (E , EUI , P , U_{ds}) et comparer des structures ou des scénarios, mais il ne permet pas de détecter les phénomènes climatiques. En revanche, le modèle dynamique TRNSYS, bien que plus complexe à déployer, a permis de simuler ces indicateurs avec une granularité horaire, révélant des contraintes invisibles dans une approche simplifiée. Ainsi, les deux outils ne s'opposent pas, mais se complètent : le modèle statique est utile pour un diagnostic rapide ou une première sélection de scénarios, tandis que le modèle dynamique est essentiel pour affiner l'analyse et dimensionner des stratégies de contrôle ou d'optimisation. L'usage combiné des deux modèles renforce donc la fiabilité de l'évaluation et soutient la mise en place d'une méthodologie progressive et adaptable selon les objectifs de l'étude.

Ces travaux ouvrent la voie à plusieurs pistes de recherche. En premier lieu, l'intégration d'un modèle de croissance des cultures, permettant de faire varier dynamiquement l'indice de

surface foliaire (LAI), constituerait une suite logique et directe de ce projet. Une telle intégration permettrait de relier plus précisément les conditions climatiques simulées à la productivité végétale réelle, en tenant compte des interactions entre la température, l'éclairage et le développement physiologique des plantes. Cette évolution rendrait possible le calcul d'indicateurs agronomiques comme le rendement en biomasse ou en kilogrammes, et permettrait d'introduire des indicateurs de performance qu'il a été impossible d'analyser dans cette étude. De même, l'ajout d'une couche économique ou environnementale pourrait compléter l'analyse énergétique en évaluant le coût par kilogramme de production ou l'empreinte carbone. De plus, l'analyse du bilan environnemental entre une production en serre locale et l'importation d'aliments pourrait être un indicateur supplémentaire pertinent pour déterminer la pertinence environnementale de cette production. Enfin, une implantation à plus grande échelle de ces indicateurs dans des outils de suivi en temps réel, ou leur intégration à des stratégies de pilotage intelligent des serres représenteraient une étape importante vers l'optimisation continue de la performance en agriculture protégée.

RECOMMANDATIONS

La liste suivante de recommandations vise à orienter les chercheurs, les producteurs et les décideurs vers des actions concrètes pour renforcer l'efficacité et la durabilité de la production en serre.

1. Standardiser l'utilisation des indicateurs de performance.

Promouvoir l'adoption d'une grille d'indicateurs de performance et d'une méthodologie commune dans les études et rapports techniques afin de faciliter la comparaison entre projets, régions et types de serres.

2. Encourager l'usage de modèles simples en phase de conception préliminaire.

Intégrer des outils quasi-statiques comme celui développé dans ce mémoire dans les guides techniques et les formations pour permettre une évaluation rapide de la performance énergétique des serres, sans expertise approfondie en simulation.

3. Prioriser l'intégration d'outils de simulation dynamique pour les phases plus avancées de projet.

Utiliser des modèles dynamiques (ex. : TRNSYS) pour les étapes plus avancées d'un projet pour optimiser les systèmes thermiques, valider les stratégies de contrôle climatique et soutenir la prise de décision.

4. Combiner différents types d'indicateurs pour une évaluation optimale.

Utiliser conjointement des indicateurs thermiques, radiatifs et énergétiques afin de mieux cerner les compromis entre lumière, température et énergie.

5. Soutenir la formation des producteurs à l'analyse énergétique simplifiée.

Développer des outils de vulgarisation et des formations permettant aux producteurs d'utiliser eux-mêmes les indicateurs de performance pour guider leurs décisions techniques.

La mise en œuvre de ces recommandations permettrait non seulement de renforcer l'efficacité énergétique du secteur, mais également de soutenir le transfert de connaissance vers une agriculture plus durable et résiliente.

ANNEXE I

TABLEAUX DE DONNÉES ENTRANTES DU MODÈLE QUASI-STATIQUE

Cette section présente les différentes données entrantes pour le modèle quasi-statique. Celles-ci sont principalement utilisées dans les équations du Tableau 3.1

Tableau AI.1 Coefficient de transfert thermique et de captage de radiation solaire de revêtements pour les serres
Tiré de ASHRAE (2019) et Bartok (2001)

Revêtement	Coefficient U	e
	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	[%]
Verre simple	6.4	90
Verre double	4.0	82
Polyéthylène simple	6.8	87
Polyéthylène double, soufflé	4.0	78
Polyéthylène double, soufflé, écran thermique	2.5	78
Polyéthylène simple sur verre	4.8	82
Polyéthylène double sur verre	3.4	73
Fibre de verre ondulée	6.8	89
Feuille plastique structurée 16mm	3.3	86
Feuille plastique structurée 8mm	3.7	89
Feuille plastique structurée 6mm	4.1	90
Mur isolé	0.5	0

Tableau AI.2 Facteur de construction selon le type de revêtement et de structure
Tiré de ASHRAE (2019)

Type de construction	Facteur
Vitrage sur ossature métallique, espace de 400 à 600 mm	1.08
Vitrage sur ossature métallique, espace de 1200 mm	1.05
Fibre de verre sur ossature métallique	1.03
Film plastique sur ossature métallique	1.02
Film ou fibre de verre sur ossature de bois	1.00

Tableau AI.3 Coefficients de pertes thermiques dues à la jonction entre le sol et le périmètre des surfaces extérieures d'une serre
Tiré de Bartok(2001)

Type de périmètre	U_p [W·(m·K) ⁻¹]
Non isolé	1.38
Isolé avec 50 mm (2 po.) de polystyrène expansé sur 600 mm (24 po.) dans le sol	0.69

Tableau AI.3 Taux d'infiltration selon le type de serre
Tiré de ASHRAE (2019)

Type et construction	Taux d'infiltration (N)¹⁾
	[h ⁻¹]
<u>Nouvelle construction :</u>	
Polyéthylène double	0.75-1.5
Verre ou fibre de verre	0.5-1.0
<u>Ancienne construction :</u>	
Verre, bon entretien	1.0-2.0
Verre, mauvais entretien	2.0-4.0

¹⁾Échanges de volume d'air interne par unité de temps (s⁻¹ ou h⁻¹). Les vents forts ou l'exposition directe au vent augmentent les taux d'infiltration. Les vents forts ou l'exposition directe au vent augmentent les taux d'infiltration ; à l'inverse, les vents faibles ou la protection contre le vent réduisent les taux d'infiltration.

Tableau AI.4 Équivalence entre les combustibles
Tiré de CRAAQ (2024)

Source d'énergie	Unité de mesure	Capacité calorifique brute	Facteur de conversion à utiliser	Efficacité énergétique [%]	
		[kJ]		Typique	Observée
Électricité	kWh	3 600	2.78E-04	100	
Gaz propane	litre	25 310	3.92E-05	92	62-98
Gaz naturel	m ³	37 890	2.64E-05	92	60-98
Mazout n° 2	litre	38 500	2.57E-05	83	60-92
Bois de chauffage (bois dur)	corde	30 600 000	3.27E-08	75	38-80
Granule de bois	tonne	18 000 000	5.56E-08	85	85

* 1 m³ apparent de bois = 0.2758 corde (4 pi x 4 pi x 8 pi)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbasi, M., Oshaghi, M. A., Mehdi Sedaghat, M., Hazratian, T., Rahimi Foroushani, A., Jafari-Koshki, T., . . . Hanafi-Bojd, A. A. (2023). Development of a degree-day model to predict the growth of *Anopheles stephensi* (Diptera: Culicidae): implication for vector control management. *Environmental Entomology*, 52(6), 1126-1138. doi: 10.1093/ee/nvad092. Repéré à <https://doi.org/10.1093/ee/nvad092>
- Adesanya, M. A., Na, W.-H., Rabiu, A., Ogunlowo, Q. O., Akpenpuun, T. D., Rasheed, A., . . . Lee, H.-W. (2022). TRNSYS Simulation and Experimental Validation of Internal Temperature and Heating Demand in a Glass Greenhouse. *Sustainability*, 14(14), 8283. Repéré à <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8283>
- Akitsu, T. K., Nasahara, K. N., Ijima, O., Hirose, Y., Ide, R., Takagi, K., & Kume, A. (2022). The variability and seasonality in the ratio of photosynthetically active radiation to solar radiation: A simple empirical model of the ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102724. doi: 10.1016/j.jag.2022.102724. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243422000502>
- Al-Rikabi, S., Santolini, E., Pulvirenti, B., Bovo, M., Barbaresi, A., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2023). Definition of thermal comfort of crops within naturally ventilated greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering*, 54(4). Repéré à <https://doi.org/10.4081/jae.2023.1540>
- Ali, R. B., Aridhi, E., & Mami, A. (2015). Dynamic model of an agricultural greenhouse using Matlab-Simulink environment. Dans *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)* (pp. 346-350). doi: 10.1109/STA.2015.7505185
- Altair-Engineering. (2024). Static and Quasi-Static Simulation. Repéré à https://help.altair.com/hwsolvers/ms/topics/solvers/ms/static_simulation_in_motionso_lve.htm#:~:text=Quasi%2Dstatic%20means%20that%20the,performed%20over%20a%20given%20duration.
- Altes-Buch, Q., Quoilin, S., & Lemort, V. (2019). Greenhouses: A Modelica Library for the Simulation of Greenhouse Climate and Energy Systems. Dans. doi: 10.3384/ecp19157533

- Anandhi, A. (2016). Growing degree days—Ecosystem indicator for changing diurnal temperatures and their impact on corn growth stages in Kansas. *Ecological Indicators*, 61, 149-158. Repéré à <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.023>
- Anderson, D. B. (1936). Relative humidity or vapor pressure deficit. *Ecology*, 17(2), 277-282. Repéré à <https://doi.org/10.2307/1931468>
- ASHRAE. (2014). *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. (2015). *ASHRAE Handbook - HVAC Applications (SI Edition)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). Repéré à <http://app.knovel.com/mlink/toc/id:kashrae-hdbk>
- ASHRAE. (2019). *2019 ASHRAE handbook : heating, ventilating, and air-conditioning applications - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (SI edition éd.)* [Version WorldCat]. Atlanta, GA: ASHRAE Atlanta, GA. Repéré à <http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kashrae-hdbk>
- ASHRAE. (2021a). *ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). Repéré à <https://app.knovel.com/mlink/toc/id:kashrae-hdbk-fundamentals>
- ASHRAE. (2021b). *Climatic Data for Building Design Standards*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). Repéré à <https://app.knovel.com/mlink/toc/id:kashrae-hdbk-fundamentals>
- Bakker, J., Bot, G., Challa, H., & Van de Braak, N. (1995). *Greenhouse climate control: an integrated approach*. Wageningen Academic Publishers. Repéré à <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-501-7>
- Bartok, J. W. (2001). *Energy conservation for commercial greenhouses* (2001 rev éd.). Ithaca, N.Y.: Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service Ithaca, N.Y. Repéré à <https://ecommons.cornell.edu/bitstreams/94296529-4b0f-458f-ad91-f3a5cce811f5/download>

Baumbauer. (2019). *Extending cool season production of vegetables in the high tunnel: balancing heat and light* (Montana State University, Bozeman, Montana, USA). Repéré à <https://www.proquest.com/docview/304523513>

Baumbauer, D. A., Schmidt, C. B., & Burgess, M. H. (2019). Leaf lettuce yield is more sensitive to low daily light integral than kale and spinach. *HortScience*, 54(12), 2159-2162. doi: 10.21273/HORTSCI14288-19. Repéré à <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14288-19>

Beaulac, A., Lalonde, T., Haillot, D., & Monfet, D. (2024). Energy modeling, calibration, and validation of a small-scale greenhouse using TRNSYS. *Applied Thermal Engineering*, 248, 123195. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123195. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431124008639>

Beaulac, A., Monfet, D., & Haillot, D. (2023). *Revue de la modélisation énergétique de serres avec TRNSYS* présentée à 31ème Congrès Francais de Thermique. Repéré à <https://doi.org/10.25855/SFT2023-064>

Beck, E. H., Heim, R., & Hansen, J. (2004). Plant resistance to cold stress: Mechanisms and environmental signals triggering frost hardening and dehardening. *Journal of Biosciences*, 29(4), 449-459. doi: 10.1007/BF02712118. Repéré à <https://doi.org/10.1007/BF02712118>

Belkadi, A., Mezghani, D., & Mami, A. (2019). Energy Design and Optimization of a Greenhouse: A Heating, Cooling and Lighting Study. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(3). Repéré à <https://doi.org/10.48084/etasr.2787>

Bendimerad, S., Mahdjoub, T., Bibi-Triki, N., Bessenoussi, M., Draoui, B., Nakoul, Z., & Khelladi, S. (2013). Modélisation, caractérisation, simulation et interprétation du comportement thermique de la paroi à inertie faible d'une serre tunnel expérimentale à l'aide du quotient de Bibi CB (.). *Revue des Energies Renouvelables*, 16(1), 143-157. Repéré à <https://asjp.cerist.dz/en/downArticle/401/16/1/121016>

Berroug, F., El Omari, M., El Qarnia, H., & Faraji, M. (2011). Effet de la géométrie sur la performance thermique d'une serre agricole. *Journal of Renewable Energies*, 14(2), 249-266. Repéré à <https://doi.org/10.54966/jreen.v14i2.257>

- Bierhuizen, J., Ebbens, J., & Koomen, N. (1973). Effects of temperature and radiation on lettuce growing. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 21(2), 110-116. doi: 10.18174/njas.v21i2.17254. Repéré à <https://doi.org/10.18174/njas.v21i2.17254>
- Boiral, O., Talbot, D., Guillaumie, L., & Brotherton, M.-C. (2024). *La prise en compte des risques ESG dans les entreprises agroalimentaires québécoises*. CIRANO. Repéré à <https://cirano.qc.ca/fr/sommaries/2024RP-08>
- Bootsma, A. (1994). Long term (100 yr) climatic trends for agriculture at selected locations in Canada. *Climatic Change*, 26(1), 65-88. doi: 10.1007/BF01094009. Repéré à <https://doi.org/10.1007/BF01094009>
- Canada, G. d. (2024a). *Aperçu statistique de l'industrie canadienne de l'horticulture ornementale*, 2023. Repéré à <https://agriculture.canada.ca/fr/secteur/horticulture/rapports/apercu-statistique-industrie-canadienne-lhorticulture-ornementale-2023>.
- Canada, G. d. (2024b). *Aperçu statistique de l'industrie canadienne des légumes de serre et des champignons*, 2023. Repéré à <https://agriculture.canada.ca/fr/secteur/horticulture/rapports/apercu-statistique-industrie-canadienne-legumes-serre-champignons-2023>.
- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management*. Cabi. doi: 10.1079/9781780641034.0000. Repéré à <https://doi.org/10.1079/9781780641034.0000>
- Castilla, N., & Montero, J. I. (2008). *Environmental control and crop production in mediterranean greenhouses* présentée à International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions, Tucson, AZ, USA. doi: 10.17660/ActaHortic.2008.797.1. Repéré à <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.797.1>
- Çaylı, A., & Baytorun, A. (2021). Analysis of climate and vapor pressure deficit (VPD) in a heated multi-span plastic greenhouse. *JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences*, 31(6). doi: 10.36899/JAPS.2021.6.0367. Repéré à <https://doi.org/10.36899/JAPS.2021.6.0367>

Centre D'innovation Sociale En Agriculture [CISA]. (2024). PolarHarvest – Research, action and information on circumpolar agriculture. Repéré le 10-02-2024 à <https://www.polarharvest.com/en/>

Chen, C., Ling, H., Zhai, Z., Li, Y., Yang, F., Han, F., & Wei, S. (2018). Thermal performance of an active-passive ventilation wall with phase change material in solar greenhouses. *Applied Energy*, 216, 602-612. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.130. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918302617>

Chen, J., Zhao, J., Xu, F., Hu, H., Ai, Q., & Yang, J. (2015). Modeling of Energy Demand in the Greenhouse Using PSO-GA Hybrid Algorithms. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), 871075. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1155/2015/871075>

Chen, S., Wang, Y., Tang, S., Zhao, Y., Xu, B., & Zhang, C. (2023). New Wind and Pressure-resistant Structural Design and Static Simulation Analysis of Continuous Greenhouse. *Journal of Physics: Conference Series*, 2660(1), 012019. doi: 10.1088/1742-6596/2660/1/012019. Repéré à <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2660/1/012019>

Chidiac, J. (2016). *Photosynthesis in Lettuce: A Review*. doi: 10.13140/RG.2.1.3640.3605. Repéré à <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3640.3605>

Choab, N., Allouhi, A., Maakoul, A. E., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2021). Effect of Greenhouse Design Parameters on the Heating and Cooling Requirement of Greenhouses in Moroccan Climatic Conditions. *IEEE Access*, 9, 2986-3003. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047851. Repéré à <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047851>

CISA, Hugo Valls Fox, Sam Chauvette, Audrey Roy, Charlotte Giard-Laliberté, Mégane Lelier, M. T., . . . Desrosiers, M. (2024). *Les serres nordiques : état des connaissances et perspectives d'innovation pour décarboner les systèmes alimentaires nordiques*. Centred'innovation sociale en agriculture, Cégep de Victoriaville. Repéré à <https://www.cisainnovation.com/upload/downloadable-files/677d4a6993648.pdf>

Collard, L., & Carrier, C. (2020). La serriculture québécoise : concilier énergie et environnement. Dans CRIBIQ (Éd.), *La serriculture québécoise : défis, enjeux et opportunités*. Repéré à https://cribiq.qc.ca/content/file/la-serriculture-qu--b--coise_pr-presentation.pdf

Costantino, A., Comba, L., Sicardi, G., Bariani, M., & Fabrizio, E. (2021). Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy*, 288, 116583. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116583. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921001288>

CRAAQ. (2024). Énergie - Coûts des sources d'énergie - 2024. In Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (Éd.), *Références économiques*.

Craver, J. K., & Lopez, R. G. (2016). Control of Morphology by Manipulating Light Quality and Daily Light Integral Using LEDs. Dans T. Kozai, K. Fujiwara & E. S. Runkle (Éds.), *LED Lighting for Urban Agriculture* (pp. 203-217). Singapore: Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-10-1848-0_15. Repéré à https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_15

Crawley, D., Pedersen, C., Lawrie, L., & Winkelmann, F. (2000). EnergyPlus: Energy Simulation Program. *Ashrae Journal*, 42, 49-56.

Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661-673. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>

Cui, J., Song, S., Yu, J., & Liu, H. (2021). Effect of daily light integral on cucumber plug seedlings in artificial light plant factory. *Horticulturae*, 7(6), 139. Repéré à <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060139>

Davis, N. (1972). The variability of the onset of spring in Britain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98(418), 763-777. Repéré à <https://doi.org/10.1002/qj.49709841805>

de Koning, A. N. M. (1988). The effect of different day/night temperature regimes on growth, development and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 63(3), 465-471. doi: 10.1080/14620316.1988.11515880. Repéré à <https://doi.org/10.1080/14620316.1988.11515880>

De Visser, P., Buck-Sorlin, G., Van Der Heijden, G., & Marcelis, L. (2012). *A 3D model of illumination, light distribution and crop photosynthesis to simulate lighting strategies in greenhouses* présentée à VII International Symposium on Light in Horticultural Systems 956. Repéré à <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.20>

- Dorr, E., Goldstein, B., Horvath, A., Aubry, C., & Gabrielle, B. (2021). Environmental impacts and resource use of urban agriculture: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 16(9), 093002. doi: 10.1088/1748-9326/ac1a39. Repéré à <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac1a39>
- Doyon, M., Élie-Leonard, J., & Arsenault-Hétu, C. (2020). La sécurisation alimentaire en milieu rural: le cas de trois initiatives agricoles innovantes. *Revue Organisations & territoires*, 29(2), 105-115. Repéré à <https://doi.org/10.1522/revueot.v29n2.1154>
- Edey, S. (1977). *Growing degree-days and crop production in Canada*. Government of Canada Repéré à <https://archive.org/details/growingdegreeday00cana>.
- Engler, N., & Krarti, M. (2021). Review of energy efficiency in controlled environment agriculture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110786. doi: 10.1016/j.rser.2021.110786. Repéré à <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110786>
- Erwin, J. E., Heins, R. D., & Karlsson, M. G. (1989). Thermomorphogenesis in *Lilium longiflorum*. *American Journal of Botany*, 76(1), 47-52. Repéré à <https://doi.org/10.2307/2444772>
- Esmaeli, H., & Rosshandel, R. (2020). Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions. *Renewable Energy*, 145, 1255-1265. doi: 10.1016/j.renene.2019.06.090. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119309292>
- Fang, S.-L., Kuo, Y.-H., Kang, L., Chen, C.-C., Hsieh, C.-Y., Yao, M.-H., & Kuo, B.-J. (2022). Using Sigmoid Growth Models to Simulate Greenhouse Tomato Growth and Development. *Horticulturae*, 8(11), 1021. Repéré à <https://www.mdpi.com/2311-7524/8/11/1021>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (1988). *Cultures protégées en climat méditerranéen*. Rome, Italy: FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Frantz, J. M., Ritchie, G., Cometti, N. N., Robinson, J., & Bugbee, B. (2004). Exploring the limits of crop productivity: beyond the limits of tipburn in lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 129(3), 331-338. doi: 10.21273/JASHS.129.3.0331. Repéré à <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15776542/>

Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A. K., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3), 193-212.

Gailloux, C., McClintock, N., Van Neste, S., Raymond, J., Barnabé, F., Beaulac, A., . . . Flory-Célini, C. (2023). CommunSerre: Enjeux sociaux et techniques des serres communautaires urbaines dans les quartiers défavorisés-Une boîte à outils pour praticien. ne. s et décideur. se. s. Repéré à <https://www.communoserre.info/boiteaoutils.html>

Gent, M. P. (2017). *Factors Affecting Relative Growth Rate of Lettuce and Spinach* présentée à 2017 ASHS Annual Conference. doi: 10.21273/HORTSCI12477-17. Repéré à <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12477-17>

Glenn, E. P., Cardran, P., & Thompson, T. L. (1984). Seasonal effects of shading on growth of greenhouse lettuce and spinach. *Scientia Horticulturae*, 24(3), 231-239. doi: 10.1016/0304-4238(84)90106-7. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304423884901067>

Golzar, F., Heeren, N., Hellweg, S., & Roshandel, R. (2018). A novel integrated framework to evaluate greenhouse energy demand and crop yield production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 487-501. doi: 10.1016/j.rser.2018.06.046. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118304829>

Gouvernement du Québec. (2007). Grand dictionnaire terminologique. Dans *Office québécois de la langue française*. Repéré à <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8350303/indicateur-cle-de-performance#en>

Gouvernement du Québec. (2012). GÉOTHERMIE. Repéré à https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/agroalimentaire_agricole/16-G%C3%A9othermie.pdf

Gouvernement du Québec. (2022a). *Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec*. Repéré à <https://statistique.quebec.ca/fr/document/profil-sectoriel-de-lindustrie-bioalimentaire-au-quebec>.

Gouvernement du Québec. (2022b). Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec. Repéré sur Ressources naturelles et Forêts à

https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/FE_zones_vegetation_bioclimatiques_MR_NF.pdf

Gouvernement du Québec. (2023). Culture des fruits et légumes de serre (serriculture). Repéré sur Agriculture, environnement et ressources naturelles à <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles/culture-fruits-legumes-serre-serriculture>

Gouvernement du Québec. (2024). *PORTRAIT ÉNERGÉTIQUE ET TECHNOLOGIQUE DES SERRES DU QUÉBEC*. Développement des secteurs agroalimentaires (DDSA), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

Gouvernement du Québec. (2025). Grand dictionnaire terminologique. Dans *Office québécois de la langue française*. Repéré à <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/2096859/simulation>

Gouvernement du Canada. (2024). Engineering Climate Datasets. Repéré le 06.05.2025 sur Engineering Climate Datasets à https://climat.meteo.gc.ca/prods_servs/engineering_f.html

Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador. (2021). *Lettuce (Field)*. Gouvernement of Newfoundland and Labrador Repéré à <https://www.gov.nl.ca/ffa/files/FFA-Crop-Guide-Lettuce.pdf>

Gouvernement du Québec. (2020). Mise à jour — tout le Québec s'investit — Québec veut doubler le volume de culture en serre d'ici 5 ANS. Repéré à <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/tout-le-quebec-sinvestit-quebec-veut-doubler-le-volume-de-culture-en-serre-dici-5-ans>

Graamans, L., Baeza, E., van den Doppelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31-43. doi: 10.1016/j.agsy.2017.11.003. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X17307151>

Grahn, C. M., Hellier, B., Benedict, C., & Miles, C. (2015). Screening USDA lettuce (*Lactuca sativa* L.) germplasm for ability to germinate under cold conditions. *HortScience*, 50(8), 1155-1159. Repéré à <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1155>

Grimenes, A. A., & Thue-Hansen, V. (2019). Photosynthetic active radiation (PAR) in the Nordic countries and the relative flux density method. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1-2), 911-916. doi: 10.1007/s00704-019-02869-x. Repéré à <https://www.proquest.com/scholarly-journals/photosynthetic-active-radiation-par-nordic/docview/2217913245/se-2?accountid=27231>

Grimstad, S. O., & Frimanslund, E. (1993). Effect of different day and night temperature regimes on greenhouse cucumber young plant production, flower bud formation and early yield. *Scientia Horticulturae*, 53(3), 191-204. doi: 10.1016/0304-4238(93)90067-Z. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030442389390067Z>

Gupta, D., Tiwari, K., & Santosh, D. (2019). Thermal Modeling of an Empty Greenhouse for Subtropics. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 753-763. doi: 10.20546/ijcmas.2019.811.089. Repéré à <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.811.089>

Haillot, D., Coudret, S., Baulac, A., Laliberté, C. G., & Monfet, D. (2023). Controlled environment agriculture spaces: experimental measurements challenges. doi: 10.17118/11143/20937. Repéré à <http://dx.doi.org/10.17118/11143/20937>

Hand, D. W. (1988). Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. 229, 143-158. Repéré à <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1988.229.12>

Harbick, K., & Albright, L. D. (2016). Comparison of energy consumption: greenhouses and plant factories. *ActaHortic*, 1134, 285-292. doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1134.38. Repéré à <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.38>

Hatfield, J., & Prueger, J. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 7. doi: 10.1016/j.wace.2015.08.001. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

Heuvelink, E. (1989). Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 38(1), 11-22. doi: 10.1016/0304-4238(89)90015-0. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304423889900150>

- Hydro-Québec. (2025). Option d'électricité additionnelle pour l'éclairage de photosynthèse ou le chauffage des espaces destinés à la culture de végétaux. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/tarifs/option-electricite-additionnelle-vegetaux.html>
- Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorrow, G., & Denzer, A. (2020). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109480. doi: 10.1016/j.rser.2019.109480. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119306884>
- Inoue, T., Sunaga, M., Ito, M., Yuchen, Q., Matsushima, Y., Sakoda, K., & Yamori, W. (2021). Minimizing VPD fluctuations maintains higher stomatal conductance and photosynthesis, resulting in improvement of plant growth in lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 12, 646144. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2021.646144>
- Islam, M. S., & Morison, J. I. L. (1992). Influence of solar radiation and temperature on irrigated rice grain yield in Bangladesh. *Field Crops Research*, 30(1), 13-28. doi: 10.1016/0378-4290(92)90053-C. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037842909290053C>
- Jiao, X.-C., Song, X.-M., Zhang, D.-L., Du, Q.-J., & Li, J.-M. (2019). Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. *Scientific Reports*, 9(1), 8700. doi: 10.1038/s41598-019-45232-w. Repéré à <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45232-w>
- Joubert, D., Zhang, N., Berman, S. R., Kaiser, E., Molenaar, J., & Stigter, J. (2023). A small dynamic leaf-level model predicting photosynthesis in greenhouse tomatoes. *Plos one*, 18(3), e0275047. doi: 10.1371/journal.pone.0275047. Repéré à <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0275047>
- Kahlen, K., & Stützel, H. (2011). Modelling photo-modulated internode elongation in growing glasshouse cucumber canopies. *New Phytologist*, 190(3), 697-708. Repéré à <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03617.x>
- Kaur, A., Sonawane, V., & Rosha, P. (2023). Energy Efficiency Optimization Strategies for Greenhouse-based Crop Cultivation: A Review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 102(3), 1051-1065. doi: 10.1002/cjce.25131. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1002/cjce.25131>

- Kesik, T., & Stern, L. (2007). *Representation of performance indicators for the conceptual design of passive solar houses* présentée à 5th national conference of IBPSA-Canada. Repéré à https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=esim2008_049_056
- Klein, S. A., Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2017). TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program. Madison, USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin. Repéré à <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- Lalonde, T. (2022). *Développement d'un modèle calibré pour la simulation énergétique de serres et analyse des résultats à l'aide d'indicateurs de performance* (École de technologie supérieure). Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2963>
- Lalonde, T., Monfet, D., & Haillot, D. (2022). Heating a Greenhouse with Data Centre Waste Heat. *Substance ÉTS*. Repéré à <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/26232>
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer Science & Business Media. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-05214-3>
- Lebre, B., Silva, P. D., Pires, L. C., & Gaspar, P. D. (2021). Computational Modeling of the Thermal Behavior of a Greenhouse. *Applied Sciences*, 11(24), 11816. Repéré à <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/24/11816>
- Lee, H. B., Lee, J. H., An, S. K., Park, J. H., & Kim, K. S. (2019). Growth characteristics and flowering initiation of Phalaenopsis Queen Beer 'Mantefon' as affected by the daily light integral. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60(5), 637-645. doi: 10.1007/s13580-019-00156-2. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00156-2>
- Lee, S.-y., Lee, I.-b., Lee, S.-n., Yeo, U.-h., Kim, J.-g., Kim, R.-w., & Decano-Valentin, C. (2021). Dynamic Energy Exchange Modelling for a Plastic-Covered Multi-Span Greenhouse Utilizing a Thermal Effluent from Power Plant. *Agronomy*, 11(8), 1461. Repéré à <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/8/1461>
- Linderholm, H. W. (2006). Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137(1), 1-14. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.03.006. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192306000931>

- Liu, B. (1999). *Photothermal ratio: relating plant growth and development to the ratio of light and temperature.* Michigan State University. Repéré à <https://doi.org/doi:10.25335/arzk-w290>
- Liu, Y., Liu, X., Chai, Y., Yang, L., Wei, W., Gu, J., & Kang, H. (2022). Experimental study on indoor environmental factors of double film solar greenhouse and traditional Chinese greenhouse in cold region. *Energy Exploration & Exploitation*, 40(6), 1760-1787. doi: 10.1177/01445987221098099. Repéré à <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/01445987221098099>
- Maheux, T., Gibout, S., Monfet, D., & Haillot, D. (2023). Modélisation d'une serre couplée à un système de stockage thermique : développement d'un modèle et étude de validité. Dans *31ème Congrès de la SFT - Thermique et Agroressources*. Société Française de Thermique. doi: 10.25855/sft2023-038. Repéré à <https://univ-pau.hal.science/hal-04193625>
- Manrique, L. A. (1993). Greenhouse crops: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 16(12), 2411-2477. doi: 10.1080/01904169309364697. Repéré à <https://doi.org/10.1080/01904169309364697>
- McCartney, L., & Lefsrud, M. (2018). Protected Agriculture in Extreme Environments: A Review of Controlled Environment Agriculture in Tropical, Arid, Polar, and Urban Locations. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(2), 455-473. doi: 10.13031/aea.12590. Repéré à <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=48871&t=3>
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 291-300. doi: 10.1016/S0168-1923(97)00027-0. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192397000270>
- Moe, R., Grimstad, S. O., & Gislerod, H. (2005). The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in Norway. *ActaHortic*, 711, 35-42. doi: 10.17660/ActaHortic.2006.711.2. Repéré à <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.2>
- Monfet, D., Haillot, D., Sylvain, W., & Caouette, C. (2024). Chauffage d'une serre - Comment calculer la consommation mensuelle d'énergie - Guide méthodologique et outil de calcul Excel (pp. 25): (CRAAQ | Le Centre De Référence En Agriculture Et Agroalimentaire Du Québec, n.d.).

Mosey, G., & Supple, L. (2020). *Renewable Energy for Heat & Power Generation and Energy Storage in Greenhouses*. National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, USA. Repéré à <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80382.pdf>

Mundler, P., & Ouellet, F. (2017). Qui est agriculteur au Québec ? Ambiguïté des institutions et enjeux pour le développement rural. *Cahiers de géographie du Québec*, 61(172), 9-32. doi: 10.7202/1042713ar. Repéré à <https://id.erudit.org/iderudit/1042713ar>

Myster, J., & Moe, R. (1995). Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops—a mini review. *Scientia Horticulturae*, 62(4), 205-215. doi: 10.1016/0304-4238(95)00783-P. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030442389500783P>

Niu, G., Heins, R. D., Cameron, A. C., & Carlson, W. H. (2001). Day and night temperatures, daily light integral, and CO₂ enrichment affect growth and flower development of Campanula carpatica ‘Blue Clips’. *Scientia Horticulturae*, 87(1), 93-105. doi: 10.1016/S0304-4238(00)00164-3. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423800001643>

Ouazzani Chahidi, L., Fossa, M., Priarone, A., & Mechaqrane, A. (2021). Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate – A case study. *Applied Energy*, 282, 116156. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116156. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920315646>

Peet, M. M. (1999). GREENHOUSE CROP STRESS MANAGEMENT. Dans (481 éd., pp. 643-654). International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. doi: 10.17660/ActaHortic.1999.481.77. Repéré à <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1999.481.77>

Pelletier, F., & Godbout, S. (2017). Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre en production sérrique au Québec. *Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement. Québec, Projet IRDA, 400023, 36.* Repéré à <https://www.serres.quebec/wp-content/uploads/progexia-files-list/energie-environnement/efficacite-energetique/Rapport-Consommation-energetique-et-reductions-des-emissions-de-GES-a-lhorizon-2020.pdf>

- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Hakala, K., & Ojanen, H. (2009). Climate change and prolongation of growing season: changes in regional potential for field crop production in Finland. *Agricultural and Food Science* doi: 10.2137/145960609790059479. Repéré à <http://dx.doi.org/10.2137/145960609790059479>
- Pereira, J., Mouazen, A. M., Foo, M., & Ahmed, H. (2021). A framework of artificial light management for optimal plant development for smart greenhouse application. *Plos one*, 16(12), e0261281. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0261281>
- Peuportier, B. (2015). *Énergétique des bâtiments et simulation thermique : [modèles, mise en oeuvre, études de cas]*. Paris: Eyrolles.
- Piché, P. (2021). *Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire* (Université de Pau et des Pays de l'Adour). (2021PAUU3013). Repéré à <https://theses.hal.science/tel-03368948>
- Plantmaps. (2024). Canada (CA) Koppen-Geiger Climate Classification Map. Repéré le 10-21 à <https://plantmaps.com>
- Quang, P., Nha, D., Hang, N., Phuoc, L., & Xuan, N. (2024). *Effects of Accumulated Growing Degree Days (GDDs) on Sesame (Sesamum indicum) Growth and Yield under Greenhouse Condition in the Mekong Delta, Vietnam* présentée à IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. doi: 10.1088/1755-1315/1306/1/012012. Repéré à <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1306/1/012012>
- Québec, B. d. l. i. d. (2023). *Analyse sectorielle pilote Culture en serre*. Repéré à https://lebarometre.ca/wp-content/uploads/2023/09/Rapport-sectoriel-Culture_en_serre.pdf.
- Radio-Canada. (2021). *Info, Radio-Canada*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1836553/agriculture-serres-environnement-changement-climatique>
- Rasheed, A., Kwak, C. S., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2020). Building Energy an Simulation Model for Analyzing Energy Saving Options of Multi-Span Greenhouses. *Applied Sciences*, 10(19), 6884. Repéré à <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/19/6884>

Rasheed, A., Lee, J., & Lee, H. (2018). Development and optimization of a building energy simulation model to study the effect of greenhouse design parameters. *Energies*, 11(8), 19. doi: 10.3390/en11082001. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3390/en11082001>

Risoud, B. (2009). Quels indicateurs pour le diagnostic énergétique en agriculture dans le cadre du plan de performance énergétique ? *Sciences Eaux & Territoires*, (59-60 Ingénieries-EAT), 105-118. Repéré à <https://revue-set.fr/article/view/6296>

Robeson, S. M. (2002). Increasing Growing-Season Length in Illinois during the 20th Century. *Climatic Change*, 52(1), 219-238. doi: 10.1023/A:1013088011223. Repéré à <https://doi.org/10.1023/A:1013088011223>

Roy, J. C., Fatnassi, H., Boulard, T., Pouillard, J. B., & Grisey, A. (2017). CFD determination of the climate distribution in a semi closed greenhouse with air cooling. *ActaHortic*, 1170, 103-110. doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.11. Repéré à <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.11>

Rubanga, D. P., Hatanaka, K., & Shimada, S. (2018). Spatiotemporal Analysis of Small Scale Greenhouse Microclimate Based on Smart Agriculture System. *AGROFOR*, 3(3). doi: 0.7251/AGRENG1803056P. Repéré à <http://dx.doi.org/10.7251/AGRENG1803056P>

Sato, S., Peet, M., & Thomas, J. (2000). Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress. *Plant, Cell & Environment*, 23(7), 719-726. doi: 10.1046/j.1365-3040.2000.00589.x. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00589.x>

Seager, R., Hooks, A., Williams, A. P., Cook, B., Nakamura, J., & Henderson, N. (2015). Climatology, Variability, and Trends in the U.S. Vapor Pressure Deficit, an Important Fire-Related Meteorological Quantity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(6), 1121-1141. doi: 10.1175/JAMC-D-14-0321.1. Repéré à <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/54/6/jamc-d-14-0321.1.xml>

Simple, L., Cariveau, R., & Ting, D. S. K. (2017). A techno-economic analysis of seasonal thermal energy storage for greenhouse applications. *Energy and Buildings*, 154, 175-187. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.065. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817311118>

Shakir, S. M., & Farhan, A. A. (2019). Movable thermal screen for saving energy inside the greenhouse. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 26(1),

- 106-112. doi: 10.33261/jaaru.2019.26.1.014. Repéré à <http://dx.doi.org/10.33261/jaaru.2019.26.1.014>
- Shen, Y., Wei, R., & Xu, L. (2018). Energy consumption prediction of a greenhouse and optimization of daily average temperature. *Energies*, 11(1), 65. doi: 10.3390/en11010065. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3390/en11010065>
- Skaggs, R. H., & Baker, D. G. (1985). Fluctuations in the length of the growing season in Minnesota. *Climatic Change*, 7(4), 403-414. doi: 10.1007/BF00139055. Repéré à <https://doi.org/10.1007/BF00139055>
- Snyder, R., & Melo-Abreu, J. (2005). *Frost protection: fundamentals, practice and economics*, Vol. I. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Repéré à <https://www.fao.org/4/y7223e/y7223e00.pdf>
- Steeman, H. J., Janssens, A., Carmeliet, J., & De Paepe, M. (2009). Modelling indoor air and hygrothermal wall interaction in building simulation: Comparison between CFD and a well-mixed zonal model. *Building and Environment*, 44(3), 572-583. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.05.002. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132308000991>
- Swan, J., Schneider, E., Moncrief, J., Paulson, W., & Peterson, A. (1987). Estimating corn growth, yield, and grain moisture from air growing degree days and residue Cover1. *Agronomy Journal*, 79(1), 53-60.
- Talbot, M.-H., Lalonde, T., Beaulac, A., Haillet, D., & Monfet, D. (2022). *Comparing the energy performance of different controlled environment agriculture spaces using TRNSYS* présentée à Proceedings of eSim 2022: 12th conference of IBPSA-Canada. Repéré à https://publications.ibpsa.org/publications/esim/2022/papers/esim2022_208.pdf
- Talbot, M.-H., & 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. doi: 10.1080/23744731.2020.1806594. Repéré à <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1806594>
- Tiwari, G. (2003). *Greenhouse technology for controlled environment*. Harrow, UK: Alpha Science Int'l Ltd.

Torres, A. P., & Lopez, R. G. (2011). Commercial greenhouse production. *Measuring Daily Light Integral in a Greenhouse*. West Lafayette, IN: Purdue Extension. Repéré à <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ho/ho-238-w.pdf>

Tschurr, F., Kirchgessner, N., Hund, A., Kronenberg, L., Anderegg, J., Walter, A., & Roth, L. (2023). Frost Damage Index: The Antipode of Growing Degree Days. *Plant Phenomics*, 5, 0104. doi: doi:10.34133/plantphenomics.0104. Repéré à <https://spj.science.org/doi/abs/10.34133/plantphenomics.0104>

Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., & Tao, Y. (2023). *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Elsevier.

Tulva, I., Välbe, M., & Merilo, E. (2023). Plants lacking OST1 show conditional stomatal closure and wildtype-like growth sensitivity at high VPD. *Physiologia Plantarum*, 175(5), e14030. doi: 10.1111/ppl.14030. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ppl.14030>

Vadiee, A., & Martin, V. (2014). Energy management strategies for commercial greenhouses. *Applied Energy*, 114, 880-888. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.089. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913007332>

Van Iersel, M. W., Dove, S., Kang, J.-G., & Burnett, S. E. (2010). Growth and water use of petunia as affected by substrate water content and daily light integral. *HortScience*, 45(2), 277-282. doi: 10.21273/HORTSCI.45.2.277. Repéré à <http://dx.doi.org/10.21273/HORTSCI.45.2.277>

Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., van Henten, E. J., & 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. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511011000948>

Venkatramanan, V., & Singh, S. (2009). Differential effects of day and night temperatures on growth of wheat crop. *Annals of Agricultural Research*, 30(1&2). Repéré à <https://epubs.icar.org.in/index.php/AAR/article/view/42483/18926>

von Zabeltitz, C. (2011). Greenhouse Structures. Dans *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate*

- Control* (pp. 59-135). Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-14582-7_5. Repéré à https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7_5
- Walther, A., & Linderholm, H. W. (2006). A comparison of growing season indices for the Greater Baltic Area. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 107-118. doi: 10.1007/s00484-006-0048-5. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0048-5>
- Wang, J.-Y. (1963). Agricultural meteorology. Repéré à <https://archive.org/details/agriculturalmete00wang>
- Wang, L., Ning, S., Zheng, W., Guo, J., Li, Y., Li, Y., . . . Wei, X. (2023). Performance analysis of two typical greenhouse lettuce production systems: commercial hydroponic production and traditional soil cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1165856. doi: 10.3389/fpls.2023.1165856. Repéré à <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2023.1165856>
- Ward, R., Choudhary, R., Cundy, C., Johnson, G., & McRobie, A. (2015). *Simulation of plants in buildings; incorporating plant-Air interactions in building energy simulation* présentée à Proc. 14th Intern Conf IBPSA-Building Simulation. Repéré à https://publications.ibpsa.org/proceedings/bs/2015/papers/bs2015_2219.pdf
- Weidner, T., Yang, A., & Hamm, M. W. (2021). Energy optimisation of plant factories and greenhouses for different climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 243, 114336. doi: 10.1016/j.enconman.2021.114336. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421005124>
- Worthington, C. M., & Hutchinson, C. M. (2005). Accumulated growing degree days as a model to determine key developmental stages and evaluate yield and quality of potato in Northeast Florida. Dans *Proceedings of the Florida state horticultural society* (Vol. 118, pp. 98-101). Repéré à <https://journals.flvc.org/fshs/article/download/85974/82890/0>
- Xu, D., Ren, L., & Zhang, X. (2023). Predicting Multidimensional Environmental Factor Trends in Greenhouse Microclimates Using a Hybrid Ensemble Approach. *Journal of Sensors*, 2023(1), 6486940. doi: 10.1155/2023/6486940. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2023/6486940>

Xu, R., Dai, J., Luo, W., Yin, X., Li, Y., Tai, X., . . . Diao, M. (2010). A photothermal model of leaf area index for greenhouse crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 541-552. doi: 10.1016/j.agrformet.2010.01.019. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192310000420>

Xu, Z., Chen, J., Zhang, Q., & Gu, Y. (2016). Dynamic mechanistic modeling of air temperature and humidity in the greenhouses with on-off actuators. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 14(2a), 248-256. Repéré à <http://dx.doi.org/10.12928/telkomnika.v14i2A.4368>

Yan, Z., He, D., Niu, G., Zhou, Q., & Qu, Y. (2019). Growth, Nutritional Quality, and Energy Use Efficiency of Hydroponic Lettuce as Influenced by Daily Light Integrals Exposed to White versus White Plus Red Light-emitting Diodes. *HortScience horts*, 54(10), 1737-1744. doi: 10.21273/hortsci14236-19. Repéré à <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/54/10/article-p1737.xml>

Yang, Q., Liu, L., Zhou, J., Rogers, M., & Jin, Z. (2024). Predicting the growth trajectory and yield of greenhouse strawberries based on knowledge-guided computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 220, 108911. doi: 10.1016/j.compag.2024.108911. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169924003028>

Yang, W. X., & Wang, X. Z. (2015). Radiation and sunlight greenhouse light environment model. *Applied Mechanics and Materials*, 716, 479-483. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.716-717.479

Yeo, U.-H., Lee, S.-Y., Park, S.-J., Kim, J.-G., Choi, Y.-B., Kim, R.-W., . . . Lee, I.-B. (2022). Rooftop Greenhouse: (1) Design and Validation of a BES Model for a Plastic-Covered Greenhouse Considering the Tomato Crop Model and Natural Ventilation Characteristics. *Agriculture*, 12(7), 903. Repéré à <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/7/903>

Zhang, X., He, D., Niu, G., Yan, Z., & Song, J. (2018). Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 33-40. doi: 10.25165/j.ijabe.20181102.3420. Repéré à <http://dx.doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3420>

Zhang, X., Lv, J., Xie, J., Yu, J., Zhang, J., Tang, C., . . . Wang, C. (2020). Solar Radiation Allocation and Spatial Distribution in Chinese Solar Greenhouses: Model Development and Application. *Energies*, 13(5), 1108. Repéré à <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/5/1108>

Zhang, Y., Henke, M., Li, Y., Yue, X., Xu, D., Liu, X., & Li, T. (2020). High resolution 3D simulation of light climate and thermal performance of a solar greenhouse model under tomato canopy structure. *Renewable Energy*, 160, 730-745. doi: 10.1016/j.renene.2020.06.144. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120310661>

Zhou, J., Wang, J. Z., Hang, T., & Li, P. P. (2020). Photosynthetic characteristics and growth performance of lettuce (*Lactuca sativa* L.) under different light/dark cycles in mini plant factories. *Photosynthetica*, 58(3), 740-747. doi: 10.32615/ps.2020.013. Repéré à <https://doi.org/10.32615/ps.2020.013>