

Développement d'un modèle calibré pour la simulation
énergétique de serres et analyse des résultats à l'aide
d'indicateurs de performance

par

Timothé LALONDE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉNERGIES RENOUVELABLES ET
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 26 JANVIER 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Timothé Lalonde, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) 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 génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

Mme Marlène Sanjosé, présidente du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Katherine D'Avignon, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 DÉCEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

*«If you have built castles in the air, your work need not be lost; that is where they should be.
Now put the foundations under them. »*

- *Henry David Thoreau, Walden*

REMERCIEMENTS

La traversée d'une étape aussi solitaire que les études aux cycles supérieurs dans ce contexte particulier n'aurait pas été possible pour moi sans le soutien d'une myriade de personnes.

Je tiens à remercier particulièrement Danielle Monfet de m'avoir supporté depuis le baccalauréat et de m'avoir fait confiance pour la poursuite de différents projets de recherche durant mes études aux cycles supérieurs. Ton écoute, tes conseils et tes commentaires sont toujours appréciés, c'est en partie grâce à toi que j'ai été en mesure d'organiser le chaos dans mes idées. Je remercie aussi Didier Haillot, qui m'a appuyé et qui a fait cheminer mes connaissances en thermique. Tu t'es toujours montré à l'écoute et j'ai apprécié les discussions que nous avons eues sur les avenues à prendre et l'éthique en matière de gestion de l'énergie.

Je voudrais également remercier les différents partenaires de recherche que j'ai eu durant mes études, notamment les membres du CETAB+, du Quartier Nourricier, Yves, Denis et Marie-Josée de Ferme d'Hiver, les membres du CEDFOB et de la MRC de Manicouagan. Merci au RQEI, au CIRODD, au comité de sélection du CRSNG ainsi qu'au comité de sélection de l'ÉTS pour m'avoir soutenu financièrement dans mes études.

Je voudrais aussi remercier mes collègues du laboratoire de thermique et de science du bâtiment, particulièrement Marie-Hélène qui m'a guidé depuis le début de mes études aux cycles supérieurs, mais aussi Audréanne, Bruno, Gilbert, Frédéric L.-G., Frédéric C., Kim et Olivier qui m'ont apporté de l'aide ou simplement des bonnes conversations durant ce parcours.

À ces personnes qui étaient directement impliquées dans mon cheminement académique s'ajoutent aussi mes proches. Mes parents Élise et Mario, ma sœur Frédérique et mes amis qui m'ont supporté à travers les périodes glorieuses et les périodes creuses. Merci à vous tous.

Modélisation et calibration d'un modèle pour la simulation énergétique de serres et analyse des résultats à l'aide d'indicateurs de performance

Timothé LALONDE

RÉSUMÉ

En contexte québécois, la productivité des cultures en serre est limitée par l'ensoleillement et par les températures froides hivernales. La compétitivité des cultures québécoises par rapport aux importations provenant de pays où les conditions climatiques sont plus clémentes est une barrière à l'autonomie alimentaire de la société québécoise. La consommation énergétique associée au maintien des conditions de croissance optimales par les systèmes de chauffages et l'éclairage artificiel impacte particulièrement la compétitivité des cultures en serre au Québec. Le développement de modèles énergétiques de serres dans des outils de simulation thermique dynamique permet d'étudier le profil thermique des serres et d'évaluer les opportunités qui permettraient d'améliorer la performance énergétique de celles-ci.

L'objectif de ce mémoire est de développer une approche de modélisation et de calibration de serre en contexte québécois ainsi que de démontrer l'importance de l'utilisation d'indicateurs de performance appropriés pour l'analyse des résultats de ces simulations en fonction du contexte. Pour ce faire, un modèle représentant une serre en arche gothique existante a été développé sur l'outil de simulation thermique dynamique TRNSYS. Les résultats de la simulation de ce modèle de serre ont été calibrés en les comparant avec des données mesurées dans la serre pour la température et l'humidité de l'air ainsi que le rayonnement solaire. Des erreurs quadratiques moyennes de 1,83°C ($R^2 = 0,95$), 7,78% ($R^2 = 0,76$) et 60,63 $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ($R^2 = 0,89$) ont été obtenues pour la température et l'humidité de l'air intérieur, ainsi que le rayonnement photo actif à la canopée, respectivement. Ces résultats indiquent que le modèle présente une concordance adéquate entre les données mesurées et simulées. Cette conclusion est tirée en comparant ces résultats à des valeurs de références trouvées dans la littérature pour ces indicateurs statistiques dans le contexte d'une serre non-chauffée.

Cette approche de modélisation est ensuite utilisée afin de comparer les conditions de croissances dans une serre à arche gothique et dans une serre chinoise partiellement enterrée localisées à Lemieux (46,3°N 72,1°O). Les conditions de croissance sont évaluées en utilisant des indicateurs de performance appropriés au contexte d'une serre non chauffée. La durée de la saison de croissance thermique est 22 jours plus longue et les degrés-jours de croissances pour la laitue sont plus élevés dans la serre chinoise que dans la serre à arche gothique. L'éclairage naturel à la canopée est similaire dans les deux serres. En revanche, les deux serres modélisées ne disposent pas d'une capacité de ventilation suffisante pour contrer la surchauffe de la serre en été. Ceci se traduit par un indice de surchauffe élevé de 142 h et 244 h dans la serre à arche gothique et dans la serre chinoise, respectivement. La fréquence des événements de surchauffe de la serre est plus élevée dans la serre chinoise, ce qui affecte à la baisse l'indice photo-thermique pour la laitue. Ceci indique que la productivité annuelle serait moindre dans cette serre malgré les températures plus chaudes qui y sont enregistrées.

Un modèle a ensuite été réalisé pour étudier la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre (GES) de deux systèmes différents pour chauffer une serre à arche gothique située à Baie-Comeau (49,2°N 68,2°O). Les deux systèmes de chauffage comparés sont : un aérotherme au propane conventionnel et un système plus innovant pour la récupération de la chaleur fatale d'un centre de données. Le système de récupération de la chaleur permet de réduire les émissions de GES de 91% en contexte énergétique québécois. De plus, celui-ci consomme 66% moins d'énergie que l'aérotherme au propane toute source d'énergie confondue. L'appel de puissance électrique maximal du système de récupération de la chaleur fatale du centre de données est de 36,8 kW. L'éclairage artificiel de la serre à l'aide de lampes à décharge de sodium haute pression est requis pour maintenir un éclairage journalier minimal pour la culture de la laitue. Celui-ci consommerait 23 000 kWh d'électricité annuellement, soit 21,7% de la consommation énergétique annuelle de la serre équipée du système de récupération de chaleur dans le contexte de Baie-Comeau et cause un appel de puissance électrique supplémentaire de 30,9 kW.

Mots-clés : Agriculture en environnement contrôlé, serres, simulation thermique dynamique, modélisation énergétique, calibration, TRNSYS

Development of a calibrated greenhouse model for building energy performance simulations and results analysis using performance indicators

Timothé LALONDE

ABSTRACT

In Quebec, agricultural greenhouse productivity is limited by several factors such as daylight availability and cold temperatures. Competitiveness of the local production of vegetables compared to importations from warmer countries is a barrier to food autonomy in this context. Energy consumption, required to maintain optimal growth conditions of greenhouse crops through heating systems or artificial lighting have a great impact on Quebec's greenhouse sector competitiveness. Development of models using building energy performance simulation tools allows to study the thermal profile inside greenhouses and evaluate opportunities to enhance their energy efficiency.

The objective of this thesis is to present an approach for developing and calibrating a greenhouse model in Quebec and to demonstrate the importance of using adequate performance indicators to analyse the simulation results according to the context. To fulfil this objective, an existing gothic arch greenhouse was modelled in the building energy performance simulation tool TRNSYS. Simulation results of this model were calibrated by comparing them to data measured in the actual greenhouse for indoor air temperature and humidity as well as available photoactive radiation at the canopy level. The root mean square errors obtained were $1,83^{\circ}\text{C}$ ($R^2 = 0,95$), $7,78\%$ ($R^2 = 0,76$) and $60,63\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ($R^2 = 0,89$), respectively, which shows a good fit between the simulation results and the measured data in the context of unheated greenhouse model simulation. This calibration was confirmed by comparing these results to baseline values reported in the literature.

This modelling approach was then used to compare the growth conditions maintained in an unheated gothic arch greenhouse and a comparable partially buried Chinese greenhouse located in Lemieux ($46,3^{\circ}\text{N}$ $72,1^{\circ}\text{O}$). The growth conditions were evaluated using adequate performance indicators for an unheated greenhouse context. The thermal growing season was 22 days longer and the growing degree-days for lettuce cultivation were higher inside the Chinese greenhouse than in the gothic arch greenhouse. Daylight availability at the canopy was similar in both modelled greenhouses. However, the available ventilation in both the Chinese greenhouse and gothic arch greenhouse was insufficient to prevent overheating of the greenhouses. This was illustrated by the overheating index values of 244 h in the Chinese greenhouse and 142 h in the gothic arch greenhouse, respectively. The higher occurrence of overheating in the Chinese greenhouse resulted in a lower photothermal index for lettuce which indicates potentially reduced yield for lettuce cultivation despite the generally higher indoor air temperatures observed in this greenhouse.

A model was then developed to evaluate the energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions from two heating systems used to regulate air temperature inside a gothic arch greenhouse located in Baie-Comeau ($49,2^{\circ}\text{N}$ $68,2^{\circ}\text{O}$). The investigated heating systems were

a conventional propane gas unit heater and a datacenter waste heat recovery system. The use of the waste heat recovery system resulted in a 91% reduction in GHG emissions compared to the propane unit heater in Quebec. The waste heat recovery system also consumed 66% less energy (from both electricity and propane sources) for heating of the greenhouse. The maximum electrical power demand of the waste heat recovery system was 36,8 kW. Artificial lighting of the greenhouse using high pressure sodium lamps was required to maintain minimum daylight levels for lettuce cultivation throughout the season. This would consume an additional 23 000 kWh of electricity annually which represented 21,7% of the total energy consumption of the greenhouse equipped with the waste heat recovery system in Baie-Comeau. The artificial lighting of the greenhouse also led to an additional electrical power demand of 30,9 kW.

Keywords: Controlled environment agriculture, greenhouses, building energy performance simulation, thermal modelling, calibration, TRNSYS

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Culture en serre	3
1.1.1 Caractéristiques de construction	4
1.1.2 Mode d'opération.....	12
1.1.3 Températures maintenues dans la serre	16
1.2 Paramètres environnementaux et plantes.....	17
1.2.1 Température	18
1.2.2 Humidité de l'air	19
1.2.3 Rayonnement photo actif et éclairage.....	21
1.2.4 Concentration en CO ₂	28
1.3 Modélisation énergétique de serres.....	30
1.3.1 Outils de STD pour évaluer la performance énergétique de bâtiments	31
1.3.2 Bilan énergétique d'une serre	34
1.3.3 Simulation énergétique en contexte de serre	44
1.4 Indicateurs de performance.....	47
1.5 Constats.....	51
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	53
2.1 Sélection de l'outil de STD.....	53
2.2 Développement du modèle	54
2.3 Calibration du modèle.....	56
2.4 Description des études de cas	59
CHAPITRE 3 CALIBRATION D'UN MODÈLE DE SERRE	63
3.1 Description de la serre	63
3.2 Modélisation dans TRNSYS.....	64
3.2.1 Données météorologiques (étape 1).....	66
3.2.2 Enveloppe de la serre (étape 2).....	68
3.2.3 Contact avec le sol (étape 3)	74
3.2.4 Canopée (étape 4)	77
3.2.5 Systèmes CVCA de la serre (étape 5).....	83
3.2.6 Variables de sortie requises (étape 6)	85
3.3 Calibration du modèle.....	88
3.4 Discussion.....	93
CHAPITRE 4 ÉTUDES DE CAS	97
4.1 Étude de cas 1 – Comparaison de serres froides.....	97
4.1.1 Présentation de la serre chinoise partiellement enterrée	98
4.1.2 Résultats.....	103

4.1.3	Discussion	109
4.2	Étude de cas 2 – Comparaison de deux systèmes de chauffage de serre	111
4.2.1	Modélisation de la serre	111
4.2.2	Modélisation des systèmes CVCA.....	113
4.2.3	Modélisation de l'éclairage artificiel.....	119
4.2.4	Résultats de l'étude comparative, sans éclairage artificiel	120
4.2.5	Impact de l'éclairage artificiel sur la consommation énergétique	122
4.2.6	Discussion	126
CONCLUSION.....		129
RECOMMANDATIONS		133
ANNEXE I	EXEMPLE DE RÉOLUTION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN MODÈLE DE SERRE	135
ANNEXE II	VALIDATION DU COEFFICIENT DE CONVERSION POUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	141
ANNEXE III	PROPRIÉTÉS DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX DANS LES SERRES	143
ANNEXE IV	DÉTAILS DE CALCULS DE CERTAINS INDICATEURS DE PERFORMANCES.....	145
BIBLIOGRAPHIE.....		153

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Propriétés de différents matériaux d'enveloppe.....10
Tableau 1.2	Plage de températures pour différentes plantes cultivées en serre18
Tableau 1.3	Plage d'humidité relative selon le type de plante cultivé21
Tableau 1.4	Facteurs de conversions photométriques pour différentes sources lumineuses.....26
Tableau 1.5	DLI optimal selon le type de plante cultivé27
Tableau 1.6	Effet de la concentration en CO ₂ sur la productivité de plantes cultivées en serre Données tirées de Nederhoff (1994)29
Tableau 1.7	Équations empiriques simples pour les coefficients de convection en serre38
Tableau 1.8	Études récentes portant sur la simulation énergétique de serres45
Tableau 1.9	Indicateurs de performance pour l'analyse thermique de la serre.....49
Tableau 1.10	Indicateurs de performance pour l'analyse de l'éclairage dans la serre50
Tableau 2.1	Indices de fiabilité57
Tableau 2.2	Indicateurs de performance utilisés pour chaque étude de cas.....60
Tableau 3.1	Données météorologiques requises par le modèle67
Tableau 3.2	Propriétés thermiques et optiques des matériaux d'enveloppe utilisés.....69
Tableau 3.3	Coefficients de transfert de chaleur convectifs retenus en W.m ⁻² .K ⁻¹70
Tableau 3.4	Coefficients de pression du vent moyens sur une serre à arche gothique.72
Tableau 3.5	Propriétés thermiques pour différents types de sols.....76
Tableau 3.6	Vérification des modifications au modèle de laitue82
Tableau 3.7	Points de consignes pour la ventilation de la serre84
Tableau 3.8	Paramètres de la simulation de la lumière naturelle avec DaySIM.....87
Tableau 3.9	Paramètres de calibration identifiés89

Tableau 3.10	Résultats de la calibration du modèle énergétique.....	90
Tableau 4.1	Matériaux de construction des murs opaques de la serre chinoise.....	100
Tableau 4.2	Coefficients de pression du vent moyen sur la serre chinoise	101
Tableau 4.3	Comparaison d'indicateurs de performance pour les serres étudiées	108
Tableau 4.4	Température de l'air dans les salles de serveurs.....	115
Tableau 4.5	Conditions de design du système de récupération de chaleur.....	117
Tableau 4.6	Points de consigne dans la serre de Baie-Comeau	118
Tableau 4.7	Types TRNSYS additionnels utilisés dans ce modèle	119

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Rayonnement solaire capté selon l'orientation de la serre Adaptée de Rasheed et al. (2018).....	5
Figure 1.2 Transmissivité solaire selon l'angle d'incidence Adaptée de Castilla (2013).....	7
Figure 1.3 Serre à travée simple et serre à travées multiples.....	8
Figure 1.4 Conception de serres en climat froid Adaptée de Castilla (2013).....	9
Figure 1.5 Transmissivité de deux matériaux d'enveloppe de serre Adaptée de Kwon et al. (2016)	11
Figure 1.6 Systèmes de régulation de la température passifs	13
Figure 1.7 Systèmes de régulation de la température actifs	14
Figure 1.8 Spectre solaire de référence selon le standard G173-03 Adaptée du standard G173-03 de l'ASTM (2020).....	22
Figure 1.9 Distribution spectrale pour différentes sources d'éclairage artificiel Adaptée de Wei et al. (2018).....	23
Figure 1.10 Effet de la longueur d'onde sur les processus photosensibles Adaptée de Castilla (2013).....	24
Figure 1.11 Réflectance du gazon selon la longueur d'onde Adaptée de Miller (1977).....	25
Figure 1.12 Taux de photosynthèse, rayonnement incident et concentration en CO ₂ Adaptée de Castilla (2013).....	28
Figure 1.13 Évolution de l'intérêt pour la simulation énergétique des serres.....	30
Figure 1.14 Représentation des échanges thermiques et massiques.....	35
Figure 3.1 Serre froide du CETAB+	64
Figure 3.2 Représentation complète du modèle développé dans TRNSYS	65
Figure 3.3 Modèle 3D de la serre à l'étude dans SketchUP.....	68
Figure 3.4 Discrétisation du sol sous la serre (vue du mur pignon)	75

Figure 3.5	Courbe des ventilateurs à pression positive installés	83
Figure 3.6	Distribution du rayonnement solaire incident	85
Figure 3.7	Position des points de lecture pour l'analyse de l'éclairage naturel	86
Figure 3.8	Image temporelle des résultats de la calibration pour la période du 28/11 au 01/12 et la période du 31/03 au 03/04	92
Figure 4.1	Modèle 3D de la serre chinoise	99
Figure 4.2	Discrétisation du sol sous la serre chinoise (vue du mur pignon).....	102
Figure 4.3	Distribution de la température moyenne journalière dans les serres.....	103
Figure 4.4	Profil annuel de la température moyenne journalière dans les serres	104
Figure 4.5	Profil annuel de l'écart de température maximal journalier dans les serres	105
Figure 4.6	Distribution mensuelle de l'éclairage naturel journalier dans les serres .	106
Figure 4.7	Température et éclairage naturel journalier moyen mensuel dans les serres	107
Figure 4.8	Modèle 3D de la serre de Baie-Comeau	112
Figure 4.9	Serre de Baie-Comeau équipée du système de chauffage conventionnel	114
Figure 4.10	Refroidissement d'une salle de serveurs.....	115
Figure 4.11	Serre de Baie-Comeau équipée du système de récupération de chaleur .	116
Figure 4.12	Consommation énergétique mensuelle des systèmes étudiés	121
Figure 4.13	Émissions de GES des systèmes étudiés	122
Figure 4.14	Distribution mensuelle de l'éclairage naturel journalier dans la serre de Baie-Comeau	123
Figure 4.15	Facteur d'autonomie solaire dans la serre de Baie-Comeau.....	124
Figure 4.16	Consommation énergétique mensuelle du système de récupération de chaleur incluant l'éclairage par HPS	125

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AEC	Agriculture en environnement contrôlé
ASAE	American Society of Agricultural Engineers
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAH	Changements d'air par heure
CAO	Conception assistée par ordinateur
CFD	<i>Computational fluid dynamic</i> ou étude numérique de la mécanique des fluides
CO ₂	Dioxyde de carbone
CTF	<i>Conduction transfer function</i> ou fonction de transfert de conduction
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement de l'air
CVRMSE	<i>Coefficient of variance of the root mean squared error</i> ou coefficient de variance de l'erreur quadratique moyenne
DEL	Diode électroluminescente
FV	Fermes verticales
GES	Gaz à effet de serre
HPS	<i>High pressure sodium</i> ou décharge de sodium haute pression
IP	<i>Input</i> ou variable d'entrée
LAI	<i>Leaf area index</i> ou indice de croissance foliaire
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MH	<i>Metal halide</i> ou halogénure métallique
MBE	<i>Mean bias error</i> ou biais d'erreur moyenne

XX

NFRC	National Fenestration Rating Council
OP	<i>Output</i> ou variable de sortie
PAR	<i>Photoactive radiation</i> ou rayonnement photo actif
PC	Polycarbonate
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PE	Polyéthylène
PPM	Parties par millions
PVC	Polychlorure de vinyle
RMSE	<i>Root mean squared error</i> ou erreur quadratique moyenne
R^2	Coefficient de détermination
STD	Simulation thermique dynamique
OP	Variable de sortie
UV	Ultraviolet

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

α	Absorptivité [-]
β	Exposant de puissance du vent [-]
Δw	Augmentation apparente de la largeur [m]
ε	Émissivité d'une surface [-]
γ	Constante psychrométrique de l'air [Pa.K ⁻¹]
λ	Chaleur latente d'évaporation de l'eau [J.kg ⁻¹]
ρ	Densité [kg.m ⁻³]
σ	Constante de Stephan-Boltzmann [W.m ⁻² .K ⁻⁴]
τ	Transmissivité [-]
ω	Humidité absolue [kg H ₂ O.kg air sec ⁻¹]
A	Superficie [m ²]
Bi	Nombre de Biot [-]
C_f	Coefficient empirique d'un écoulement forcé [-]
CF	Couverture nuageuse du ciel [-]
C_n	Coefficient empirique d'un écoulement libre [-]
C_p	Capacité thermique spécifique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
C_v	Coefficient de pression moyen du vent [-]
d	Espace, distance entre deux corps [m]
DLI	<i>Daily light integral</i> ou intégrale de l'éclairage journalier [mol.m ⁻²]
DPV	Déficit de pression de vapeur d'eau dans l'air [kPa]
GDD	<i>Growing degree-days</i> ou degrés-jours de croissance [DJ]
e	Épaisseur [m]

E	Énergie [J]
f	Fraction [-]
F_{j-k}	Facteur de forme entre deux surfaces j et k [-]
FC_{lx}	Facteur de conversion de la luminosité au PPFD [$\mu\text{mol.lm}^{-1}$]
FC_{E_e}	Facteur de conversion de l'irradiance au PPFD [$\mu\text{mol.J}^{-1}$]
g	Accélération gravitationnelle [m.s^{-2}]
Gr	Nombre de Grashof [-]
h	Coefficient de convection [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
H	Hauteur [m]
HR	Humidité relative [%]
TCI	<i>Thermal comfort index</i> , ou indice de confort thermique [h]
k	Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
k_s	Coefficient d'extinction du rayonnement photo actif à travers la canopée [-]
L	Longueur [m]
m	Exposant empirique de l'écoulement libre [-]
\dot{m}	Débit massique [kg.s^{-1}]
M	Masse molaire [kg.mol^{-1}]
n	Exposant empirique d'un écoulement forcé [-]
Nu	Nombre de Nusselt [-]
OC	<i>Overcooling index</i> ou Indice de gel [h]
OH	<i>Overheating index</i> ou Indice de surchauffe [h]
P	Pression [Pa]

$P_{n.max}(T)$	Taux maximal de la photosynthèse à la température T [$\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
$PPFD$	Densité du flux de photons photo actifs [$\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$]
Pr	Nombre de Prandtl [-]
P_{sat}	Pression de saturation [Pa]
PTI	Indice photo-thermique [MJ.m^{-2}]
Q	Flux de chaleur [W]
q''	Densité du flux de chaleur [W.m^{-2}]
r_a	Résistance aérodynamique de la canopée [s.m^{-1}]
r_s	Résistance stomatale de la canopée [s.m^{-1}]
R	Constante universelle des gaz parfaits [$\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
Re	Nombre de Reynolds [-]
SC	Coefficient de sensibilité [-]
T	Température [K]
U	Coefficient de transmission thermique global [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}$]
UH	<i>Unmet hours</i> ou heures de points de consignes non respectés [h]
V	Vitesse du vent [m.s^{-1}]
\dot{V}	Débit volumique [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]
VP	Échange massique de vapeur d'eau [kg.s^{-1}]
Vol	Volume [m^3]
W	Coefficient d'ombrage entre les rangs de culture [-]
w	Largeur [m]
X	Concentration de la vapeur d'eau dans l'air [g.m^{-3}]
z	Position dans l'axe z d'un point [m]

LISTE DES INDICES

<i>a</i>	Propre à l'air
<i>adv</i>	Advection-convection entre deux fluides
<i>abs</i>	Absorbé
<i>atm</i>	Atmosphérique
<i>b</i>	Propre à la couche limite du vent
<i>cond</i>	Conduction à travers un corps
<i>conv</i>	Convection entre une surface et un fluide
<i>cult</i>	Propre à la surface cultivée
<i>d</i>	Causé par la différence de densité de l'air (applicable à la pression)
<i>dp</i>	Point de rosée
<i>e</i>	Extérieur
<i>émis</i>	Émis
<i>env</i>	Propre à l'enveloppe de la serre
<i>évent</i>	Propre à l'évent de la serre
<i>gly</i>	Propre à la solution de propylène glycol utilisée
<i>H₂O</i>	Propre à la vapeur d'eau ou à l'eau, selon le contexte
<i>i</i>	Intérieure
<i>j</i>	Indice pour discrétisation temporelle
<i>latent</i>	Latent
<i>g</i>	Propre au sol sous la serre
<i>LW</i>	<i>Longwave radiation</i> ou rayonnement à ondes longues
<i>m</i>	Propre à la station de mesure du vent (hauteur, valeur mesurée, etc.)

<i>morph</i>	Morphologique
<i>rang</i>	Propre aux rangs de culture dans la serre
<i>pl</i>	Propre à la canopée des plantes
<i>sky</i>	Propre à la voûte céleste
<i>sol</i>	Rayonnement solaire à ondes courtes
<i>st</i>	Stockage de chaleur
<i>sw</i>	<i>Shortwave radiation</i> ou rayonnement à ondes courtes
<i>trans</i>	Transmis
<i>v</i>	Causé par le vent (applicable à la pression)

INTRODUCTION

Au Canada, en 2020, l'agriculture en serre regroupe 3366 exploitations réparties sur une superficie totale de 26 030 281 m² dont 24,5% des exploitations et 10,1% de la superficie totale cultivée en serre se trouvent au Québec (Statistiques Canada, 2021). Récemment, l'émergence de l'agriculture en environnement contrôlé (AEC) dans des « *plant factories* » ou encore fermes verticales (FV) qui sont des espaces d'agriculture intensive sous éclairage artificiel localisés à l'intérieur de bâtiments, est observée (Kozai et al., 2015). Ce type d'exploitation est cependant rare au Québec et au Canada avec environ une douzaine d'exploitations, dont la moitié sont localisées en Ontario (JRG Consulting Group, 2020).

Dans le cas des serres comme dans les FV, les coûts de l'énergie sont parmi les plus importantes dépenses encourues par les exploitants (Eaves et Eaves, 2018). Ces coûts sont surtout associés à l'éclairage et au conditionnement de l'air dans les FV et au chauffage de l'air dans les serres (Graamans et al., 2018). Comme les marges de profits des exploitants sont minces au Québec, il est courant d'observer une saison de culture de sept mois dans les serres de moins de 50 000 m² afin de réduire les coûts de chauffage (MAPAQ, 2018). Dans les plus grandes installations commerciales, la saison est prolongée sur douze mois par l'utilisation d'éclairage artificiel et de systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA) puisque le rendement de la production justifie des coûts en énergie plus importants (MAPAQ, 2018). Au Québec, 49,2% de la superficie de culture en serre est dédiée à la tomate, 19,5% au concombre, 8,6% à la laitue, 5,5% au poivron et 12,5% à d'autres fruits et légumes, comme les fines herbes, les fraises et l'aubergine (MAPAQ, 2018).

La simulation thermique dynamique (STD) de la performance énergétique des bâtiments est fréquemment utilisée afin d'évaluer le potentiel d'économies d'énergie associées à différentes mesures d'efficacité énergétique pour différents types de bâtiment. En agriculture en environnement contrôlé, la STD peut être utilisée en considérant l'impact de l'évapotranspiration des plantes sur les conditions de l'air intérieur afin de pouvoir bien estimer la consommation énergétique associée au conditionnement de l'air dans l'espace. En serre, la

ventilation naturelle est fréquemment utilisée pour contrôler la température et l'humidité de l'air. Il importe donc de disposer de modèles énergétiques précis et calibrés pour ces deux phénomènes.

Les objectifs de recherche de ce mémoire sont de : (1) Développer un modèle pour la STD de serres en contexte québécois. (2) Procéder à la calibration du modèle développé en comparant les résultats de simulations avec des données mesurées dans la serre existante. (3) Utiliser cette approche de modélisation afin d'étudier deux différentes études de cas et analyser les résultats en utilisant des indicateurs de performance appropriés aux contextes particuliers de celles-ci.

Le corps du présent document est composé de quatre chapitres. Le premier chapitre présente la revue de la littérature disponible sur les sujets connexes à ces objectifs et présente une liste d'indicateurs de performance relevés de la littérature. Le deuxième chapitre présente la méthodologie proposée pour le développement et la calibration de modèles de serres. Le troisième chapitre présente le développement d'un modèle énergétique d'une serre réelle et la calibration du modèle par rapport à des données mesurées dans la serre. Finalement, le quatrième chapitre présente les deux études de cas effectuées à l'aide de cette méthodologie. Ces études de cas sont la comparaison des conditions de croissances dans deux serres froides et l'étude de l'efficacité énergétique d'un système de récupération de la chaleur fatale d'un centre de données pour assurer le chauffage d'une serre.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Le premier chapitre de ce mémoire détaille les concepts clés ainsi que les éléments d'importance retrouvés dans la littérature qui sont à considérer pour la création de modèles énergétiques dans le contexte de l'agriculture en serre. Les différentes méthodes de catégorisation de serres ainsi que les principales caractéristiques ayant un impact sur leur consommation énergétique sont détaillés.

1.1 Culture en serre

Les serres sont utilisées dans de multiples applications. Elles sont généralement constituées d'une structure solide et d'une enveloppe d'un matériau transparent ou translucide. Leur fonctionnement repose sur l'effet de serre. L'enveloppe est transparente au rayonnement solaire incident. Celui-ci pénètre donc la serre et est absorbée par les surfaces opaques à l'intérieur de celle-ci comme le sol, ce qui les réchauffe. Celle-ci réchauffent à leur tour l'air intérieur par convection. Ces surfaces réémettent aussi une partie de cette énergie sous forme de rayonnement à ondes longues. L'enveloppe de la serre est généralement fabriquée dans un matériau ayant une faible transmissivité au rayonnement à ondes longues, ce qui fait qu'elle l'absorbe et se réchauffe.

Les principales applications pour lesquelles les serres sont utilisées sont la production de fleurs et de légumes, le séchage de produits et la captation d'énergie solaire pour le chauffage d'un bâtiment passif (Tiwari, 2003). Les serres peuvent être catégorisées selon différentes caractéristiques, soit par leurs caractéristiques de construction, par le mode d'opération, ou par les températures maintenues dans celles-ci (Castilla, 2013; Tiwari, 2003).

1.1.1 Caractéristiques de construction

Les serres ne sont pas toutes construites selon les mêmes contraintes. Celles-ci influencent la conception de la structure de l'enveloppe ce qui a des répercussions sur la performance énergétique de la serre dans son ensemble. L'effet de différents paramètres de conception d'une serre sur la performance énergétique a fait l'objet de nombreuses études. Les principaux paramètres de conception relevés dans la littérature sont :

1. L'orientation et la localisation de la serre,
2. L'architecture de la serre,
3. Le type de matériau transparent de l'enveloppe.

Orientation et localisation

L'orientation de la serre influence la quantité et le profil annuel du rayonnement solaire capté par la serre (Rasheed et al., 2018; Tiwari, 2003) puisque la transmissivité solaire d'un matériau transparent dépend de l'angle d'incidence du rayonnement solaire par rapport à la normale de la surface. Tiwari (2003) relève qu'une orientation est-ouest sur la longueur de la serre permet de capter davantage de rayonnement solaire en hiver et moins en été, par rapport à une orientation nord-sud pour la plupart des géométries de couvertures de serres. Rasheed et al. (2018) ont effectué une étude paramétrique sur un modèle de serre à arche gothique qui arrive aux mêmes conclusions. Ceci s'explique parce que les surfaces latérales inclinées de la serre sont alors orientées plein sud et qu'en fonction de la position du soleil dans le ciel, l'angle d'incidence du rayonnement solaire incident est réduit par rapport à une surface verticale.

La Figure 1.1 est adaptée de Rasheed et al. (2018) et présente l'évolution mensuelle du rayonnement solaire capté par une serre à arche gothique située à Daegu en Corée du Sud ($35,53^{\circ}\text{N}$ $128,36^{\circ}\text{E}$) selon son orientation. La courbe E-O représente le rayonnement capté par une serre dont la longueur est orientée sur l'axe est-ouest alors que la courbe N-S représente le rayonnement capté par une serre dont la longueur est orientée sur l'axe nord-sud.

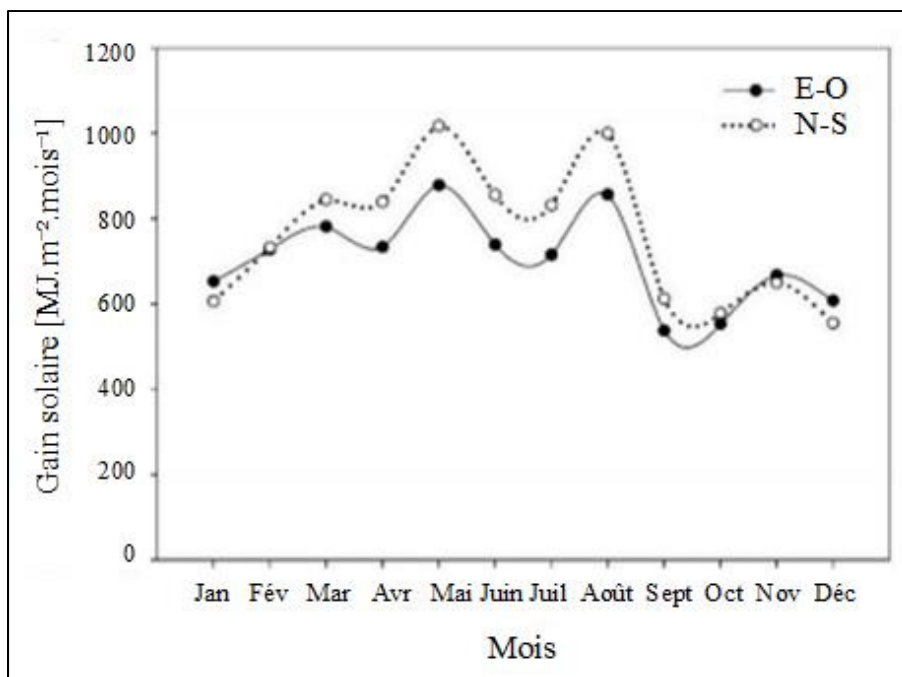


Figure 1.1 Rayonnement solaire capté selon l'orientation de la serre

Adaptée de Rasheed et al. (2018)

Il ressort de la Figure 1.1 qu'une orientation est-ouest sur la longueur de la serre permet de maximiser le rayonnement solaire capté en hiver. Le rayonnement solaire capté en été est cependant réduit significativement par rapport à une serre dans l'orientation nord-sud. Cette différence augmente avec la latitude de l'emplacement de la serre alors qu'à l'équateur, les deux orientations tendent à présenter un profil annuel du rayonnement solaire capté similaire (Tiwari, 2003). La localisation de la serre doit idéalement être sélectionnée afin d'éviter la présence d'arbres, de bâtiments et d'autres sources d'ombrage possibles qui pourrait limiter le rayonnement solaire disponible pour la serre (Tiwari, 2003). Il importe de noter que la localisation et l'orientation de la serre doit aussi être sélectionnée afin de profiter des vents dominants s'il est prévu de refroidir la serre par ventilation naturelle. Boulard et Baille (1995) ont démontré que la pression induite par le vent est le principal facteur influençant la ventilation naturelle de la serre. De plus, la surface de l'enveloppe exposée au vent du nord est à minimiser afin de limiter les pertes de chaleur par convection (Baudoin et al., 2013).

Architecture de la serre

L'architecture influence la performance énergétique de la serre en agissant sur de nombreux facteurs, comme les pertes de chaleur par conduction à travers les parois extérieures, la transmission du rayonnement solaire incident et l'écoulement de la condensation sur la paroi (Baudoin et al., 2013; Tiwari, 2003; von Zabeltitz, 2011). Différents paramètres sont considérés dans l'architecture de la serre, comme l'inclinaison des surfaces, le nombre de travées et le type de conception utilisé pour la toiture.

L'impact de l'inclinaison des surfaces sur la performance énergétique est important et le choix de l'inclinaison optimale doit prendre en compte la localisation géographique (Tong et al., 2013). Selon la latitude de la serre et l'heure dans le moment de l'année, le rayonnement solaire frappe l'enveloppe selon un certain angle d'incidence. Plus l'angle d'incidence par rapport à la normale de la surface est proche de 0° , plus la transmissivité de l'enveloppe est élevée (Baudoin et al., 2013; Tiwari, 2003). Il faut donc concevoir la géométrie de la serre afin de maximiser le rayonnement solaire incident sur les surfaces inclinées du toit. Il faut noter que certaines serres sont construites avec un seul côté vitré, comme c'est le cas pour les solariums et les serres chinoises. L'inclinaison de la surface transparente et l'orientation de la serre sont alors les principaux facteurs à considérer pour maximiser l'énergie solaire captée par la serre (Tong et al., 2013). L'inclinaison optimale recommandée par Tong et al. (2013) est celle qui permet d'obtenir un angle d'incidence solaire moyen de 0° par rapport à la normale de la surface durant quatre heures consécutives (de 10:00 à 14:00) le jour du solstice d'hiver. Cette inclinaison permet de maximiser le rayonnement solaire capté quand le soleil est au plus bas. Une inclinaison égale à la latitude de la localisation de la serre permet de maximiser le rayonnement solaire mensuel moyen et le rayonnement solaire capté annuellement (Duffie et al., 2020).

La Figure 1.2, adaptée de Castilla (2013), présente l'influence de l'angle d'incidence et de la dégradation sur la transmissivité solaire de deux types de films de polyéthylène.

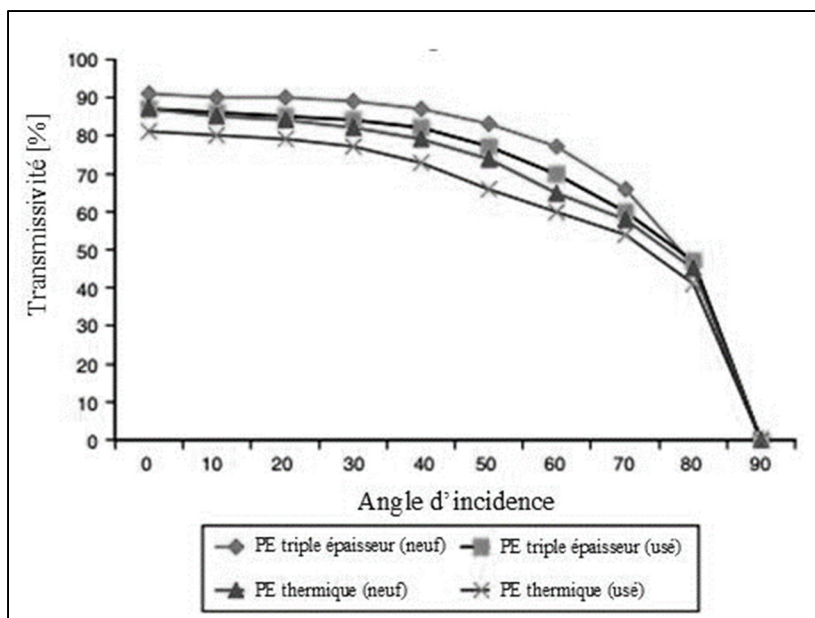


Figure 1.2 Transmissivité solaire selon l'angle d'incidence
Adaptée de Castilla (2013)

L'inclinaison des surfaces où les événements de la serre sont installés affecte l'efficacité de la ventilation naturelle. En effet, la ventilation naturelle est davantage influencée par l'effet de la pression du vent que par l'effet de la différence de température (Boulard et Baille, 1995) et la pression du vent est plus faible sur les surfaces inclinées du toit d'une serre que sur ses surfaces verticales (Maraveas, 2020). Pour un profil de vent complètement horizontal, la surface de l'ouverture requise doit être plus grande sur une surface inclinée que sur une surface verticale pour obtenir le même débit de ventilation (Boulard et Baille, 1995).

L'inclinaison des surfaces influence aussi l'écoulement de la condensation sur la paroi; un angle minimal de 33° doit être respecté pour éviter que la condensation sur la couverture ne s'égoutte sur les cultures (Tiwari, 2003). Les géométries de couverture de serres cylindriques sont plus propices à ce problème que les géométries de couvertures en arche (von Zabeltitz, 2011).

Le nombre de travées peut aussi influencer la performance énergétique de la serre et réfère au nombre d'arches assemblées sur la largeur composant la serre. Une serre peut avoir une seule travée ou des travées multiples tel que présenté sur la Figure 1.3.

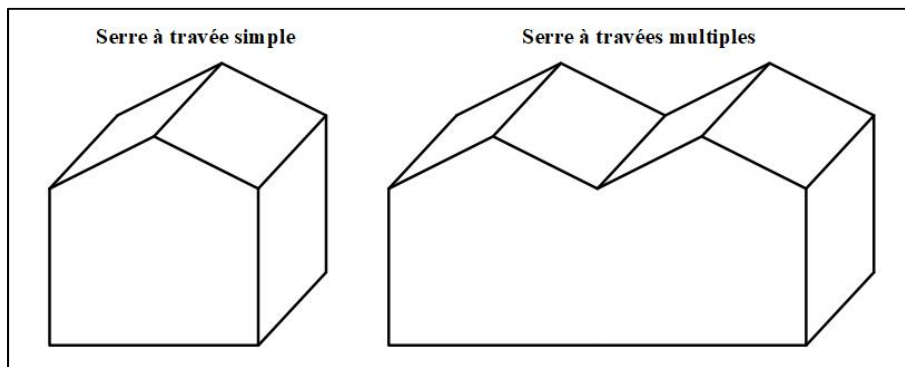


Figure 1.3 Serre à travée simple et serre à travées multiples

Les serres à travées multiples permettent d'augmenter la superficie couverte par la serre dans le sens de la largeur. En augmentant la largeur de la serre, le ratio entre le volume d'air dans la serre et la surface des parois en contact avec l'air extérieur augmente aussi. En admettant un mélange homogène de l'air dans la serre, le volume d'air est proportionnel à la capacitance de l'air dans la serre. Ainsi, en augmentant le ratio entre le volume d'air dans la serre et la surface des parois extérieures, le ratio entre la capacitance de l'air dans la serre et les pertes par conduction-convection à travers les parois extérieures augmente, ce qui réduit ultimement la capacité de chauffage requise (Tiwari, 2003). Cependant, Maraveas (2020) note que pour une serre à travées multiples, le coefficient de pression du vent diminue pour les travées situées en aval de la direction du vent, ce qui pourrait entraîner une ventilation naturelle moins performante dans ces sections de la serre.

La Figure 1.4 adaptée de Castilla (2013) présente les principaux types de conception de serres retrouvés dans la littérature pour des serres en climat nordique. D'autres conceptions peuvent être utilisées en climat tropical ou désertique pour favoriser un ombrage adéquat, maximiser la ventilation et favoriser la récupération de l'eau (Castilla, 2013; von Zabeltitz, 2011).

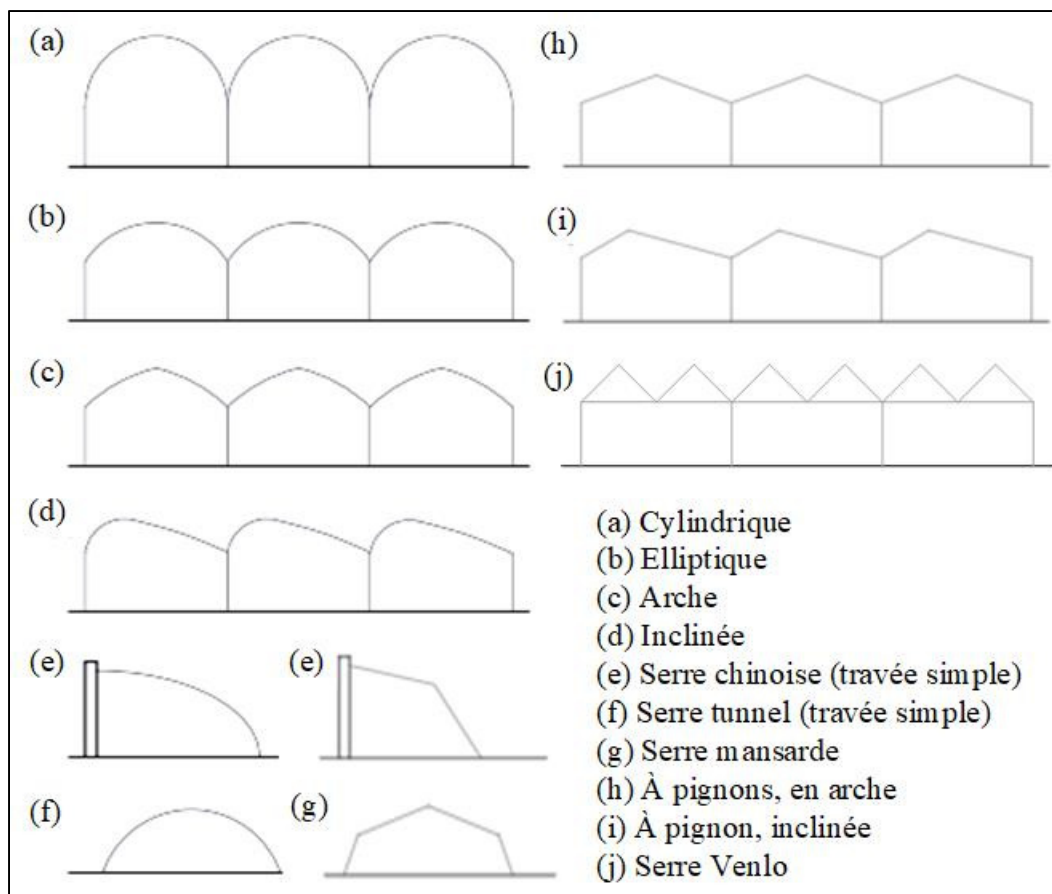


Figure 1.4 Conception de serres en climat froid
Adaptée de Castilla (2013)

Pour chacune des conceptions de serre présentées à la Figure 1.4, la hauteur de la couverture de la serre influence le volume d'air dans la serre. Un volume d'air plus élevé dans la serre permet de réduire les besoins de déshumidification si la circulation d'air est adéquate et d'augmenter la capacitance thermique de la serre tel que décrit précédemment (Castilla, 2013).

Il est possible de construire des serres partiellement enterrées. La température du sol est plus stable que la température de l'air extérieur (Kusuda et Achenbach, 1965). Ce type de serre permet donc de minimiser les variations de température extrêmes dans la serre, ce qui se traduit par une demande en refroidissement plus faible en climat chaud (Fox et al., 2019) et par des températures moyennes plus élevées en climat froid (Castilla, 2013). Geery (1982) a étudié l'influence de la profondeur d'une serre chinoise enterrée et constate qu'une profondeur de

deux mètres permet de bénéficier de température du sol stable sans limiter l'ensoleillement, ce qui augmente sensiblement la température minimale annuelle de l'air dans la serre.

Matériau d'enveloppe

Comme l'enveloppe de la serre est recouverte par un matériau transparent pour filtrer et capter le rayonnement solaire, la nature de ce matériau a un impact significatif sur la performance énergétique de la serre. Ses propriétés optiques influencent la transmission du rayonnement solaire dans la serre alors que ses propriétés thermiques influencent les pertes thermiques par conduction-convection à travers l'enveloppe. D'autres facteurs, comme le coût, le poids, la résistance mécanique ou la stabilité chimique peuvent guider le choix du matériau d'enveloppe. Contrairement au vitrage horticole, les matériaux transparents plastiques ont tendance à se dégrader sous l'action des rayons UV du soleil, mais leurs faibles coûts en font tout de même des options intéressantes (Tiwari, 2003).

Valera et al. (2008) recensent parmi de nombreuses études scientifiques les caractéristiques optiques et thermiques des principaux matériaux transparents utilisés pour l'enveloppe d'une serre. Des valeurs de référence pour quelques propriétés thermiques et optiques de matériaux d'enveloppe communément utilisés tirées de cette étude sont présentées dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Propriétés de différents matériaux d'enveloppe

Matériau	Conductivité thermique [W.m⁻¹.K⁻¹]	Transmissivité solaire [-]	Réflectance solaire [-]	Émissivité [-]
Polycarbonate	0,19	0,78	0,14 à 0,15	0,89 à 0,98
Films de polyéthylène	0,45	0,88 à 0,91	0,08 à 0,11	0,04 à 0,80 ^a
Vitrage horticole	0,76	0,89	0,08	0,90

^a La grande variance pour l'émissivité des films de polyéthylènes s'explique par les nombreux types de revêtements disponibles afin de diminuer les pertes associées au rayonnement à ondes longues du film de polyéthylène tels que recensés par Valera et al. (2008).

Il faut noter que le processus de transmission du rayonnement solaire à travers le matériau d'enveloppe transparent peut influencer la distribution spectrale du rayonnement transmis, car ils peuvent absorber plus efficacement le rayonnement à certaines longueurs d'ondes que d'autres (Kwon et al., 2016). La Figure 1.5 adaptée de l'étude de Kwon et al. (2016), présente la transmissivité spectrale du rayonnement solaire pour deux différents matériaux d'enveloppe transparents utilisés dans les serres.

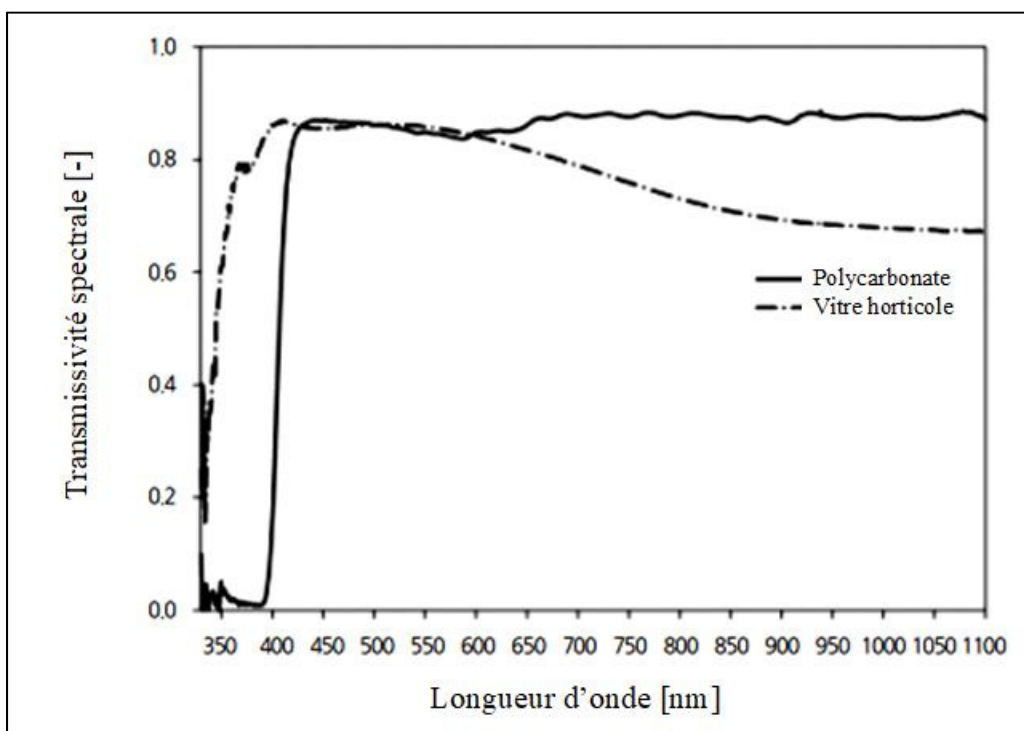


Figure 1.5 Transmissivité de deux matériaux d'enveloppe de serre
Adaptée de Kwon et al. (2016)

Sur la Figure 1.5, il est observable que le polycarbonate étudié filtre efficacement les rayons UV. La transmissivité au rayonnement à ondes longues est aussi plus élevée pour le polycarbonate que pour le vitrage horticole (Kwon et al., 2016). Les films de plastique peuvent recevoir des traitements afin de diminuer davantage leur transmissivité au rayonnement à ondes longues (Castilla, 2013; Valera et al., 2008).

Le coefficient de transmission thermique global U est une combinaison des effets de la conduction à travers l'enveloppe et de la convection aux surfaces intérieures et extérieures de celle-ci et se calcule généralement par l'équation (1.1).

$$U_{env} = \frac{1}{h_{env_i} + \frac{k_{env}}{e_{env}} + h_{env_e}} \quad (1.1)$$

Si plusieurs couches de matériau sont superposées en série, k_{env_e} la conductivité équivalente et l'épaisseur de l'assemblage en série doivent être considérées. Le coefficient de transmission thermique global U pour différents matériaux d'enveloppe utilisés dans les serres sont rapportées par Valera et al. (2008), Rasheed et al. (2017), Zhang et al. (1996) et Baudoin et al. (2013). Dans l'ensemble, les valeurs rapportées pour les mêmes matériaux sont similaires entre les études. Ce coefficient varie en fonction de la vitesse du vent, des propriétés de l'enveloppe et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Il peut aussi tenir compte des pertes par rayonnement à ondes longues vers l'atmosphère si des conditions standardisées sont utilisées pour l'évaluer, comme proposé par le standard NFRC-100 (2010). Rasheed et al. (2017) résument que le coefficient U augmente avec la vitesse du vent en raison de son influence sur le coefficient de convection à la surface extérieure h_{env_e} . Il augmente aussi en fonction de la différence de température entre l'air intérieur et extérieur, car celle-ci influence le coefficient de convection à la surface intérieure h_{env_i} . Une grande différence de température entre la surface extérieure de l'enveloppe et la voûte céleste augmente aussi le coefficient U si les pertes par rayonnement à ondes longues sont considérées.

1.1.2 Mode d'opération

Le mode d'opération est utilisé par Santamouris et al. (1994) pour classifier les systèmes exploitant l'énergie solaire dans les serres destinées à la production végétale. Le contrôle des conditions climatiques dans la serre peut être fait selon un mode d'opération passif ou actif, cette classification est basée sur le type de systèmes installés. Une serre passive permet d'influencer les conditions de croissances sans apport d'énergie externe autre que celle du

soleil en utilisant des technologies passives comme des éléments de construction de la serre pour stocker l'énergie solaire captée (Mosey et Supple, 2021). Une serre active permet de contrôler les conditions de croissances en utilisant de l'énergie supplémentaire (électrique, thermique) pour mieux gérer l'énergie solaire captée ou encore compléter celle-ci par l'utilisation d'éclairage artificiel et de systèmes CVCA (Mosey et Supple, 2021).

Le contrôle des conditions climatiques dans la serre permet de favoriser la croissance des plantes. Les conditions climatiques contrôlées englobent notamment la régulation de la température, de l'humidité de l'air, de l'éclairage ainsi que le contrôle de la concentration en CO₂ dans l'air (Tiwari, 2003).

Sethi et Sharma (2007, 2008) ont recensé les principaux systèmes de régulation de la température de l'air utilisés dans les serres commerciales dans le monde. Ces systèmes peuvent être classés selon leur objectif et leur mode d'opération. La Figure 1.6 et la Figure 1.7 présentent différents systèmes de régulation de la température utilisés en serre et les catégorise en fonction de leurs objectifs pour les modes d'opération passifs et actifs, respectivement.

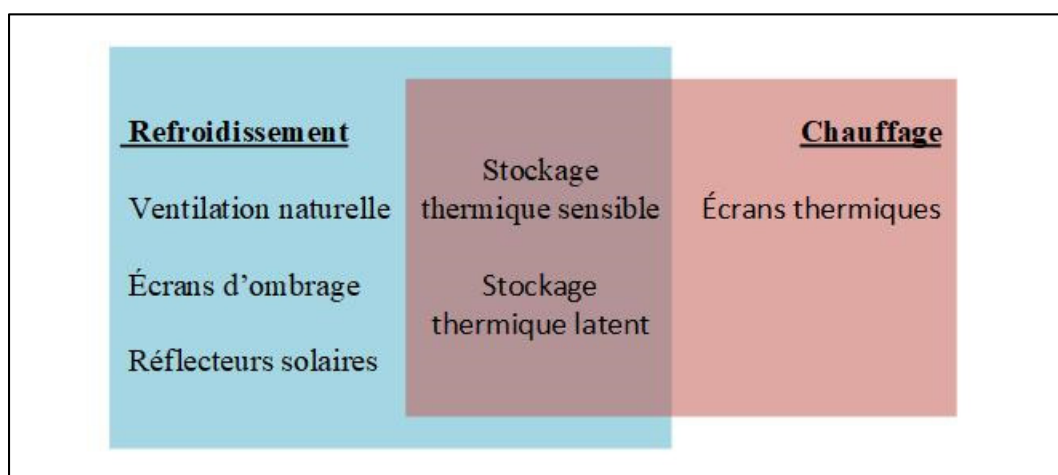


Figure 1.6 Systèmes de régulation de la température passifs

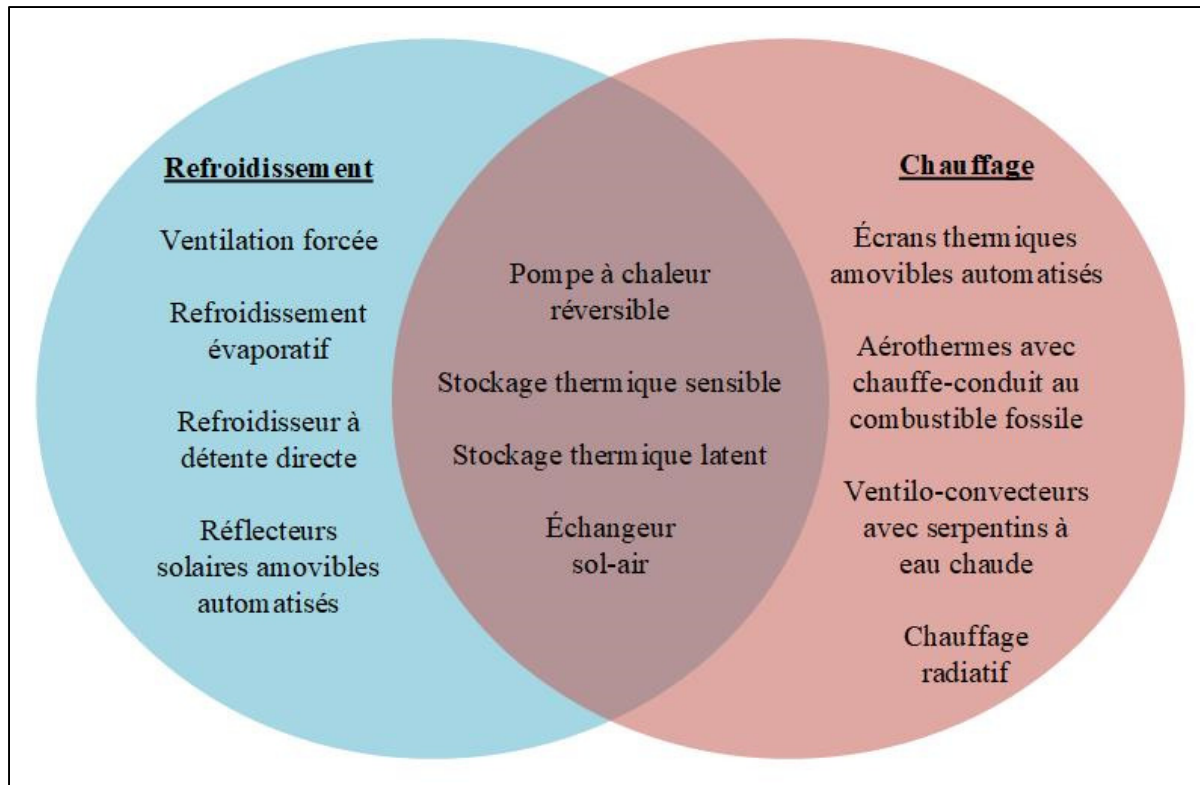


Figure 1.7 Systèmes de régulation de la température actifs

Les systèmes de refroidissement et de chauffage permettent d'abaisser ou d'augmenter la température de l'air de la serre, respectivement. Les systèmes présentés dans l'intersection aux Figures 1.6 et 1.7 peuvent être utilisés dans ces deux objectifs, selon les conditions. Sethi et Sharma (2008) ont classifié le stockage thermique parmi les systèmes de chauffage, mais il peut aussi être considéré comme un système de refroidissement, car il permet d'absorber l'excès de chaleur de l'air dans la serre durant sa phase de chargement (Rempel et Rempel, 2013). Un système de stockage thermique actif se distingue par l'utilisation d'équipements tels que des pompes et des ventilateurs pour accélérer le chargement et le déchargement du stockage. Le stockage thermique peut être sensible ou latent, selon la nature de l'énergie stockée dans le médium de stockage thermique. Les différents médiums de stockage thermique peuvent être liquides, solides ou encore un matériau à changement de phase (MCP). Ceux-ci se distinguent par la nature de la chaleur stockée ou par les mécanismes de diffusion de la chaleur dans le médium de stockage. La capacité de stockage thermique dans un solide et la

vitesse de chargement et de déchargement ne dépend que de la conductivité et de la capacité thermique massique du médium de stockage solide (Rempel et Rempel, 2013). Dans le cas d'un stockage thermique dans un liquide, la vitesse de chargement/déchargement est aussi dictée par la viscosité dynamique et le coefficient d'expansion thermique du fluide qui influencent les courants de convection libre dans celui-ci (Bergman et al., 2011; Rempel et Rempel, 2013). Le stockage thermique latent dans un MCP implique une substance qui change de phase généralement entre 20 et 40°C. Ceci permet de tirer avantage de l'énergie latente de changement de phase de cette substance et de stocker l'énergie de façon plus compacte (Rempel et Rempel, 2013).

Le contrôle de l'humidité dans les serres peut être réalisé passivement par ventilation naturelle. Les variations de l'humidité de l'air dans la serre peuvent aussi être limitées passivement par l'utilisation de matériaux de construction hygroscopiques comme de l'argile de bentonite (Geery, 1982). Une solution ou un matériau hygroscopique peut absorber ou relâcher l'humidité dans l'air jusqu'à l'équilibre entre la pression de vapeur de l'air et la pression de l'eau contenue dans la matrice de la substance hygroscopique. Dans la pratique, l'emploi de tels matériaux de construction dans les bâtiments permet de réduire l'amplitude des variations de l'humidité de l'air (West et Hansen, 1992; Zhang et al., 2017). Le contrôle de l'humidité peut aussi se faire par ventilation forcée, à l'aide de systèmes de déshumidification par condensation sur un corps froid, par une roue dessiccante ou par une solution hygroscopique (Campen et al., 2003). Dans ces derniers cas, de l'énergie est requise pour extraire l'excès d'humidité dans l'air.

Le contrôle du CO₂ peut être réalisé passivement ou activement par ventilation naturelle ou forcée. La ventilation permet de régénérer la concentration en CO₂ de l'air de la serre qui est absorbé par les plantes en remplaçant l'air intérieur par de l'air extérieur. Un débit d'air extérieur minimal de 10 à 15 L.s⁻¹.m⁻² est recommandé pour maintenir la concentration en CO₂ dans la serre (ASHRAE, 2015). L'enrichissement de l'air en CO₂ au-delà de la concentration atmosphérique doit être effectuée en utilisant d'autres sources telles que des réservoirs de CO₂

ou encore le recyclage des gaz de combustion obtenus lors de la combustion de combustible fossiles pour le chauffage de la serre (Nederhoff, 2004).

Le rayonnement photo actif reçu dans la serre est principalement contrôlé passivement ou activement à l'aide d'écrans d'ombrage ou de réflecteurs. Un contrôle actif permettant d'automatiser leur déploiement en fonction de données et de prévisions météorologiques a été proposé par Albright et al. (2000). L'éclairage naturel peut aussi être complété par différentes sources d'éclairage artificiel tels que les lampes à décharge de sodium haute pression (HPS), à halogénure métallique (MH) ou par des diodes électroluminescentes (DEL).

1.1.3 Températures maintenues dans la serre

Il est aussi possible de distinguer les serres en utilisant une méthode de classification basée selon la température maintenue dans la serre (Castilla, 2013). Cette classification distingue les serres non chauffées, les serres froides (5-8°C), les serres tempérées (12-15°C) et les serres chaudes (20-25°C) (Castilla, 2013). Le choix de la température visée influencera les décisions quant à ce qui sera possible d'y faire pousser, aux systèmes requis ainsi qu'à la construction de la serre.

Cette classification est utile, car elle permet d'identifier les conditions de conception en température des serres et guider le choix des indicateurs de performance nécessaire pour faire une comparaison objective. Il est évident qu'une comparaison de la consommation énergétique du chauffage d'une serre chaude à celle d'une serre froide donne peu d'informations pertinentes pour comparer la performance de celles-ci, puisque cet indicateur de performance avantage généralement la serre froide. Il importe alors de compléter l'analyse de cette comparaison en utilisant un indicateur de performance pouvant témoigner des avantages de la serre chaude par rapport à la serre froide. Les indicateurs de performance sont discutés plus en détails à la section 1.4.

D'autres méthodes de classification des serres sont retrouvées dans la littérature. Celles-ci incluent entre autres la classification selon l'investissement initial (Tiwari, 2003). Cette

méthode de classification économique est peu appliquée dans le contexte de l'étude de la performance énergétique, mais elle est cependant très pertinente pour l'analyse détaillée des implications économiques de mesures d'efficacité énergétique, notamment la période de retour sur investissement (PRI).

1.2 Paramètres environnementaux et plantes

Le microclimat dans la serre a un impact important sur la croissance des plantes et sur ses interactions avec l'air intérieur par le biais de la réaction de photosynthèse et de respiration, facilitée par des mécanismes internes tels que l'évapotranspiration. La réaction de photosynthèse permet à la plante de produire de la matière organique et des sucres en absorbant des nutriments et de l'eau du substrat, du CO₂ de l'air et de l'énergie provenant du rayonnement photo actif en relâchant de l'oxygène et de la vapeur d'eau dans l'air. Par la respiration, la plante alimente ses propres cellules en oxygène et relâche du CO₂ et de la vapeur d'eau dans l'air. En période obscure, en raison de l'absence de rayonnement photo actif, l'activité photosynthétique est nulle et la plante est uniquement en respiration. Il importe de noter que la plante est toujours en respiration, cependant en pratique la période de respiration est considérée comme étant la période obscure ou seule la respiration est observée (Lambers et al., 1998).

L'évapotranspiration est le mécanisme par lequel l'eau est captée par les racines pour distribuer les nutriments à l'intérieur de la plante. Une partie de cette eau est transpirée par les stomates de la plante. Ce phénomène est plus ou moins important en fonction de l'ouverture des stomates, qui dépend de paramètres comme de la température, du rayonnement photo actif disponible à la feuille ainsi que de la disponibilité de l'eau dans le sol (Castilla, 2013; Lambers et al., 1998; Stanghellini, 1987).

Les principaux paramètres influençant la croissance des plantes sont la température de l'air, l'humidité de l'air, le rayonnement photo actif et la concentration en CO₂ dans l'air. Ces paramètres et leur influence sur les plantes cultivées en serre au Québec sont discutés dans les sous-sections suivantes.

1.2.1 Température

La température a un impact important sur les processus physiologiques et développementaux des plantes, chaque plante a une plage de température optimale dans laquelle ses processus biologiques et reproductifs sont favorisés. La plage de température optimale dépend de la plante cultivée et de l'activité photosynthétique de la plante (Hanan, 1997). Le Tableau 1.2 fait la synthèse d'informations rapportées dans Tesi (2001) par rapport aux plages de températures optimales et dommageables pour les plantes communément cultivées en serre au Québec (MAPAQ, 2018). Il est important de noter que ces températures varient avec le stade de développement de la plante et le taux de photosynthèse désiré.

Tableau 1.2 Plage de températures pour différentes plantes cultivées en serre

Plante	Minimum dommageable	Minimum biologique	Maximum biologique	Optimale photosynthèse	Optimale respiration
Concombre	0°C	10 à 13°C	28 à 32°C	24 à 28°C	18 à 20°C
Laitue	-2 à 0°C	4 à 6°C	25 à 30°C	15 à 18°C	10 à 12°C
Poivron	-2 à 0°C	10 à 12°C	28 à 32°C	22 à 28°C	16 à 18°C
Tomate	-2 à 0°C	8 à 10°C	26 à 30°C	22 à 26°C	13 à 16°C

Le Tableau 1.2 présente en plus des plages de température optimales, les températures minimales et maximales biologiques. Celles-ci correspondent aux limites au-delà desquelles les processus biologiques de la plante sont interrompus, sans pour autant poser de risques pour celle-ci. Hatfield et Prueger (2015) identifient deux principaux risques pour les plantes liés à la température, soit la surchauffe et le gel. Ils qualifient un événement de surchauffe extrême par des températures de l'air de 4°C supérieures à la plage de température optimale pour la plante. Ces événements ont principalement un effet sur les processus reproducteurs de la plante. Par exemple, l'effet sur les mécanismes internes des plants de tomates d'une exposition à ces températures limite la pollinisation, ce qui entrave la production de fruits (Sato et al., 2000).

Le gel se caractérise ici par des températures de l'air proche du point de congélation (-2 à 0°C). À une température entre 1°C et 5°C, l'activité de photosynthèse est à son minimum et la plante est en dormance (Castilla, 2013). La croissance de la laitue est affectée par des températures trop basses. Bierhuizen et al. (1973) notent par exemple un temps de croissance plus long, soit 54 jours pour des laitues cultivées en serre froide et 33 jours pour des laitues cultivées en serre chaude. Bierhuizen et al. (1973) rapportent aussi une diminution de la surface totale de feuille ainsi que du poids frais d'environ 25% et 10%, respectivement, comparativement à des laitues cultivées en serre chaude. Castilla (2013) résume que si la température de l'air est inférieure à la température optimale pour la plante cultivée, il y a en général une baisse de la qualité du produit. Sous la limite de gel, l'eau contenue dans les tissus intercellulaires de la plante ou le substrat de croissance gèle qui cause des dommages importants à la plante (Snyder et de Melo-Abreu, 2005).

Un autre facteur lié à la température qui doit être pris en compte est la variation de la température journalière, car les variations extrêmes peuvent causer du stress aux plantes (Castilla, 2013; Hatfield et Prueger, 2015). La différence entre la température durant la période de photosynthèse et la température en période de respiration influence la croissance des plantes. Une valeur positive pour ce paramètre permet d'obtenir des plantes plus élancées alors qu'une valeur négative tend à produire des plantes plus compactes (Bakker et al., 1995). La valeur optimale pour la différence entre la température durant la photopériode et la période de respiration dépend du rayonnement reçu durant la période de photosynthèse, l'ASAE (2002) recommande de la maintenir entre 3°C et 6°C par temps nuageux et de 6°C à 11°C par temps ensoleillé.

1.2.2 Humidité de l'air

Le déficit de pression de vapeur (DPV) est la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau à saturation et celle de l'air ambiant à la même température. Ce paramètre contrôle le mécanisme de transpiration de la plante en contrôlant l'ouverture des stomates et il influence donc indirectement la photosynthèse (Castilla, 2013; Hand, 1988). Le DPV peut être calculé en connaissant la température et l'humidité relative de l'air, qui est le rapport de la pression

partielle de la vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante, à l'aide des équations (1.2), (1.3) et (1.4).

$$DPV = P_{sat_{H_2O}} - P_{a_{H_2O}} \quad (1.2)$$

$$P_{sat_{H_2O}} = 0,617 \cdot e^{\left(\frac{T_a}{T_a+238,3} \cdot 17,2694\right)} \quad (1.3)$$

$$P_{a_{H_2O}} = 0,617 \cdot e^{\left(\frac{T_a \cdot 17,2694}{T_a+238,3}\right)} \cdot \frac{HR_a}{100} \quad (1.4)$$

Où $P_{sat_{H_2O}}$ est la pression partielle de la vapeur d'eau à saturation en kPa, $P_{a_{H_2O}}$ est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ambiant en kPa, T_a la température de l'air en °C et HR_a l'humidité relative de l'air ambiant en %.

Le DPV optimal est situé entre 0,5 à 1 kPa pour la plupart des plantes cultivées en serre (Bakker, 1991; Castilla, 2013; Maher, 2000). Un DPV trop élevé augmente le taux d'évapotranspiration de la plante et peut causer la fermeture des stomates pour que la plante préserve son eau si elle vient à manquer d'eau à ses racines ce qui limite alors la réaction de photosynthèse de la plante puisque le CO₂ est absorbé par les stomates (Maher, 2000). Un DPV trop faible implique que l'air est proche de sa limite de saturation ce qui fait que la plante est incapable d'évaporer l'eau transpirée qui obstrue alors les stomates, occasionnant leur fermeture (Maher, 2000). Dans les deux cas, la fermeture des stomates cause une diminution du taux d'évapotranspiration de la plante de même que de son taux de photosynthèse. Comme la transpiration est le phénomène qui permet de diminuer la température du feuillage en période de photosynthèse, si le taux d'évapotranspiration est insuffisant, les feuilles risquent de subir des dommages par brûlure. Sofi et al. (2019) ont démontré qu'il est possible de relever de l'état de stress hydrique des plantes par la mesure de la température de la canopée à l'aide d'une caméra thermique. Un DPV faible causé par une humidité relative trop élevée empêche l'eau transpirée d'être évaporée, celle-ci reste donc dans la canopée ce qui augmente les risques de prolifération de moisissures et de pathogènes dans les cultures (Fletcher, 1973; Tiwari, 2003).

Les capteurs de température et d'humidité relative sont utilisés pour obtenir les mesures requises pour calculer le DPV. Il est possible de retrouver dans la littérature des plages d'humidité relative recommandées pour différentes plantes cultivées en serre (Tesi, 2001), ce qui facilite une comparaison directe avec les valeurs mesurées. Celles-ci sont présentées dans le Tableau 1.3 pour des plantes cultivées en serre au Québec. Il faut cependant retenir que c'est l'effet du DPV qui influence le phénomène d'évapotranspiration des plantes (Maher, 2000).

Tableau 1.3 Plage d'humidité relative selon le type de plante cultivé

Plante	Plage d'humidité relative recommandée
Concombre	70 à 90 %
Laitue	60 à 80 %
Poivron	65 à 70 %
Tomate	55 à 60 %

Dans le Tableau 1.3, il est possible de constater que toutes les plantes n'ont pas la même tolérance à l'humidité. Le concombre est une plante pouvant tolérer un microclimat très humide alors que la tomate nécessite un microclimat plus sec.

1.2.3 Rayonnement photo actif et éclairage

Le spectre solaire couvre le rayonnement ultraviolet (UV), le rayonnement photo actif (PAR), le rayonnement à ondes longues et le rayonnement thermique. Le spectre de la source solaire de référence est présenté à la Figure 1.8, tel que mesuré selon le standard ASTM G173-03 (2020). Celui-ci définit le spectre solaire de référence pour le rayonnement global capté par une surface inclinée à 37° après avoir traversé une masse d'air équivalente à 1,5 atmosphères.

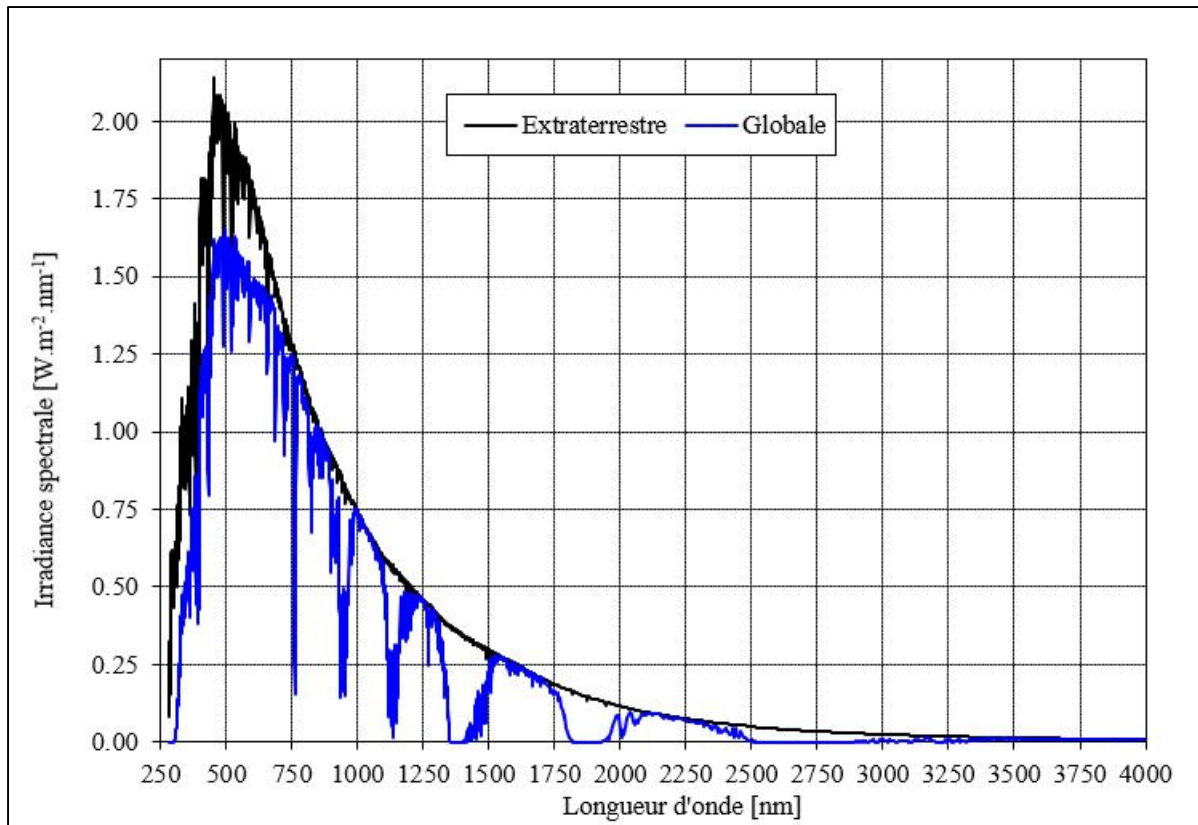


Figure 1.8 Spectre solaire de référence selon le standard G173-03
Adaptée du standard G173-03 de l'ASTM (2020)

Sur la Figure 1.8, le spectre du rayonnement solaire global capté par une surface inclinée présente quelques différences notables par rapport au spectre du rayonnement solaire extraterrestre. Les creux constatés à 750 nm, 900 nm, 1400 nm, 1900 nm et 2500 nm s'expliquent par l'absorption de ces longueurs d'onde par les particules qui composent l'atmosphère (McVeigh, 1983). Le rayonnement global à la surface de la terre est séparé en une composante directe et une composante diffuse lorsqu'il est intercepté par des particules dans l'atmosphère telles que les gouttelettes d'eau en suspension dans les nuages, par exemple. Le rayonnement photo actif est le spectre qui est utile à l'activité photosynthétique des plantes. Celui-ci se trouve entre les longueurs d'ondes de 350 à 750 nm (McCree, 1971). Par convention, les limites du spectre photo actif sont de 400 et 700 nm, hors de ces limites l'action photosynthétique augmente et diminue très rapidement (Möttus et al., 2011). D'autres sources lumineuses peuvent être utilisées pour compléter le rayonnement solaire. Les diodes

électroluminescentes (DEL), les lampes à décharge de sodium haute pression (HPS) et les lampes à halogénure métallique (MH) peuvent entre autres être utilisées comme sources d'éclairage artificiel dans les serres. La Figure 1.9 adaptée de Wei et al. (2018) présente un exemple de distribution spectrale du spectre lumineux d'un éclairage par HPS et d'un éclairage par MH.

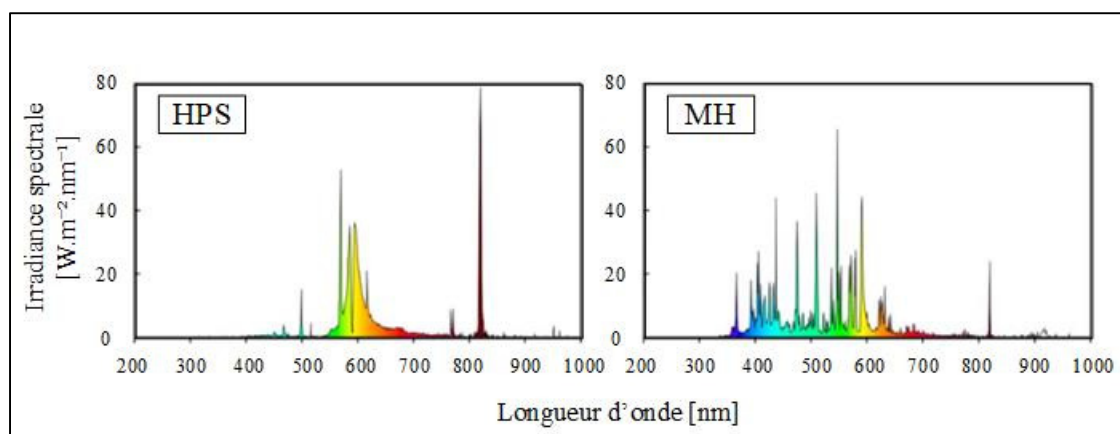


Figure 1.9 Distribution spectrale pour différentes sources d'éclairage artificiel
Adaptée de Wei et al. (2018)

La Figure 1.9 illustre la différence entre les spectres lumineux de différentes sources d'éclairage utilisés en serre. Ceci implique que la même consommation d'énergie électrique pour l'éclairage n'aura pas le même impact sur la croissance des plantes en fonction de la source d'éclairage artificiel utilisée. En effet, l'activité photosynthétique induite par différentes longueurs d'ondes varie. La Figure 1.10 qui est adaptée de Castilla (2013) présente l'effet de la longueur d'onde sur plusieurs processus photosensibles des plantes.

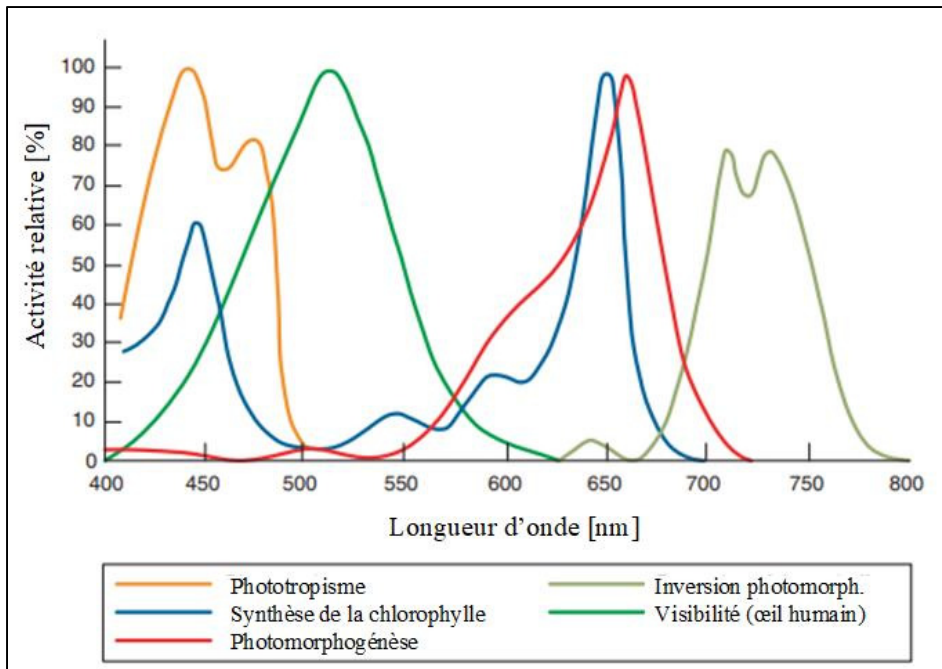


Figure 1.10 Effet de la longueur d'onde sur les processus photosensibles
Adaptée de Castilla (2013)

Le phototropisme est le mécanisme par lequel la plante s'oriente vers le soleil et la photomorphogénèse englobe les processus qui permettent d'altérer la forme et la couleur des plantes par exposition à différentes longueurs d'ondes. Il y a un creux important d'activité autour de 525 nm, qui est la longueur d'onde de la lumière verte réfléchie. Pour la majorité des plantes, il y a deux pics d'activité photosynthétiques à 440 et 620 nm, soit les longueurs d'ondes de la lumière bleu et rouge, respectivement : le pic d'activité photosynthétique de la lumière rouge est 42% plus élevé que le pic d'activité de la lumière bleu (McCree, 1971).

L'ensoleillement et l'intensité de l'éclairage artificiel requis pour la culture des plantes peuvent être mesurés à l'aide de différents instruments et unités de mesures. Les instruments communément utilisés sont le luxmètre, qui permet de mesurer la luminosité en lux, le pyranomètre qui permet de mesurer l'irradiance totale sur l'horizontale en W.m^{-2} et le spectromètre, qui permet de quantifier la distribution spectrale du flux lumineux et donc de mesurer la densité du flux de photon photo actifs (PPFD) en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. La luminosité est une mesure qui indique la quantité de lumière captée par une surface tandis que l'irradiance

est une mesure d'un flux d'énergie radiante intercepté par une surface, celle-ci se mesure en W.m^{-2} . Le PPFD représente le nombre de photons dans le domaine photo actif qui sont interceptés par une surface d'un mètre carré, par seconde.

La réaction de photosynthèse des plantes dépend de la quantité de rayonnement photo actif absorbée par celles-ci et la réflectance des feuilles de la canopée détermine la proportion du rayonnement incident qui est réfléchi par une feuille de la canopée. Celle-ci varie cependant en fonction de la longueur d'onde. La Figure 1.11 présente la réflectance d'une surface gazonnée en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident.

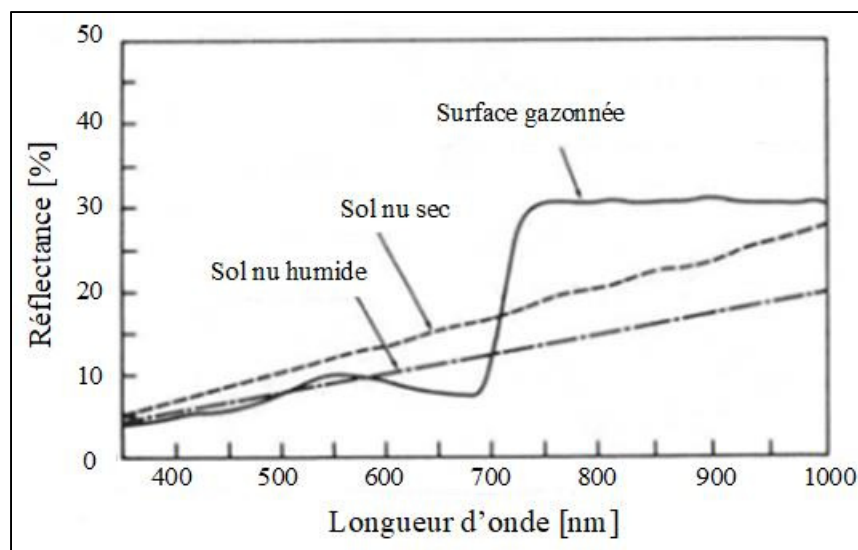


Figure 1.11 Réflectance du gazon selon la longueur d'onde
Adaptée de Miller (1977)

En connaissant la distribution spectrale de la source d'éclairage, il est possible d'établir la réflectance globale de la plante au rayonnement provenant de cette source. La réflectance globale d'une surface gazonnée au rayonnement solaire est de 0,23 (Allen et al., 1998). D'autres sources lumineuses sont utilisées comme sources d'éclairage d'appoint dans les serres et la réflectance globale de la plante dépend du spectre lumineux de celles-ci. À titre d'exemple, pour un éclairage DEL rouge-bleu, Graamans et al. (2017) rapportent une réflectance globale de l'ordre de 0,05 à 0,08 pour des laitues. Ce qui correspond à ce qui est

attendu selon la Figure 1.11, étant donné que la réflectance à ces deux longueurs d'ondes (450 et 650 nm) est dans cet ordre de grandeur. Stanghellini (1987) note qu'il n'y a pas beaucoup de variation inter espèces pour les plantes à feuillage vert.

L'intégrale de l'éclairage journalier (DLI) est l'intégrale sur 24h du PPFD et est la mesure de référence utilisée dans l'opération de serres. Afin d'obtenir le DLI à partir de données mesurées à l'aide d'instruments tels qu'un pyranomètre ou un luxmètre, il faut connaître la distribution spectrale de la source lumineuse. Des facteurs de conversions sont disponibles dans la littérature pour les principales sources lumineuses utilisées dans le contexte des serres (Thimijan et Heins, 1983). Le Tableau 1.4 présente les facteurs de conversion photométrique afin de déterminer le PPFD à partir de la luminosité ou de l'irradiance ainsi que la fraction de la puissance électrique installée transformée en chaleur convective (f_{conv}), en rayonnement à ondes longues (f_{LW}) et en rayonnement à ondes courtes (f_{sw}) pour différentes sources lumineuses (ASHRAE, 2015; Reis et Ribeiro, 2020; Thimijan et Heins, 1983).

Tableau 1.4 Facteurs de conversions photométriques pour différentes sources lumineuses

Source lumineuse	Irradiance vers PPFD (FC_{E_e})	Luminosité vers PPFD (FC_{lx})	Fraction à ondes longues (f_{LW})	Fraction convective (f_{conv})	Fraction à ondes courtes (f_{sw})
Solaire ^a	2,02 $\mu\text{mol.J}^{-1}$	0,0185 $\mu\text{mol.lm}^{-1}$	n/a	n/a	n/a
Halogénure métallique (MH) ^b	1,21 $\mu\text{mol.J}^{-1}$	0,0141 $\mu\text{mol.lm}^{-1}$	0,45	0,28	0,27
Décharge de sodium haute pression (HPS) ^b	1,30 $\mu\text{mol.J}^{-1}$	0,0122 $\mu\text{mol.lm}^{-1}$	0,54	0,28	0,18

^a Le facteur de conversion entre l'irradiance et le PPFD considère l'irradiance globale (incluant la partie à ondes longues du spectre solaire). Une validation du facteur de conversion de Reis et Ribeiro (2020) pour la source solaire est disponible à l'ANNEXE II.

^b Le facteur de conversion entre l'irradiance et le PPFD, la fraction convective, la fraction à ondes longues et la fraction à ondes courtes (qui englobe le spectre photo actif) s'appliquent à la puissance électrique totale installée de l'éclairage artificiel.

Il faut noter que ces facteurs de conversion ne sont pas constants dans le temps, car le rayonnement solaire traverse une couche plus ou moins épaisse d'air (calculée en nombre d'atmosphères). Le passage à travers cette couche d'air filtre ou reflète une partie plus ou moins importante du rayonnement incident, selon les longueurs d'ondes filtrées par les particules rencontrées tel qu'il est possible de l'observer sur la Figure 1.8. L'épaisseur de la couche d'air traversée varie en fonction de l'angle d'altitude solaire à une échelle de temps journalière, mais aussi selon l'angle de déclinaison de la terre au moment considéré (Duffie et al., 2020). Sans données expérimentales, il est cependant difficile de modéliser cette variation dans le temps.

Le DLI requis dans la serre pour favoriser la croissance dépend du type de plante cultivé. Le Tableau 1.5 présente des valeurs de référence pour déterminer le DLI optimal pour différentes variétés de plantes cultivées en serre au Québec (Baumbauer, 2019; Moe et al., 2005; Torres et Lopez, 2018).

Tableau 1.5 DLI optimal selon le type de plante cultivé

Plante	DLI recommandé [$\text{mol.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$]
Concombre	20 à 25
Laitue	8 à 18
Poivron	10 à 30
Tomate	10 à 30

Parmi les plantes les plus cultivées en serre au Québec, le Tableau 1.5 démontre que la laitue a besoin d'une quantité de rayonnement photo actif pour soutenir sa croissance moindre que les concombres, les tomates et les poivrons. Le calcul de l'intégrale de l'éclairage journalier doit considérer les limites qui gouvernent la réaction de photosynthèse, comme la concentration en CO_2 , dans l'air et la limite de saturation photosynthétique de la plante.

1.2.4 Concentration en CO₂

Le contrôle de la concentration en CO₂ dans l'air permet d'améliorer le taux de photosynthèse des plantes dans la mesure où aucun autre facteur ne limite la captation de celui-ci. Parmi les facteurs pouvant influencer la capacité des plantes à capter le CO₂, il y a l'humidité, qui agit sur l'ouverture des stomates, la température qui agit sur l'activité interne de la plante, la disponibilité en eau dans le sol et le rayonnement incident, qui est un autre facteur de l'équation de la photosynthèse (Castilla, 2013; Tiwari, 2003). Le rayonnement photo actif et la concentration en CO₂ sont intimement liés par l'équation de la réaction de photosynthèse. En assumant que les autres facteurs n'influencent pas la capacité de captation de CO₂ de la plante, la concentration en CO₂ optimale peut être déterminée en fonction du rayonnement capté par la plante et vice-versa (Tiwari, 2003). La Figure 1.12, adaptée de Castilla (2013), présente la relation entre le rayonnement incident, la concentration en CO₂ et le taux de photosynthèse.

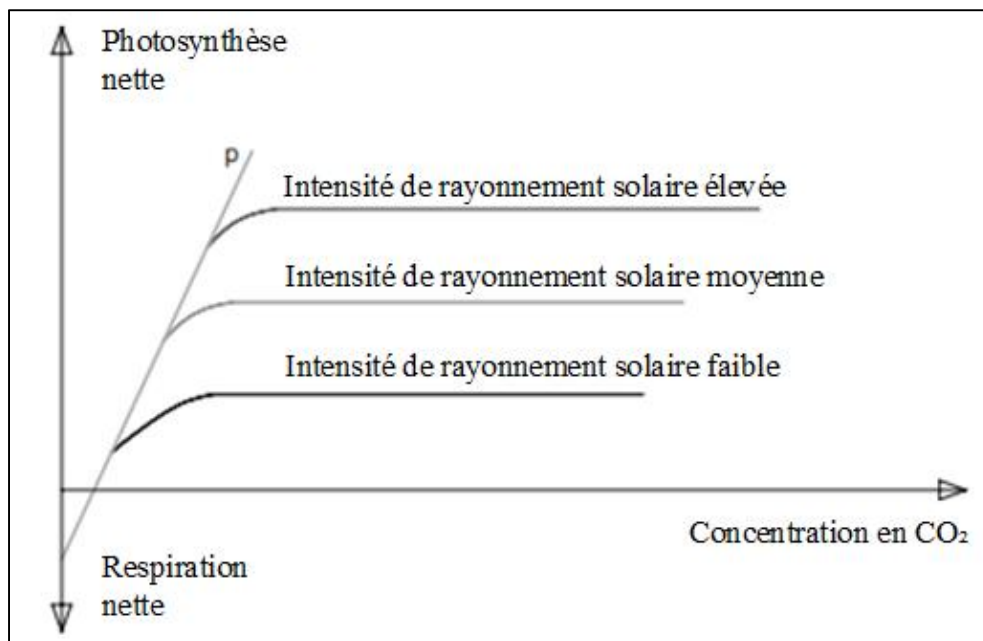


Figure 1.12 Taux de photosynthèse, rayonnement incident et concentration en CO₂
Adaptée de Castilla (2013)

La Figure 1.12 démontre qu'il y a un plateau dans l'efficacité de la photosynthèse qui se produit à partir d'une certaine concentration en CO₂, c'est la limite de saturation de photosynthèse. La

concentration en CO₂ minimale pour permettre un bilan de carbone positif entre la photosynthèse et la respiration est de moins de 200 parties par million (ppm) dans la plupart des conditions (Bakker et al., 1995), c'est-à-dire qu'à une concentration de CO₂ plus faible, la plante ne croît pas. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère est d'environ 400-450 ppm et est appelée à augmenter dans le futur en raison de l'activité humaine. La limite de saturation de photosynthèse dépend donc de la concentration en CO₂ dans l'air ambiant, de la température de l'air et du type de plante (Xin et al., 2019). He et al. (2001) rapportent une valeur de 1350 $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ pour de la laitue en climat chaud. La limite de saturation de photosynthèse des plants de concombre varie entre 1000 et 1700 $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ en fonction de la température de l'air et de la concentration en CO₂ dans l'air (Xin et al., 2019).

Nederhoff (1994) a étudié l'effet de la concentration en CO₂ sur plusieurs plantes cultivées en serre au Québec, soit le concombre, la tomate et le poivron. En toutes autres conditions égales, l'effet d'une augmentation de la concentration en CO₂ sur la production de matière organique et sur la masse de fruit produite est décrite dans le Tableau 1.6.

Tableau 1.6 Effet de la concentration en CO₂ sur la productivité de plantes cultivées en serre
Données tirées de Nederhoff (1994)

Plante cultivée	Concentration en CO₂	Production de matière organique	Masse de fruit produite
Concombre	364 → 620 ppm	+25 %	+31 %
Tomate	306 → 448 ppm	+13 %	+33 %
Poivron	370 → 510 ppm	+17,2 %	+8 %

Une concentration en CO₂ de 600 à 700 ppm est recommandée pour la culture de tomates, poivrons et de concombres dans des serres en climat nord-européen (Urban, 1997). La concentration maximale qui est applicable à la plupart des espèces cultivées en serre est de 1000 ppm (Hanan, 1997). Une attention particulière doit être apportée à l'infiltration et à la ventilation de la serre. Il est recommandé de garder la serre la plus étanche possible afin de limiter les pertes de CO₂ par infiltration. Lorsque la ventilation doit être utilisée pour contrôler

la température ou l'humidité, la consigne de concentration de CO₂ à maintenir devrait être celle de la concentration atmosphérique (Castilla, 2013). Les échanges gazeux aux feuilles (captation du CO₂ et vaporisation de l'eau) sont favorisés par une bonne circulation de l'air autour des feuilles. À la canopée, une vitesse de l'air de 0.5 m.s⁻¹ à 0.7 m.s⁻¹ est recommandée alors qu'une vitesse supérieure à 1 m.s⁻¹ a une influence négative sur la croissance (Castilla, 2013). De plus, les ventilateurs devraient être orientés de manière à permettre une vitesse de 0.2 m.s⁻¹ dans l'axe vertical de la serre afin de limiter la stratification de l'air (Hanan, 1997).

1.3 Modélisation énergétique de serres

L'étude de l'efficacité énergétique de serres par simulation énergétique fait l'objet d'un intérêt croissant dans la communauté scientifique; la Figure 1.13 présente le nombre d'articles scientifiques publiés présentant les mots clés « *solar greenhouse* » et « *simulation* » dans les dix dernières années (données tirées du site ScienceDirect, en date du 11 novembre 2021).



Figure 1.13 Évolution de l'intérêt pour la simulation énergétique des serres

La simulation thermique dynamique (STD) de la performance énergétique des bâtiments vise à créer un modèle d'un bâtiment afin de simuler les échanges thermiques entre le bâtiment et l'extérieur sur une durée déterminée à l'aide de données météorologiques typiques ou

mesurées. Elle permet d'évaluer la consommation énergétique d'un bâtiment en amont de sa construction afin de prendre des décisions de conception pour réduire celle-ci. Elle peut aussi être utilisée pour créer un modèle d'un bâtiment existant et étudier l'impact de mesures d'efficacité énergétiques sur la consommation énergétique du bâtiment (Clarke et Hensen, 2015). Celle-ci peut aussi s'appliquer pour la modélisation énergétique et l'étude par simulation énergétique d'espaces d'AEC tels que les serres ou les FV.

1.3.1 Outils de STD pour évaluer la performance énergétique de bâtiments

La simulation thermique dynamique d'une serre peut être effectuée en utilisant différents outils commerciaux tels que TRNSYS (Klein et al., 2017) ou des outils à architecture ouverte tels qu'EnergyPlus (Crawley et al., 2000). Des modèles personnalisés peuvent être aussi programmés dans des environnements de simulation comme Simulink (Ben Ali et al., 2015) ou Dymola (Altes-Buch et al., 2019).

Une revue de trois outils pour la STD de bâtiment est effectuée afin d'identifier leurs avantages et inconvénients dans le contexte de la simulation de la performance énergétique de serres. Les outils considérés sont EnergyPlus et TRNSYS ainsi que l'environnement de modélisation et de simulation Dymola (et son alternative à architecture ouverte OpenModelica).

EnergyPlus

EnergyPlus est un logiciel développé pour résoudre les bilans thermiques et massiques dans un bâtiment. Celui-ci dispose d'OpenStudio comme interface utilisateur conviviale. Cet outil permet aussi d'effectuer une analyse détaillée de l'éclairage dans l'espace en utilisant la méthode de traçage des rayons incidents Radiance (Ward-Larson et Shakespeare, 1998). Il dispose aussi d'un moteur de calcul permettant de simuler les échanges massiques d'air dans la serre afin de quantifier plus précisément les échanges causés par la ventilation naturelle des bâtiments et par les échanges d'air entre différentes zones thermiques dans le bâtiment basé sur COMIS (Feustel, 1999). Cependant, il ne permet pas de modéliser le transport de contaminants tels que le CO₂. Il dispose d'une librairie intégrée comportant plusieurs composantes discrétisées de systèmes CVCA ainsi que des systèmes à énergie renouvelable et

permet aussi le calcul de charge de chauffage et refroidissement à l'aide des jours de conception de l'ASHRAE (Crawley et al., 2008). La modélisation et l'intégration de composantes personnalisées de plantes dans EnergyPlus est possible en utilisant un outil externe tel que Energy Management System (Nadal et al., 2017).

TRNSYS

TRNSYS est un logiciel de simulation de systèmes thermiques en régime transitoire basé sur l'assemblage de composantes (Klein et al., 2017). Chaque composante, appelée « Type » dans TRNSYS est en fait un modèle mathématique du phénomène qu'elle représente programmé dans le langage FORTRAN 90. Ce langage de programmation présente la particularité que sa syntaxe nécessite que chaque composante possède des paramètres qui ne peuvent pas être modifiés en cours de simulation, des variables d'entrées et des variables de sorties. Les variables d'entrées et de sorties des différentes composantes dans la simulation sont raccordées ensembles par l'utilisateur ce qui offre de la flexibilité à cet outil de simulation. Ce logiciel de simulation permet aussi l'étude par simulation de la performance énergétiques de bâtiment à l'aide d'une composante décrivant un modèle de bâtiment multizone.

La version 2018 de TRNSYS intègre une nouvelle procédure (DaySIM) qui permet à l'utilisateur d'effectuer des analyses détaillées de l'éclairage dans l'espace du modèle de bâtiment multizone (McDowell et al., 2017). De plus, il est possible de simuler les échanges massiques dans le bâtiment par une analyse de la ventilation naturelle multi-nodale intégrée dans TRNSYS grâce à l'outil TRNFLOW (Weber et al., 2003). Cette procédure de calcul est basée sur COMIS (Dorer et al., 2001). Elle permet aussi de définir des puits et des sources de contaminants dans l'air afin de modéliser le transport de ceux-ci. Finalement, TRNSYS dispose d'une vaste librairie interne de composantes permettant de modéliser des bâtiments, des phénomènes physiques ainsi que différentes composantes de systèmes à énergies renouvelables et de systèmes CVCA ainsi que des contrôleurs réalistes (Crawley et al., 2008).

Dymola/OpenModelica

Dymola et son alternative libre d'usage OpenModelica sont des environnements de simulation permettant d'assembler des modèles de programmés dans le langage de programmation Modelica. Ce langage de programmation permet une grande flexibilité en raison de la syntaxe de programmation orientée objet utilisée pour les composantes, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de distinction entre les paramètres, les variables d'entrée et les variables de sortie dans une composante. Le tout est assemblé sous la forme d'un système d'équation symbolique complexe, puis résolu par le moteur de simulation (Wetter et Haugstetter, 2006).

Plusieurs bibliothèques de composantes discrétisées en langage Modelica ont été développées pour des bâtiments, des systèmes solaires et des systèmes CVCA (Wetter, 2009; Wetter et al., 2014). Une bibliothèque a été créée pour modéliser une serre ainsi que des systèmes mécaniques particuliers utilisés dans ce contexte (Altes-Buch et al., 2019). Wetter (2006) a développé un modèle de calcul pour les échanges massiques entre les zones d'un bâtiment similaire à COMIS, avec transport des contaminants. Un modèle pour l'analyse détaillé de l'éclairage par traçage des rayons incidents dans la zone est disponible (Wetter, 2005). La cosimulation d'un modèle dans Dymola avec le logiciel de traçage des rayons incidents Radiance est aussi possible (Sodja et Zupancic, 2009).

Wetter et Haugstetter (2006) ont comparé la performance de TRNSYS et Dymola et notent que le temps de calcul est plus important dans Dymola pour un modèle comparable. L'intégration d'un pas de temps de calcul variable dans Dymola est un avantage par rapport à TRNSYS, car il permet des pas de temps plus grand lorsque les conditions sont plus stables et plus petit lorsque les variables changent rapidement, alors que TRNSYS est contraint à un pas de simulation fixe, ce qui augmente considérablement le temps de simulation si la simulation considère des contrôleurs en temps réel nécessitant un pas de simulation très court. Cependant, la résolution du système d'équation symbolique complexe généré demandent une puissance et un temps de calcul considérable qui ne justifie pas toujours cet avantage.

1.3.2 Bilan énergétique d'une serre

Pour définir le bilan énergétique d'une serre, le volume de contrôle utilisé peut être établi selon plusieurs méthodes. Dhiman et al. (2019) et Ghani et al. (2020) ont procédé par une discrétisation du volume d'air dans la serre par éléments finis. Ces modèles sont ensuite résolus par une analyse des échanges thermiques et massiques entre les éléments discrétisés par des outils d'analyse de la mécanique des fluides numériques. Une autre possibilité est de considérer l'hypothèse de la cuve parfaitement brassée. Cette hypothèse permet de poser le volume d'air comme étant uniforme dans la serre et a été préconisée par Vanthoor et al. (2011), Esmaeli et Roshandel (2020) et Baptista et al. (2010) entres autres. Une approche mixte où la serre est discrétisée en plusieurs zones représentées par des cuves parfaitement brassées est aussi utilisée par Ha et al. (2015) ainsi que Baglivo et al. (2020).

L'hypothèse que le volume d'air dans la serre est une cuve parfaitement brassée ayant une température et une humidité uniforme semble raisonnable si l'air de la serre est bien mélangé sous l'action de ventilateurs de circulation. La formulation d'un bilan énergétique dans des logiciels ouverts comme Matlab et Dymola est très flexible alors que dans certains autres outils tels que le modèle de bâtiment multizone de TRNSYS, la modification du modèle par l'utilisateur est plus complexe. Le modèle proposé par Vanthoor et al. (2011) est à la base de la librairie de modélisation de serre développée dans le langage de programmation Modelica par Altes-Buch et al. (2019). Ce modèle est caractérisé par les relations entre les sept nœuds suivants :

1. Air extérieur (a_e),
2. Surface extérieure de l'enveloppe de la serre (env_e),
3. Surface intérieure de l'enveloppe de la serre (env_i),
4. Air intérieur de la serre (a_i),
5. Canopée (pl),
6. Sol de la serre (g), discrétisé en n couches,
7. Espace d'air supérieur délimité par l'écran thermique ($écran$).

Lorsque l'écran thermique est ouvert, le nœud a_i et le nœud *écran* sont combinés et le modèle de Vanthoor et al. (2011) est alors limité aux six nœuds présentés à la Figure 1.14. Les relations entre les nœuds y sont aussi présentées.

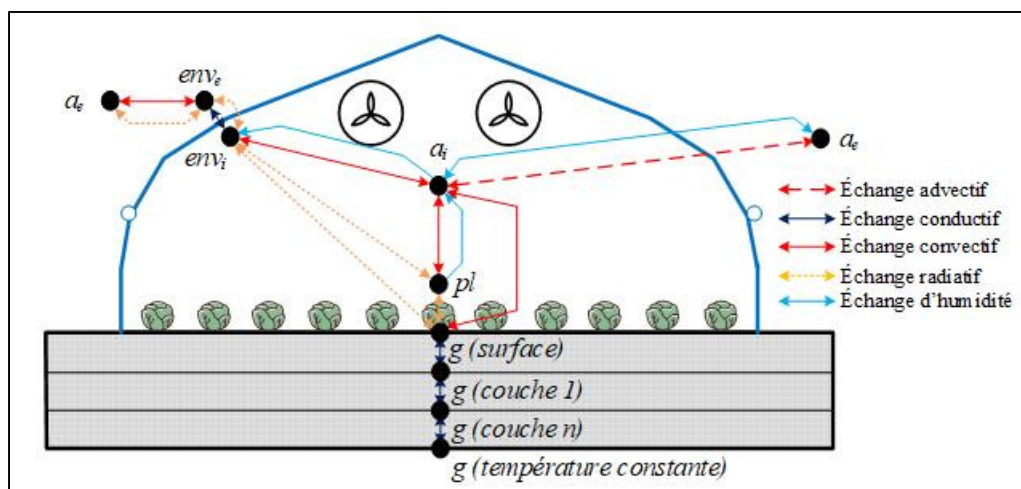


Figure 1.14 Représentation des échanges thermiques et massiques

Trois types d'échanges thermiques existent entre les différents nœuds de calculs. Les échanges de chaleur sensibles non-radiatifs, comportent les échanges par conduction et par convection-advection. Les échanges radiatifs sont les échanges de chaleur par rayonnement entre les différentes surfaces. Finalement, les échanges massiques d'humidité représentent les échanges massiques de vapeur d'eau contenue dans l'air provenant notamment des phénomènes d'évapotranspiration, de condensation sur les parois et de la ventilation. La résolution du bilan énergétique entre les différents nœuds du modèle de Vanthoor et al. (2011) présentés à la Figure 1.14 est détaillée dans l'ANNEXE I.

Échanges thermiques sensibles

Les échanges de chaleur sensibles sont de quatre types, soient les échanges par advection-convection entre deux fluides, les échanges conductifs à travers une paroi solide, les échanges convectifs entre une surface et un fluide et les échanges par rayonnement.

Les échanges thermiques sensibles par l'infiltration et la ventilation sont causés par le phénomène d'advection-convection entre l'air extérieur introduit et l'air intérieur de la serre. Cet échange est calculé par l'équation (1.5).

$$Q_{adv_{e-i}} = \dot{m}_{a_{e-i}} \cdot C p_a \cdot (T_{a_e} - T_{a_i}) \quad (1.5)$$

Où $\dot{m}_{a_{e-i}}$ est le débit massique d'air extérieur en kg.s^{-1} , $C p_a$ est la capacité thermique spécifique de l'air en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, T_{a_e} est la température de l'air extérieur de la serre en K et T_{a_i} est la température de l'air intérieur de la serre en K.

La conduction en régime transitoire peut être résolue à l'aide de la méthode numérique de résolution par éléments finis. Cette méthode est utilisée en négligeant l'échange radiatif à ondes longues entre les deux parois de l'enveloppe dans le modèle de Vanthoor et al. (2011), tel que détaillé à l'ANNEXE I. D'autres méthodes de résolution numériques peuvent être employées pour résoudre le problème de la conduction transitoire, par exemple la méthode de résolution par fonctions de transferts (CTF), tel qu'intégré à TRNSYS (Klein et al., 2017) selon une démarche proposée par Mitalas et Arseneault (1972).

Les échanges de chaleur par convection entre une surface et l'air intérieur sont calculés par l'équation (1.6), présentée ici pour l'échange par convection naturelle entre l'air intérieur de la serre et la surface intérieure de l'enveloppe. L'échange entre l'air extérieur et la surface extérieure de l'enveloppe est calculée de la même manière en considérant la convection forcée en raison de l'action du vent sur la paroi.

$$Q_{conv_{env_i}} = h_i \cdot A_i \cdot (T_{env_i} - T_{a_i}) \quad (1.6)$$

L'équation (1.7) présente la définition du coefficient de convection entre l'air et une surface.

$$h = \frac{Nu \cdot k_a}{L_c} \quad (1.7)$$

Où Nu représente le nombre de Nusselt adimensionnel, k_a est la conductivité thermique de l'air en $W.m^{-1}.K^{-1}$ et L_c est la longueur caractéristique en m.

La définition du nombre de Nusselt dépend du type de convection, de la géométrie et de la rugosité de la surface. En raison de l'action du vent, l'échange de chaleur à la surface extérieure se fait principalement par convection forcée et le coefficient de convection extérieur de l'enveloppe dépend alors du nombre de Reynolds, défini par la vitesse de l'écoulement à la paroi (Papadakis et al., 1992). L'équation (1.8) présente la définition du nombre de Nusselt dans le cas de la convection forcée.

$$Nu_{forcée} = C_f \cdot Re^n \cdot (Pr)^{0,33} \quad (1.8)$$

Où C_f et n sont des coefficients déterminés empiriquement dépendants de la valeur du nombre de Reynolds Re (Bergman et al., 2011) et du nombre de Prandtl Pr .

À l'intérieur de la serre, la vitesse de l'air est faible, l'échange de chaleur à la surface intérieur est alors modélisé par de la convection naturelle (Papadakis et al., 1992). Le coefficient de convection intérieur dépend alors du nombre de Grashof, défini par la différence de température entre la couverture et l'air intérieur. L'équation (1.9) présente la définition du nombre de Nusselt dans le cas de la convection naturelle.

$$Nu_{naturelle} = C_n \cdot (Gr \cdot Pr)^k \quad (1.9)$$

Où C_n et k sont des coefficients empiriques théoriques, k dépend de la nature de l'écoulement à la surface tandis que C_n varie aussi en fonction de la condition frontière considérée à la surface soit un flux de chaleur constant ou une température constante (Bergman et al., 2011).

Cependant, l'application des conditions appropriées pour le choix des paramètres C_n et k ou C_f et n et la résolution des équations (1.8) et (1.9) à chaque pas de temps est exigeante en temps de calcul, car une résolution numérique de la distribution de la vitesse et de la température de

l'air dans la serre serait requise. De nombreuses études ont développées des relations empiriques simples applicables dans la plupart des conditions retrouvées pour les serres. Le Tableau 1.7 présente quelques équations empiriques identifiées dans une revue de littérature par Roy et al. (2002) pour les coefficients de convection extérieur et intérieur à la paroi de l'enveloppe et à la surface du sol en serre.

Tableau 1.7 Équations empiriques simples pour les coefficients de convection en serre

Contexte	Coefficient de convection extérieur [W.m-2.K-1]	Coefficient de convection intérieur [W.m-2.K-1]	Référence
Serre tunnel en PVC	$1,32 \cdot (T_{a_e} - T_{env_e})^{0,25} + 3,2 \cdot V^{0,8}$	$4,3 \cdot (T_{a_i} - T_{env_i})^{0,25}$	Kittas (1986)
Serre en polyéthylène	$7,2 + 3,84 \cdot V$	$\approx 7,2$	Garzoli et Blackwell (1987)
Serre en polyéthylène double	$0,95 + 6,76 \cdot V^{0,49}$	$si\ 0 < T_{env_i} - T_{a_i} < 11,1^{\circ}\text{C}$ $1,95 \cdot (T_{env_i} - T_{a_i})^{0,3}$ $si\ 0 < T_{a_i} - T_{env_i} < 13,2^{\circ}\text{C}$ $2,21 \cdot (T_{a_i} - T_{env_i})^{0,33}$	Papadakis et al. (1992)
Collecteurs solaires	$2,8 + 3 \cdot V$	$1,247 \cdot (T_{a_i} - T_{env_i})^{1/3}$	Watmuff et al. (1977)
Sol d'une serre à travées multiples	N/A	$1,89 \cdot (T_g - T_{a_i})^{1/4}$	De Halleux (1989)
Surface horizontale	$7,2 + 3,8 \cdot V$	$si\ T_g - T_{a_i} > 0^{\circ}\text{C}$ $2,11 \cdot (T_g - T_{a_i})^{0,31}$ $si\ T_g - T_{a_i} < 0^{\circ}\text{C}$ $1,87 \cdot (T_{a_i} - T_g)^{0,25}$	Klein et al. (2018) TESS (2012)

Parmi les équations empiriques présentées dans le Tableau 1.7, il est possible de constater que le coefficient de convection à la surface extérieure de l'enveloppe de la serre est généralement estimé comme ne dépendant que de la vitesse du vent (V , en m.s^{-1}). Le coefficient de

convection à la surface intérieure de l'enveloppe de la serre ne considère que la différence de température entre l'air intérieur et la surface intérieure de l'enveloppe.

Deux types d'échanges radiatifs sont considérés dans la plupart des modèles énergétiques de serres, soit le rayonnement solaire à ondes courtes (Q_{SW}), généralement considérée comme englobant les longueurs d'onde de 400 à 700 nm, ainsi que le rayonnement à ondes longues (Q_{LW}), qui englobe les longueurs d'ondes supérieures à 700 nm. le rayonnement solaire à ondes courtes peut être absorbé ou réfléchi par les surfaces opaques et il peut être absorbé, réfléchi ou transmis à travers les surfaces transparentes et translucides (Bergman et al., 2011). L'équation (1.10) présente le flux de chaleur causé par l'absorption du rayonnement solaire à ondes courtes par la couche extérieure de l'enveloppe d'une serre.

$$Q_{SW_{abs_e}} = \alpha_e \cdot Q_{SW_e} \quad (1.10)$$

Où α_e est l'absorptivité du matériau de l'enveloppe au rayonnement solaire et Q_{SW_e} est le rayonnement solaire à ondes courtes incident sur la surface extérieure de l'enveloppe en J.

L'équation (1.11) présente le flux de chaleur radiatif transmise à travers la couche extérieure transparente de l'enveloppe d'une serre.

$$Q_{SW_{trans_e}} = \tau_e \cdot Q_{SW_e} \quad (1.11)$$

Où τ_e est la transmissivité du matériau de l'enveloppe de la serre au rayonnement solaire.

L'échange par rayonnement à ondes longues avec la voûte céleste dépend de la température effective de celle-ci ainsi que de la température de la surface extérieure de l'enveloppe et de son émissivité. L'équation (1.12) présente l'échange par rayonnement à ondes longues entre le ciel et la surface extérieure de l'enveloppe, assumant que l'ensemble du rayonnement à ondes longues émis par la surface extérieure de l'enveloppe est échangé avec le ciel et que la température effective du ciel est uniforme (Bergman et al., 2011).

$$Q_{LW_{sky}} = A_e \cdot \sigma \cdot \varepsilon_e \cdot (T_{env_e}^4 - T_{sky}^4) \quad (1.12)$$

Où A_e est la surface extérieure de l'enveloppe en m^2 , σ est la constante de Stephan-Boltzmann, ε_e est l'émissivité de la surface extérieure de l'enveloppe au rayonnement à ondes longues et T_{sky} est la température effective du ciel en K. Celle-ci peut être fournie avec des fichiers de données météorologiques standardisés ou être évaluée à l'aide de modèles simples en fonction de la température, de l'humidité et de la couverture nuageuse du ciel. Plusieurs modèles applicables ont été recensés par Algarni et Nutter (2015), notamment le modèle de Clark et Allen (1978), validé pour une grande plage de température et le modèle de Martin et Berdahl (1984) disponible comme composante intégrée dans TRNSYS. La sélection du modèle à utiliser doit être faite en fonction des données disponibles et de la localisation géographique du bâtiment.

L'équation (1.13) permet de calculer l'émissivité de la voûte céleste en fonction de la couverture nuageuse du ciel CF de 0 à 1 (0 étant un ciel dégagé et 1 un ciel couvert), de la température bulbe sec T_{a_e} en K et de la température du point de rosée T_{dpe} de l'air extérieur en K. Ce modèle est valide pour des températures de point de rosée de l'air entre $-20,2^\circ C$ et $24,5^\circ C$ (Clark et Allen, 1978).

$$\varepsilon_{sky} = (1 + 0,0224 \cdot (CF \cdot 10) - 0,0035 \cdot (CF \cdot 10)^2 + 0,00028 \cdot (CF \cdot 10)^3) \quad (1.13)$$

$\cdot \varepsilon_{sky.clair}$

Où $\varepsilon_{sky.clair}$ est l'émissivité d'un ciel dégagé, sans couverture nuageuse calculée par l'équation (1.14) selon le modèle de Clark et Allen (1978).

$$\varepsilon_{sky.clair} = 0,787 + 0.7641 \cdot \ln\left(\frac{T_{dpe}}{273}\right) \quad (1.14)$$

En connaissant l'émissivité effective de la voûte céleste, la température atmosphérique est alors calculée par l'équation (1.15) selon le modèle de Clark et Allen (1978).

$$T_{sky} = T_{a_e} \cdot \varepsilon_{sky}^{1/4} \quad (1.15)$$

L'échange par rayonnement à ondes longues entre les différentes surfaces dans l'enceinte peut être calculé par la méthode du facteur de forme entre deux surfaces (Bergman et al., 2011), F_{i-j} . Celui-ci est une valeur située entre 0 et 1 selon la proportion de la surface i visible par la surface j . Dans le modèle de Vanthoor et al. (2011), l'enveloppe de la serre est considérée comme ayant une seule surface intérieure qui est exposée seulement à la surface de la canopée. Dans ce cas, le facteur de forme F_{env_i-pl} est égal à 1. L'équation (1.16) présente le calcul du rayonnement à ondes longues émis par la surface intérieure de l'enveloppe vers la canopée.

$$Q_{LW_{i-pl}} = F_{env_i-pl} \cdot A_{env_i} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{env_i} \cdot (T_{env_i}^4 - T_{pl}^4) \quad (1.16)$$

Le Tableau A III-1 à l'ANNEXE III est tiré de Castilla (2013) et présente les propriétés optiques de différentes surfaces opaques communément retrouvées dans les serres.

Échanges massiques de vapeur d'eau

Les échanges de vapeur d'eau entre les différents nœuds de calcul du modèle sont des échanges massiques et peuvent être accompagnés ou non d'un échange de chaleur latente. Ceux-ci sont causés par quatre phénomènes (Baptista et al., 2010; Costantino et al., 2021; Vanthoor et al., 2011) :

1. La ventilation (entre l'air intérieur et l'air extérieur de la serre);
2. La condensation (entre l'air intérieur et la surface intérieure de l'enveloppe de la serre);
3. L'évapotranspiration (entre l'air intérieur de la serre et la canopée);
4. L'évaporation de l'eau d'un sol humide et absorption d'humidité par un sol sec.

La ventilation et l'infiltration d'air remplace l'air intérieur par de l'air extérieur. En considérant les conditions uniformes de l'air intérieur de la serre, l'échange de vapeur d'eau entre l'air à l'intérieur et l'air à l'extérieur de la serre est estimé à l'aide de l'équation (1.17), basée sur le débit volumique de ventilation et d'infiltration d'air frais.

$$VP_{e-i} = \dot{V}_{e-i} \cdot \frac{M_{H_2O}}{R} \cdot \left(\frac{P_{H_2O_i}}{T_{a_i}} - \frac{P_{H_2O_e}}{T_{a_e}} \right) = \dot{m}_{e-i} \cdot (\omega_e - \omega_i) \quad (1.17)$$

Où VP_{e-i} est l'échange de vapeur d'eau entre l'air intérieur de la serre et l'air extérieur en kg.s^{-1} d'eau, \dot{V}_{e-i} est le débit volumique d'air provenant de l'extérieur (soit la somme des débits d'infiltration, de ventilation naturelle et de ventilation forcée) en $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. M_{H_2O} est la masse molaire de l'eau en kg.mol^{-1} , R est la constante universelle de gaz parfait de $8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$. $P_{H_2O_i}$ et $P_{H_2O_e}$ représentent la pression de vapeur d'eau dans l'air intérieur et l'air extérieur de la serre, respectivement, en Pa. T_{a_i} et T_{a_e} représentent la température de l'air intérieur et l'air extérieur de la serre. \dot{m}_{e-i} est le débit massique d'air sec entre l'extérieur et l'intérieur de la serre en kg.s^{-1} . ω_e et ω_i sont les valeurs de l'humidité absolue dans l'air intérieur et dans l'air extérieur de la serre respectivement, en $\text{kg H}_2\text{O.kg air sec}^{-1}$. Le débit de ventilation à travers un événement de toit peut être calculé à l'aide du modèle proposé par Boulard et Baille (1995). Ce modèle est présenté à l'équation (1.18).

$$\dot{V}_{e-i} = \frac{A_{eff}}{2} \cdot A_{event} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\Delta T_a}{T_{a_e}} \cdot \frac{H_{event}}{4} + C_v \cdot V^2} \quad (1.18)$$

Où A_{eff} est l'aire d'ouverture effective de l'événement et A_{event} est l'aire totale de celui-ci, toutes deux en m^2 , g est l'accélération gravitationnelle de $9,81 \text{ m.s}^{-2}$, ΔT_a est la différence de température entre l'air intérieur et extérieur en K, H_{event} est la hauteur verticale de l'ouverture de l'événement en m, C_v est le coefficient de pression du vent et V la vitesse du vent en m.s^{-1} .

La condensation de la vapeur d'eau sur la surface intérieure de la serre $VP_{a_i-env_i}$ dépend de la pression de vapeur dans l'air intérieur et de la pression de vapeur saturée à la température de la surface intérieure. Vanthoor et al. (2011) la calcule par l'équation (1.19).

$$VP_{a_i-env_i} = 0 \text{ si } P_{H_2O_i} < P^*(T_{env_i})$$

$$VP_{a_i-env_i} = \frac{h_{env_i} \cdot A_{env}}{\gamma \cdot \lambda} \cdot (P_{H_2O_i} - P^*(T_{env_i})) \text{ si } P_{H_2O_i} \geq P^*(T_{env_i}) \quad (1.19)$$

Où $VP_{a_i-env_i}$ est l'échange de vapeur d'eau entre l'air intérieur de la serre et la surface intérieure de l'enveloppe en kg.s^{-1} , h_{env_i} est le coefficient de convection entre la surface intérieure de l'enveloppe et l'air de la serre en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, A_{env} est l'aire de la surface intérieure de l'enveloppe en m^2 , γ représente la constante psychrométrique de l'air en Pa.K^{-1} , λ représente la chaleur latente d'évaporation de l'eau en J.kg^{-1} , $P_{H_2O_i}$ représente la pression de vapeur de l'air intérieur en Pa et $P^*(T_{env_i})$ représente la pression de vapeur saturante à la température de la surface intérieure de l'enveloppe en Pa.

La condensation de la vapeur d'eau sur la paroi de l'enveloppe génère un échange de chaleur latente entre celle-ci et l'air intérieur de la serre. L'équation (1.20) définit cet échange.

$$Q_{latent_{a_i-env_i}} = VP_{a_i-env_i} \cdot \lambda \quad (1.20)$$

Où $Q_{latent_{a_i-env_i}}$ est l'échange de chaleur entre l'air intérieur de la serre et la surface intérieure de l'enveloppe de la serre en W.

L'échange de vapeur d'eau par évapotranspiration de la canopée est fonction du rayonnement photo actif reçu par les plantes et du déficit de pression de vapeur dans l'air. Cet échange est influencé par de nombreux paramètres de la canopée tels que la résistance stomatale r_s et la résistance aérodynamique r_a de la canopée. L'équation de Penman-Monteith (1.21) permet d'estimer l'évapotranspiration (Allen et al., 1998).

$$VP_{pl-a_i} \cdot \lambda = \frac{\Delta \cdot Q_{sw} + \rho_a \cdot Cp_a \cdot \frac{P_{H_2O_{sat}} - P_{H_2O_a}}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot (r_a + r_s)} \quad (1.21)$$

Où VP_{pl-a_i} est l'échange de vapeur d'eau entre la canopée et l'air intérieur de la serre en kg.s^{-1} , Δ est la pente de la courbe liant la température et la pression de la vapeur d'eau en Pa.K^{-1} et γ est la constante psychrométrique en Pa.K^{-1} .

Cette équation a été développée pour le calcul de l'évapotranspiration de l'agriculture extérieure. D'autres modèles ont été proposés pour représenter cet échange dans les conditions d'agriculture en environnement contrôlé et ceux-ci sont recensés dans une revue de littérature de Katsoulas et Stanghellini (2019) pour une application en serre. Le choix d'un modèle pour définir cet échange est abordé en détail à la sous-section 3.2.4. Les échanges d'humidité par le sol sont difficiles à quantifier. Allen et al. (1998) considèrent l'évaporation du sol en connaissant les données d'irrigation. Cette méthode ne permet pas de modéliser l'absorption d'humidité par le sol sec. Costantino et al. (2021) contournent ce problème en appliquant un facteur de capacitance en humidité au volume d'air de la serre.

1.3.3 Simulation énergétique en contexte de serre

La simulation énergétique est souvent utilisée pour analyser la performance énergétique de serres. Différents outils de simulation énergétiques sont utilisés et différents modèles ont été développés pour représenter les phénomènes physiques rencontrés dans ces types d'espaces par les auteurs d'étude recensés dans la littérature. Les procédures de vérification ou de calibration utilisées afin de confirmer la capacité de prédiction et la précision des modèles développés dans ces études diffèrent aussi selon les études.

Le Tableau 1.8 présente une revue de plusieurs études récentes en indiquant le contexte, l'outil de simulation utilisé, les modèles d'évapotranspiration et de ventilation considérés ainsi que les indicateurs de performance étudiés et les critères statistiques utilisés.

Tableau 1.8 Études récentes portant sur la simulation énergétique de serres

Type de serre et localisation	Modélisation			Critères évalués	Critères statistiques utilisés	Source
	Outil	Ventilation et systèmes mécaniques	Canopée et condensation			
Serre chinoise, Iran	Développé par les auteurs	Ventilation forcée à débit constant. Pas de systèmes mécaniques additionnels dans la serre.	Évapotranspiration non considérée. Condensation aux parois non considérée	Heures où : $10^{\circ}\text{C} < T_{ai} < 32^{\circ}\text{C}$; $T_{ai} < 10^{\circ}\text{C}$; $T_{ai} > 32^{\circ}\text{C}$	Erreur maximale, RMSE et R^2 sur T_{ai} (un jour)	Esmaeli et Roshandel (2020)
Serre en arche à travées multiples, Portugal	Développé par les auteurs	Ventilation naturelle (Boulard et Baille, 1995). Pas de systèmes mécaniques additionnels dans la serre.	Évapotranspiration tomate. Condensation aux parois non considérée.	Prédiction de T_{ai} , HR_{ai} , T_g et T_{pl}	RMSE et R^2 sur T_{ai} , HR_{ai} , T_g et T_{pl} (6 jours)	Baptista et al. (2010)
Serre sur toit, Royaume-uni	TRNSYS	Ventilation forcée, contrôle proportionnel en température. Pas de systèmes mécaniques additionnels dans la serre.	Évapotranspiration tomate Condensation aux parois non considérée.	Consommation énergétique; Productivité de la culture.	Profil temporel de T_{ai} , HR_{ai} et CO_{2i} (5 jours)	Ward et al. (2015)
Serre à travées multiples, Italie	Développé par les auteurs	Ventilation forcée, contrôle proportionnel en humidité. Chauffage idéal avec rendement thermique, Refroidissement évaporatif.	Évapotranspiration tomate (Jolliet, 1994) Condensation aux parois non considérée	Prédiction de T_{ai} et HR_{ai} , Consommation énergétique	NMBE, RMSE et CVRMSE T_{ai} , HR_{ai} et la consommation électrique (un mois)	Costantino et al. (2021)
Serre à arche gothique, Multiples	MATLAB	Ventilation naturelle (Boulard et Baille, 1995). Pas de systèmes mécaniques dans la serre.	Évapotranspiration tomate (Vanthoor et al., 2011) Condensation aux parois considérée	Prédiction de T_{ai} , HR_{ai} et CO_{2i}	CVRMSE sur T_{ai} , HR_{ai} et CO_{2i} (6 jours)	Vanthoor et al. (2011)
Serre à arche gothique, Corée du Sud	TRNSYS	Ventilation naturelle. Chauffage idéal avec rendement thermique.	Condensation aux parois non considérée	Prédiction de T_{ai} , Demande en chauffage et en refroidissement	RMSE et R^2 sur T_{ai} , (5 jours)	(Rasheed et al., 2018)

En analysant le Tableau 1.8, la méthode utilisée pour la vérification ou calibration varie beaucoup quant à la durée de la période utilisée pour la comparaison avec des données mesurées. Les indicateurs statistiques utilisés pour la comparaison varient aussi, mais l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2) sont souvent utilisés pour le profil en température et en humidité.

Les modèles de ventilation et d'évapotranspiration considérés varient aussi entre les différentes études, ces modèles influencent le bilan énergétique ainsi que le bilan massique de l'humidité dans la serre. Parmi les études recensées dans le Tableau 1.8, seules les études par Costantino et al. (2021), Vanthoor et al. (2011) et Baptista et al. (2010) incluent une validation par rapport à l'humidité dans la serre utilisant des indicateurs statistiques. Cependant, ces études ne rapportent pas de résultats pour le coefficient de détermination R^2 entre les données mesurées et les données simulées pour l'humidité relative. Cet indicateur statistique serait pertinent dans cette analyse, car il permet de vérifier que le modèle d'évapotranspiration et de ventilation naturelle se comportent tel qu'attendu en mesurant le pouvoir de prédiction de l'humidité relative dans la serre simulée par rapport à la distribution des données mesurées.

Parmi les études présentées dans le Tableau 1.8, aucune étude ne s'est attardée à valider le modèle proposé pour la distribution de l'éclairage naturel dans la serre. Cette étape de validation devrait être réalisée en premier, puisque le rayonnement solaire dans la serre est le principal intrant de ce système et influence significativement le bilan énergétique de la serre et l'évapotranspiration de la canopée. Wang et al. (2021) ont utilisé la méthode du traçage des rayons incidents pour étudier la distribution de l'éclairage naturel dans une serre pour différentes localisations, cette étude comparative n'a pas de validation par rapport à des données mesurées. Zhang et al. (2020) ont effectué une étude par traçage des rayons incidents incorporant des modèles géométriques de plants de tomates dans la serre pour simuler l'interception du rayonnement solaire par la canopée. Pour une journée, le RMSE pour le rayonnement solaire dans la serre sur une base horaire est de $33,65 \text{ W.m}^{-2}$ et le coefficient de détermination sur cette variable est de 0,94. Toutefois, le temps et la puissance de calcul requis rendent une telle étude difficilement justifiable (20h pour une journée simulée).

1.4 Indicateurs de performance

L'utilisation d'indicateurs de performance pour analyser les résultats de simulation énergétique d'un bâtiment permet de mieux comparer l'impact de différents scénarios. Dans le contexte d'un bâtiment à bureaux, par exemple, les indicateurs de performances observés visent à quantifier le confort thermique des occupants et la consommation énergétique. Dans le contexte d'un bâtiment passif, des indicateurs différents sont utilisés pour quantifier l'opération passive du bâtiment par rapport aux besoins des occupants (Kesik et Stern, 2007).

Lors de l'analyse d'une serre par STD, les occupants qu'il faut considérer sont les plantes qui y sont cultivées étant donné que l'objectif est d'augmenter les profits associés à la production dans la serre. La masse des produits doit être augmentée tandis que la consommation d'énergie de la serre doit être minimisée. La consommation énergétique est intimement liée aux émissions de GES de la serre qui doivent aussi être minimisées. Selon ce constat, le ratio de la masse de produit sur la consommation énergétique de la serre serait l'indicateur le plus pertinent pour l'analyse d'efficacité énergétique d'une serre (Vadiee et Martin, 2013).

Cet indicateur est bien adapté pour des études expérimentales, où la masse de fruit produite peut être mesurée. Cependant, pour des études par STD, il existe peu de modèles capables de prédire la croissance des plantes en fonction des conditions intérieures simulées par le modèle énergétique de la serre. Quelques-uns existent, Ward et al. (2015), par exemple ont développé un modèle de tomate permettant de prédire la croissance et la production de matière organique et l'ont programmé afin d'en faire une composante utilisable dans TRNSYS. Cependant, les temps de calculs pour ce modèle sont élevés et de tels modèles ne sont pas disponibles pour une grande variété de plantes cultivées en serre. Xu et al. (2010) ont proposé un modèle de croissance simple basée sur l'indice photo-thermique, qui considère l'effet de la température de l'air sur le rayonnement photo actif utile à la croissance de la canopée, ce modèle a été validé pour différentes plantes cultivées en serre comme le poivron et le concombre.

Une alternative afin de prendre des décisions de conception ou pour évaluer des mesures d'efficacité énergétiques apportées à une serre à l'aide d'analyses par STD est de définir des indicateurs de performance à observer afin de confirmer que les conditions maintenues dans la serre seront favorables à la croissance des plantes (Esmaeli et Roshandel, 2020). Le choix d'indicateurs de performance approprié est important dans le contexte de serres froides et de serres passives afin d'évaluer la capacité à maintenir les conditions appropriées.

Cette sous-section vise dans un premier lieu à classifier les indicateurs pertinents en fonction du contexte de l'étude à réaliser, puis en second lieu à identifier dans la littérature les indicateurs de performance utilisés dans des études par simulation énergétique dans différents contextes d'agriculture en serres. Par exemple, certains indicateurs sont plus pertinents pour l'étude d'une serre passive alors que d'autres sont plus pertinent pour une serre équipée de systèmes actifs permettant le contrôle de l'environnement. Ici-bas quelques exemples d'éléments à considérer pour la comparaison de la performance énergétique des serres :

1. Estimation de la durée de la saison de croissance thermique et de l'impact de mesures prises pour allonger celle-ci (serre froides, serre passives);
2. Évaluation de la demande et de la consommation en chauffage et de l'impact de mesures d'efficacité énergétique sur celle-ci (serre chauffées, serres actives);
3. Évaluation du risque de condensation sur les plantes, sur l'enveloppe et de l'impact de mesures prises pour limiter celle-ci (serres froides et serres passives principalement);
4. Évaluation des risques posés par les températures extrêmes (gel, surchauffe) pour les plantes et de l'impact de mesures prises pour limiter ceux-ci (serres froide ou chauffées, passives ou actives);
5. Prédiction du rendement de la serre (serres froides ou chauffées, passives ou actives).

Plusieurs indicateurs de performance sont utilisés dans la littérature afin d'analyser les résultats de la STD dans le contexte des serres. Deux catégories d'indicateurs de performances sont distinguées, soit les indicateurs liés à l'analyse thermique de la serre et les indicateurs liés à l'analyse de l'éclairage naturel et artificiel dans la serre. Le Tableau 1.9 présente les indicateurs de performances répertoriés dans la littérature utilisés pour l'analyse thermique de la serre.

Tableau 1.9 Indicateurs de performance pour l'analyse thermique de la serre

Indicateur	Définition	Unité	Utilisé par
Température moyenne journalière	Température moyenne de l'air intérieur sur une période d'une journée.	[°C]	Bastien et Athienitis (2018)
Écart de température journalière	Écart de température journalier maximal.	[°C]	Bastien et Athienitis (2018)
Indice de surchauffe (OHI)	Nombre d'heures où la température intérieure est plus élevée que la température maximale biologique.	[h]	Esmaeli et Roshandel (2020)
Indice de gel (OCI)	Nombre d'heures où la température intérieure est sous la température de gel ou la température minimale biologique.	[h]	Esmaeli et Roshandel (2020)
Heures de points de consignes non respectés (UH)	Nombre d'heures durant lesquelles la température est à l'extérieur du point de consigne.	[h]	Kesik et Stern (2007)
Indice de confort thermique (TCI)	Nombre d'heures durant lesquelles la température intérieure est dans une plage acceptable.	[h]	Esmaeli et Roshandel (2020)
Durée de la saison de croissance thermique	Période durant laquelle la température permet la croissance.	[jour]	Walther et Linderholm (2006) Skaggs et Baker (1985)
Degrés-jours de croissance (GDD)	Nombre de degré-jours passés dans la plage de température optimale de croissance.	[degrés-jours]	Xu et al. (2010)
Consommation énergétique en chauffage, refroidissement	Énergie consommée annuellement pour maintenir une plage de température donnée.	[kWh, kWh.m ⁻²]	Kesik et Stern (2007) Vadiee et Martin (2014)
Demande maximale en chauffage, refroidissement	Besoin maximal en chauffage ou refroidissement nécessaire pour maintenir une plage de température donnée.	[kW]	Vadiee et Martin (2014)
Rendement énergétique (ER)	Rapport entre le rendement d'une serre (masse de produit) et l'énergie consommée par les systèmes.	[kg.kWh ⁻¹]	Vadiee et Martin (2013)

Certains indicateurs de performance présentés dans le Tableau 1.9 pour l'analyse thermique par STD de serres peuvent ne pas s'appliquer en fonction du contexte de l'étude. Pour l'étude du profil thermique dans une serre passive, l'utilisation d'indicateurs de performance liés à la température sont évidemment préférés aux indicateurs de performances liés à l'énergie de chauffage ou de climatisation requise (Esmaeli et Roshandel, 2020). D'un autre côté, pour comparer la performance de deux serres actives, les indicateurs liés à l'énergie consommée dans la serre sont favorisés. Le Tableau 1.10 présente d'autres indicateurs de performance répertoriés qui s'appliquent à l'étude des résultats de STD pour l'analyse de l'éclairage naturel et de l'éclairage artificiel dans la serre.

Tableau 1.10 Indicateurs de performance pour l'analyse de l'éclairage dans la serre

Indicateur	Définition	Unité	Utilisé par
Intégrale de l'éclairage journalier (DLI)	Rayonnement photo actif disponible sur une période de 24h (intégrale journalière).	[mol.d ⁻¹ .m ⁻²]	Moe et al. (2005)
Densité du flux de photon photo actifs (PPFD)	Rayonnement photo actif disponible à un moment donné dans la serre.	[μmol.s ⁻¹ .m ⁻²]	Moe et al. (2005)
Facteur d'autonomie solaire (DAF)	Fraction/pourcentage du besoin en rayonnement photo actif fourni par l'éclairage naturel	[-]	Kesik et Stern (2007)
Indice photo-thermique (PTI)	Indice combiné de l'impact de la température et du PAR disponible pour prédire l'effet sur la photosynthèse de la plante	[MJ.m ⁻²]	Xu et al. (2010)
Consommation énergétique de l'éclairage artificiel	Consommation d'électricité requise pour l'éclairage artificiel installé dans la serre.	[kWh, kWh.m ⁻²]	Albright et al. (2000)

Dans le Tableau 1.10, certains indicateurs ne s'appliquent évidemment pas à l'étude d'une serre qui n'est pas équipée d'un éclairage artificiel puisqu'ils caractérisent la contribution de celui-ci à la croissance des plantes ainsi que son impact sur la consommation énergétique de la serre. Le calcul des différents indicateurs de performance présentés dans le Tableau 1.9 et dans le Tableau 1.10 sont présentés en détail dans l'ANNEXE IV.

1.5 Constats

L'analyse de la revue de la littérature a mis en lumière l'absence d'une méthodologie éprouvée pour le développement et la calibration d'un modèle de simulation thermique dynamique en contexte de serre. Effectivement, dans les études répertoriées, les modèles développés, la méthodologie de calibration suivie ainsi que les indicateurs statistiques utilisés pour confirmer la précision des résultats de la simulation par rapport à des données mesurées varient.

De plus, en l'absence d'un modèle de croissance permettant de prédire le rendement dans la serre modélisée, il est difficile de traduire les résultats d'une simulation thermique dynamique en conclusions pouvant être communiquées aux opérateurs de la serres et aux acteurs du secteur agronomique. La consommation énergétique du chauffage est communément utilisée et est effectivement pertinente dans le contexte d'une serre active. Cependant, pour une serre non chauffée où la température est flottante, l'utilisation d'indicateurs de performance appropriés permettrait de caractériser le profil de température et d'éclairage naturel dans la serre afin de prédire si ceux-ci sont adéquats pour les cultures souhaitées et permettre d'établir des calendriers de productions pour différentes cultures. De nombreux indicateurs adéquats existent provenant du domaine agronomique et certains auteurs ont effectivement commencé à jumeler ceux-ci au domaine de la simulation thermique dynamique de serres (Esmaeli et Roshandel, 2020).

Les objectifs de ce projet de recherche s'inscrivent donc dans la continuité des études précédentes en visant d'abord à développer une approche pour la modélisation, puis proposer une procédure pour la calibration d'un modèle de serre et finalement utiliser des indicateurs de performance appropriés afin de tirer des conclusions sur le profil de température et d'éclairage naturel dans une serre à l'aide de résultats d'une simulation thermique dynamique.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Les objectifs de ce mémoire sont de : (1) Développer un modèle de serre à l'aide d'un outil de STD en contexte québécois; (2) Procéder à une calibration du modèle développé pour ainsi évaluer sa capacité de prédiction en comparant les résultats obtenus à des données mesurées; (3) Utiliser ce modèle dans des études de cas et analyser les résultats à l'aide d'indicateurs de performance adaptés au contexte de l'étude.

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour répondre à ces objectifs. Celle-ci inclut la sélection d'un outil de STD, la procédure suivie pour le développement du modèle énergétique de la serre et les étapes de calibration du modèle. La description des études de cas réalisées à l'aide du modèle calibré est ensuite présentée.

2.1 Sélection de l'outil de STD

Le modèle de serre est créé en utilisant le logiciel TRNSYS (Klein et al., 2017). Ce logiciel est sélectionné pour plusieurs raisons. Premièrement, cet outil dispose d'une librairie de modèles développés pour des phénomènes physiques (comme la distribution du rayonnement solaire sur les surfaces inclinées), de plusieurs composantes de systèmes CVCA et de systèmes à énergies renouvelables pour utilisation en régime transitoire (Klein et al., 2018; TESS, 2012). Deuxièmement, il est possible de programmer des modèles additionnels pour représenter des phénomènes qui ne sont pas inclus dans les librairies disponibles. Ward et al. (2015) et Talbot et Monfet (2020) ont exploité cette possibilité pour inclure des modèles de tomates et de laitues dans des simulations énergétiques, respectivement.

Troisièmement, le modèle intégré du bâtiment multizone (Type56) a été utilisé pour modéliser des serres par Rasheed et al. (2018) et Vadiée et Martin (2013), entre autres. Ce modèle versatile permet de modéliser une zone en trois dimensions à l'aide d'un outil de conception 3D intégré dans le logiciel SketchUp. La modélisation en 3D de la serre permet le calcul des

facteurs de forme des surfaces entre elles par le logiciel TRNBuild qui agit comme l'interface entre TRNSYS et le modèle 3D réalisé dans SketchUp (Trimble, 2017) pour faciliter le calcul du bilan des échanges par rayonnement à ondes longues et de la distribution du rayonnement solaire sur les surfaces en tenant compte de la position du soleil dans le ciel, de l'orientation du bâtiment et de la présence d'éléments d'ombrages (Klein et al., 2017).

Quatrièmement, l'intégration du moteur de calcul COMIS (Dorer et al., 2001) au modèle du bâtiment multizone (TRNFLOW) permet aussi de tirer profit de procédures de calcul intégrées pour estimer les débits de ventilation naturelle et mécanique dans l'espace ainsi que le transport de contaminant tels que le CO₂ (Weber et al., 2003). Ce moteur de calcul permet de calculer les débits massiques de ventilation et d'infiltration en fonction de la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la serre pour des ouvertures verticales, des ventilateurs et des interstices, entre autres.

Finalement, TRNSYS intègre une procédure basée sur le traçage des rayons incidents au modèle du bâtiment multizone afin de déterminer l'éclairage naturel dans la zone et contrôler l'éclairage artificiel en fonction de celui-ci (McDowell et al., 2017).

2.2 Développement du modèle

Une fois l'outil de STD sélectionné, la serre à modéliser doit être identifiée en fonction de la disponibilité de données expérimentales mesurées dans la serre qui pourront être utilisées pour la validation du modèle. Les étapes suivantes doivent ensuite être suivies pour la réalisation du modèle énergétique de la serre existante identifiée :

1. Définir la provenance des données météorologiques à utiliser pour simuler les conditions extérieures. Si pour la localisation de la serre identifiée il n'y a pas de fichiers de données standardisés disponibles, un fichier météorologique personnalisé doit être créé à partir de données mesurées;
2. Modéliser l'enveloppe de la serre identifiée, cette étape est caractérisée par les sous-étapes suivantes :

- a. modéliser la géométrie et l'orientation de la serre en 3D en se basant sur les dimensions et orientations relevées sur le site ou sur les plans et devis du fabricant de la serre;
 - b. définir les propriétés thermiques et optiques de l'enveloppe de la serre en se basant sur les données des fabricants des matériaux installés ou encore sur des données rapportées dans la littérature (voir Tableau A III-2, ANNEXE III);
 - c. modéliser les échanges massiques causés par l'infiltration d'air à travers l'enveloppe de la serre;
 - d. régler les paramètres pour l'analyse de l'éclairage naturel.
3. Modéliser le contact de la serre identifiée avec le sol selon les sous-étapes suivantes :
 - a. discrétiser le sol sous la serre afin de pouvoir résoudre les échanges thermiques entre la serre à l'aide de la méthode de résolution numérique par élément à volume finis;
 - b. définir les propriétés thermiques et optiques du terreau et du sol en se basant sur des tests expérimentaux ou des données rapportées dans la littérature (voir Tableau A III-1, ANNEXE III).
4. Intégrer un modèle de plante pour définir les échanges entre la canopée et l'air intérieur de la serre selon les sous-étapes suivantes:
 - a. proposer un modèle ou adapter un modèle existant au contexte si nécessaire;
 - b. établir les paramètres de culture du modèle afin de représenter le plus fidèlement possible la canopée dans la serre.
5. Modéliser les systèmes CVCA présents dans la serre selon les sous-étapes suivantes :
 - a. inclure les modèles mathématiques requis pour représenter les équipements utilisés dans la serre pour contrôler les conditions intérieures;
 - b. définir les séquences de contrôles utilisées pour faire fonctionner les différents équipements de la serre.
6. Établir les variables de sortie requises afin d'analyser les résultats du modèle à l'aide des indicateurs de performance appropriés.

2.3 Calibration du modèle

La calibration du modèle est effectuée afin de fixer la valeur de paramètres incertains pour améliorer la précision du modèle par rapport aux données mesurées. Les résultats du modèle calibré sont ensuite comparés à des valeurs seuils relevées dans la littérature. La calibration d'un modèle se décline en plusieurs étapes qui seront détaillées dans le paragraphe suivant, celles-ci sont :

1. Identifier les variables de sortie à l'étude ainsi que les indicateurs de performance statistiques considérés pour calibrer le modèle;
2. Simuler le modèle de base et évaluer sa performance par rapport aux données mesurées à l'aide des indicateurs statistiques sélectionnés;
3. Identifier les paramètres d'incertitudes relevés dans le développement du modèle;
4. Établir un ordre de calibration en fonction de la sensibilité du modèle à la variation de chaque paramètre d'incertitude;
5. Calibrer le modèle en suivant l'ordre de calibration pour les paramètres d'incertitude;
6. Comparer les résultats du modèle calibré à des valeurs seuils provenant de la littérature.

Les variables pour lesquelles le modèle développé est calibré sont la température de bulbe sec, la température du point de rosée et l'humidité relative de l'air intérieur dans la serre ainsi que le rayonnement photo actif disponible à la canopée. La performance du modèle calibré pour ces variables est évaluée à l'aide d'indicateurs statistiques. Les indicateurs statistiques sélectionnés sont l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) et le coefficient de détermination (R^2) pour estimer l'erreur et la qualité de l'ajustement entre les données simulées et mesurées. Ils sont calculés respectivement par les équations (2.1) et (2.2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2.1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2.2)$$

Où n est la taille de l'échantillon, \hat{y}_i la valeur simulée par le modèle pour la variable y , y_i la valeur mesurée de la variable y , et \bar{y}_i la moyenne des valeurs mesurées pour la variable y .

Peu d'études ont comparé des données simulées à des données mesurées en serres froides sur plus de quelques jours. Une valeur de 1,6°C peut servir de référence pour le RMSE sur la température de bulbe sec de l'air dans la serre pour une journée (Baptista et al., 2010; Piché et al., 2020). L'humidité relative est le paramètre le plus difficile à calibrer et des valeurs de RMSE entre 5 et 10% sont fréquemment rapportées (Baptista et al., 2010; Costantino et al., 2021; Vanthoor et al., 2011). Ceci correspond à l'incertitude typique des capteurs utilisés pour cette variable. Une valeur de RMSE de 68 $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ est utilisée pour le rayonnement photo actif (Zhang et al., 2020). L'ASHRAE (2017) pose un coefficient de détermination minimal de 0,75 pour la calibration de modèle numérique à l'aide de données horaires.

Les paramètres d'incertitudes du modèle de base sont identifiés en utilisant les indices de fiabilité définis par Raftery et al. (2011). Les indices de fiabilité dépendent de la source de la valeur initiale donnée à un paramètre du modèle de base. Les indices de fiabilités proposés par Raftery et al. (2011) sont définis dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Indices de fiabilité

Source de la valeur initiale	Indice de fiabilité
Mesures continues sur site	1
Mesures ponctuelles sur site	2
Observations directes	3
Entretien avec l'opérateur et le personnel sur le site	4
Manuels d'opération et de maintenance des équipements installés	5
Documents et devis d'installation	6
Étude de référence	7
Standards, normes et spécifications en vigueur	8
Informations provenant du stade de conception du système	9

Pour les paramètres incertains, une plage de variation à évaluer doit être définie ce qui est réalisé en se basant sur l'étude des valeurs possibles pour chaque paramètre incertain dans la littérature. Cette étape est suivie d'une analyse de sensibilité pour chacun de ces paramètres. L'analyse de sensibilité est menée en calculant le coefficient de sensibilité (Lam et Hui, 1996) pour la température de bulbe sec et la température de rosée de l'air ainsi que le rayonnement photo actif à la canopée à l'aide de l'équation (2.3) et permet d'établir l'ordre de calibration.

$$SC = \frac{(OP_m - OP_{bc})/OP_{bc}}{(IP_m - IP_{bc})/IP_{bc}} \quad (2.3)$$

Où SC représente le coefficient de sensibilité, soit le pourcentage de variation du résultat de la simulation par rapport au pourcentage de variation du paramètre d'entrée. OP_m représente la valeur de la variable de sortie considérée obtenue pour la valeur modifiée du paramètre évalué. OP_{bc} est la valeur de la variable de sortie considérée obtenue avec la valeur initiale du paramètre évalué. IP_m et IP_{bc} représentent respectivement la valeur modifiée et la valeur initiale du paramètre incertain évalué.

Pour établir l'ordre de calibration et le critère d'optimisation pour la calibration, Costantino et al. (2021) ont proposé une approche en deux temps. Les paramètres touchant principalement aux échanges sensibles dans la serre sont calibrés en premier avec comme critère d'optimisation de minimiser le RMSE sur la température de bulbe sec de l'air dans la serre. Les paramètres influençant principalement les échanges latents dans la serre sont ensuite calibrés avec pour critère d'optimisation de minimiser le RMSE sur l'humidité relative dans la serre. Cette approche n'a pas été retenue pour les échanges sensibles et latents, car ceux-ci sont affectés simultanément par plusieurs paramètres d'incertitudes. Par exemple, le rayonnement photo actif à la canopée affecte l'évapotranspiration, et les débits d'infiltration et de ventilation, génèrent des échanges sensibles et latents avec l'air extérieur. Elle a toutefois été retenue pour calibrer le rayonnement photo actif à la canopée, le paramètre ayant le coefficient de sensibilité le plus élevé pour cette variable est alors calibré en premier lieu avec comme critère d'optimisation de minimiser le RMSE avec le rayonnement photo actif à la canopée mesuré.

L'ordre de calibration pour les paramètres restants est établi en utilisant la moyenne des coefficients de sensibilité sur la température de bulbe sec et sur la température de point de rosée de l'air intérieur. Ce choix permet de considérer l'effet de chaque paramètre sur les profils en température et en humidité. La calibration commence par le paramètre ayant le plus grand coefficient de sensibilité moyen, en procédant par ordre décroissant pour chaque paramètre incertain. Le critère d'optimisation pour la calibration est de minimiser le RMSE moyen entre les valeurs mesurées et simulées pour la température de bulbe sec et la température du point de rosée de l'air. Le choix de ce critère d'optimisation permet d'optimiser chaque paramètre en considérant l'effet de celui-ci sur la température et l'humidité dans la serre. Leur influence relative sur le critère d'optimisation est similaire puisque le RMSE pour la température de bulbe sec et la température de point de rosée sont dans le même ordre de grandeur et se calcule dans les mêmes unités. Le RMSE pour l'humidité relative de l'air n'est fourni qu'à titre de référence afin de comparer les résultats du processus de calibration avec les résultats d'études antérieures s'étant intéressées à celui-ci plutôt qu'à la température de point de rosée.

En plus des variables de sortie nécessaires pour la calibration et la validation du modèle développé, d'autres variables de sorties doivent être colligées sur une base de temps horaire afin de pouvoir calculer les différents indicateurs de performance nécessaires dans le contexte des études de cas à réaliser. Les variables de sorties du modèle supplémentaire nécessaires sont l'humidité relative de l'air dans la serre, le rayonnement photo actif disponible dans la serre à la canopée et la consommation énergétique des différents équipements installés dans la serre

2.4 Description des études de cas

Deux études de cas sont étudiées à l'aide du modèle STD développé et calibré pour les serres en contexte québécois. Les résultats de ces deux études de cas sont ensuite analysés à l'aide des indicateurs de performance appropriés à leurs contextes d'étude respectifs.

La première étude de cas consiste à comparer la performance énergétique de deux serres froides. La première serre est une serre en arche gothique conventionnelle similaire à la serre

modélisée précédemment, alors que la seconde est une serre chinoise partiellement enterrée conçue pour avoir une meilleure inertie thermique et bénéficier de la température stable du sol. Les deux serres sont orientées sur l'axe est-ouest sur leur longueur et sont étudiées pour une année météorologique typique à Lemieux (46,3°N 72,1°O). L'impact de la conception d'une serre passive sur le profil de température à l'intérieur de la serre est étudié.

La seconde étude de cas consiste à comparer la performance énergétique de deux systèmes de chauffage pour réguler la température d'une serre à arche gothique en contexte québécois. Le premier est un aérotherme au propane alors que le second est un système de récupération de la chaleur fatale d'un centre de données. La serre est étudiée en utilisant les données météorologiques d'une année typique à Baie-Comeau (49,2°N 68,1°O). L'impact sur la consommation énergétique de l'éclairage artificiel dans cette serre est aussi étudié. Les indicateurs de performances utilisés dans ces études de cas sont détaillés dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Indicateurs de performance utilisés pour chaque étude de cas

Indicateur de performance	Étude de cas #1	Étude de cas #2
Durée de la saison de croissance thermique	X	-
Degrés-jours de croissance (<i>GDD</i>)	X	-
Indice de confort thermique (<i>TCI</i>)	X	-
Consommation énergétique des systèmes mécaniques	-	X
Appel de puissance des systèmes mécaniques	-	X
Température moyenne journalière	X	-
Écart de température journalier	X	-
Indice de surchauffe (<i>OHI</i>)	X	-
Indice de gel (<i>OCI</i>)	X	-
Ensoleillement journalier (<i>DLI</i>)	X	X
Facteur d'autonomie solaire (<i>DAF</i>)	-	X
Consommation énergétique de l'éclairage artificiel	-	X

Les indicateurs de performances décrivant la consommation énergétique ne sont pas considérés dans l'étude de cas #1 puisqu'il n'y a aucun système de chauffage installé. Les indicateurs utilisés pour cette étude de cas visent donc à caractériser le profil de température et d'éclairage naturel dans la serre afin de déterminer si ceux-ci permettent les cultures souhaitées. D'autre part, les indicateurs de performance décrivant le profil de température ne sont pas utilisés pour l'étude de cas #2 étant donné que les points de consignes en température requis dans cette serre sont identiques et que les systèmes de chauffage modélisés ont été dimensionnés afin d'être en mesure de répondre à la demande de chauffage en tout temps. L'analyse de la consommation énergétique de ces systèmes est donc privilégiée. L'éclairage naturel est étudié dans les deux cas, cependant dans l'étude de cas #2, des indicateurs supplémentaires afin de définir la contribution de l'éclairage naturel par rapport à l'éclairage artificiel et la consommation énergétique de ce dernier sont utilisés.

CHAPITRE 3

CALIBRATION D'UN MODÈLE DE SERRE

Ce chapitre porte sur l'application du processus de calibration de l'approche de modélisation énergétique. La méthodologie présentée au CHAPITRE 2 est appliquée pour la modélisation énergétique d'une serre existante en contexte québécois.

D'abord, la serre expérimentale à modéliser est présentée. Les étapes de modélisation suivies pour le développement du modèle dans l'outil de simulation énergétique TRNSYS sont ensuite détaillées, puis le modèle est calibré à l'aide de données mesurées dans la serre en suivant la procédure décrite au CHAPITRE 2. Les résultats de calibration sont ensuite comparés aux résultats d'études précédentes relevées dans la littérature.

3.1 Description de la serre

La serre modélisée est une serre froide à arche gothique opérée par le Centre d'Expérimentation et de Transfert en Agriculture Biologique (CETAB+). Celle-ci est localisée à l'Institut National d'Agriculture Biologique (INAB) de Victoriaville, Québec (46,1°N; 72,0°O). La serre est destinée à la culture de laitues et d'autre légumes-feuilles, les parcelles de culture couvrent 60% de la surface de plancher disponible et la densité de culture sur ces parcelles varie entre 22 et 35 plants/m²_{cultivé}. Des données climatiques mesurées pour la température de bulbe sec, la température du point de rosée et l'humidité relative de l'air intérieur de la serre ainsi que pour la rayonnement photo actif à la canopée dans la serre ont été compilées et partagées par les membres du CETAB+, ce qui permet de calibrer le modèle énergétique par rapport aux mesures réelles pour ces variables. La Figure 3.1 présente la serre à l'étude.



Figure 3.1 Serre froide du CETAB+

La serre présentée à la Figure 3.1 est couverte de deux films de polyéthylènes, séparés par un espace d'air soufflé de 200 mm. Les murs de pignons sont recouverts de panneaux de polycarbonate triple épaisseur clairs de 6 mm. La structure de la serre couvre environ 91% de la surface de l'enveloppe. La superficie couverte par la serre est de 10,6 m de large par 23,2 m de long et la serre est orientée à 40° vers le Nord-Est sur sa longueur.

Aucun évent de toit n'est installé dans la serre, mais celle-ci dispose de deux événements de côtés pour la ventilation naturelle. Ceux-ci sont ouverts automatiquement par un moteur lorsqu'un signal de contrôle est envoyé. Deux ventilateurs à pression positive sont installés sur le mur de pignon visible sur la Figure 3.1 et deux volets sont présents sur le mur de pignon opposé de la serre pour l'évacuation de l'air. Ceux-ci sont ouverts lorsqu'un signal de contrôle est envoyé aux ventilateurs à pression positive pour les mettre en marche. Quatre ventilateurs sont installés dans la serre et sont continuellement en opération afin d'assurer la circulation de l'air.

3.2 Modélisation dans TRNSYS

Cette section présente les étapes suivies et les hypothèses utilisées pour créer un modèle énergétique de la serre existante dans TRNSYS. Un aperçu du modèle développés dans TRNSYS (Klein et al., 2017) est illustré à la Figure 3.2 incluant l'ensemble de la simulation et les échanges d'information entre les différents modèles. Le pas de temps de la simulation est

fixé à trois minutes. Un pas de temps de simulation aussi court est nécessaire afin de permettre aux contrôleurs des ventilateurs et aux contrôleurs proportionnels des événements de ventilation de prendre des décisions en temps réel (Klein et al., 2018).

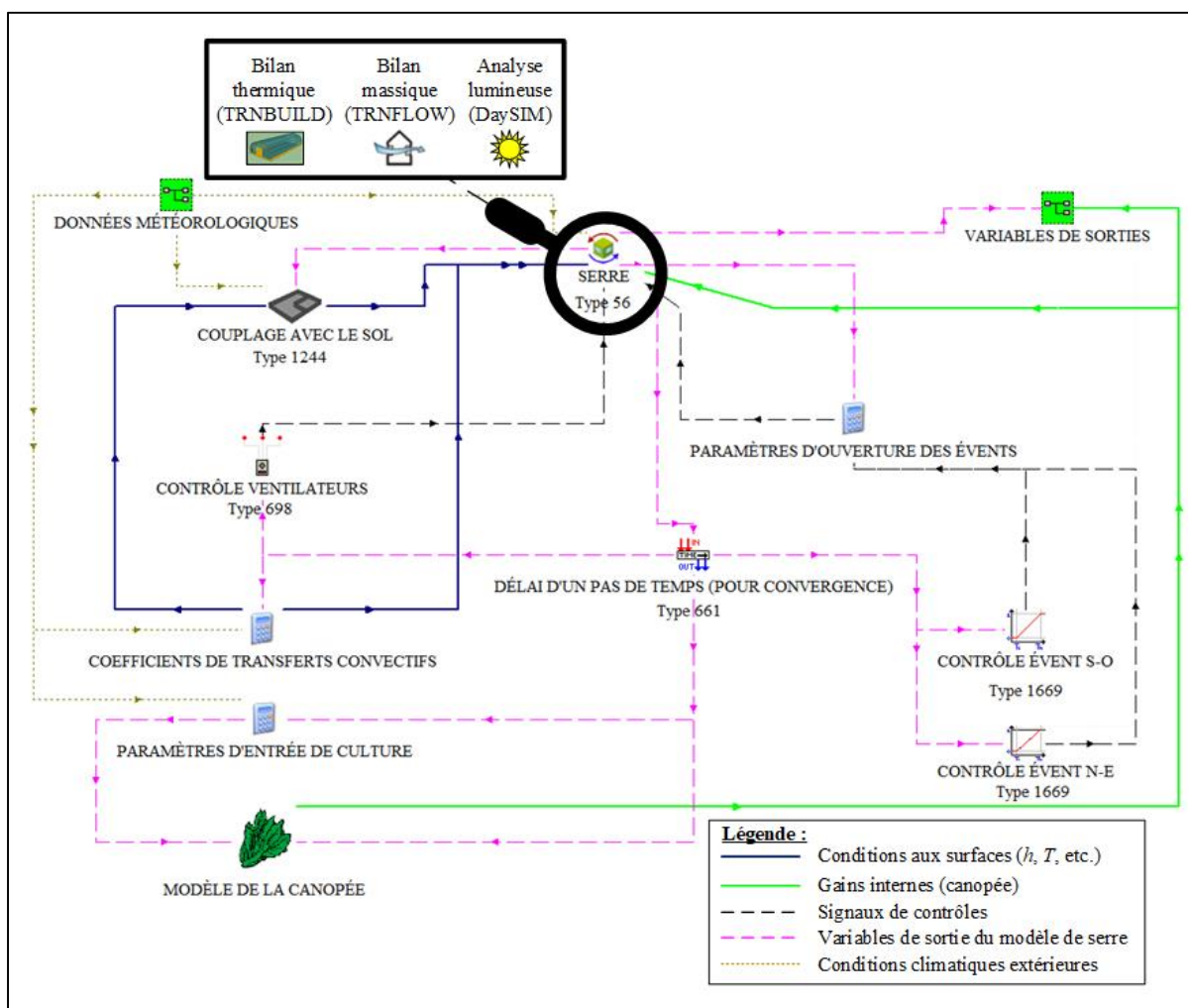


Figure 3.2 Représentation complète du modèle développé dans TRNSYS

Comme il est possible de l'observer à la Figure 3.2, la modélisation des échanges thermiques et massiques à travers l'enveloppe ainsi que l'analyse de l'éclairage naturel sont prises en charge par le Type 56 de TRNSYS. Le Type 1244 est utilisé pour le couplage avec le sol, il reçoit du Type 56 les échanges de chaleur par le sol et calcule la température de surface du sol, le Type 56 reçoit la nouvelle température du sol puis recalcule l'échange de chaleur à travers

le sol. Des itérations ont lieu jusqu'à convergence de ces deux modèles. Les contrôles des ventilateurs sont modélisés par le Type 698 alors que le contrôle proportionnel des événements de côté est modélisé par le Type 1669. Une équation est utilisée pour donner une condition supplémentaire à l'ouverture des événements de côté, car dans la serre expérimentale ceux-ci sont fermés durant l'hiver pour éviter les bris causés par le gel. Un délai d'un pas de temps de simulation est imposé aux variables de sortie du Type 56 (température, humidité) afin que ces valeurs convergent avant d'être utilisées par les composantes de contrôle. Cette condition est nécessaire pour assurer la convergence de la simulation à chaque pas de temps en réduisant les itérations requises entre les modèles. L'application d'un délai pour favoriser la convergence est recommandée pour l'intégration de contrôleurs dans des systèmes ayant une faible inertie thermique dans TRNSYS (Bradley, 2008). L'approche détaillée de modélisation est présentée aux sous-sections 3.2.1 à 3.2.6 pour les étapes suivantes :

1. Données météorologiques,
2. Enveloppe de la serre,
3. Contact avec le sol,
4. Canopée,
5. Systèmes CVCA,
6. Variables de sortie.

3.2.1 Données météorologiques (étape 1)

Afin de simuler le modèle énergétique dans TRNSYS, il faut caractériser les conditions météorologiques extérieures à l'aide de données horaires. Les données horaires utilisées sont des données mesurées sur le site ou disponibles pour des localisations à proximité de la serre existante.

Le Tableau 3.1 présente les données météorologiques requises pour la simulation du modèle énergétique, les instruments de mesures utilisés pour les données mesurées et la provenance des jeux de données pour les données nécessaires non mesurées.

Tableau 3.1 Données météorologiques requises par le modèle

Données météorologiques	Unités	Source de données (précision)
Température bulbe sec	[°C]	Instrument : S-THB M208 de HOBO ($\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ si $0 < T_{db_a} < 50^{\circ}\text{C}$)
Humidité relative	[%]	Instrument : S-THB M208 de HOBO ($\pm 3,5\%$ si $10 < HR_a < 90\%$, $\pm 5\%$ si $HR_a > 90\%$ ou $HR_a < 10\%$)
Irradiance globale ^a	[kJ.h ⁻¹]	Instrument : S-LIA M003 de HOBO ($\pm 5\%$)
Vitesse du vent ^b	[m.s ⁻¹]	Station météorologique de Victoriaville
Direction du vent ^b	[deg]	Station météorologique de Victoriaville
Pression atmosphérique ^b	[Pa]	Station météorologique de Victoriaville
Couverture nuageuse ^b	[0-1]	Station météorologique de Victoriaville
Température de la voûte céleste ^c	[°C]	Clark et Allen (1978)
Température du sol non perturbé	[°C]	Kusuda et Achenbach (1965)
Couverture de neige ^d	[-]	Station météorologique de Thetford mines

^a L'irradiance globale est le minimum d'information requis pour calculer l'irradiance sur les parois. Le modèle de Perez et al. (1990) est utilisé afin de distribuer l'irradiance globale en rayonnement direct et diffus aux parois de la serre selon la température et l'humidité de l'air. L'instrument de mesure utilisé mesure le PPFD en $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$, une conversion de cette mesure vers l'irradiance est requise pour être utilisée dans le modèle.

^b Ces informations n'ont pas été mesurées à l'emplacement de la serre, mais à une station météorologique à proximité située à Victoriaville (#53004) qui collige les données aux trois heures, une interpolation a été effectuée pour obtenir des données horaires.

^c Le modèle de Clark et Allen (1978) est validé pour une plage de température de point de rosé entre $-20,2^{\circ}\text{C}$ et $24,5^{\circ}\text{C}$ ce qui représente 98,8% de la période pour laquelle des données météorologiques sont disponibles (1431 h).

^d La couverture de neige permet de calculer la réflectance et l'émissivité du sol autour de la serre. La couverture de neige n'est pas mesurée à la station météorologique de Victoriaville et les données de Thetford mine sont utilisées. Lorsque la couverture de neige est continue en hiver, la réflectance globale et l'émissivité du sol sont modifiées et leurs valeurs passent de 0,23 et 0,8 à 0,8 et 0,9, respectivement (Warren, 1982).

3.2.2 Enveloppe de la serre (étape 2)

Le modèle de bâtiment multizone de TRNSYS (Type56) est utilisé pour modéliser la serre. Ce modèle présente des différences notables avec celui proposé par Vanthoor et al. (2011) qui est détaillé à l'ANNEXE I. L'utilisation d'un modèle de serre 3D permet d'attribuer à chaque surface une orientation (azimut) et une pente. Chaque surface est distincte et possède des propriétés qui lui sont propres et il y a donc autant de nœuds de calculs pour l'enveloppe de la serre qu'il y a de surfaces qui composent celle-ci. Le modèle 3D de la serre proposé est composé de 43 surfaces (13 surfaces opaques et 30 surfaces transparentes). La Figure 3.3 présente le modèle 3D créé pour la serre expérimentale qui est présentée à la Figure 3.1.

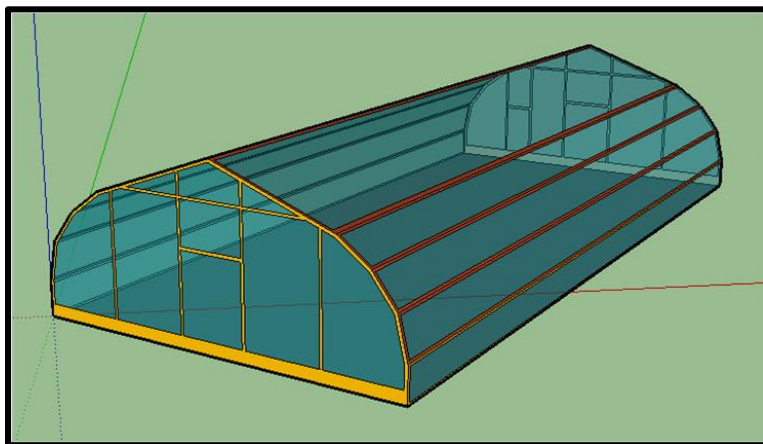


Figure 3.3 Modèle 3D de la serre à l'étude dans SketchUP

L'axe vert dans la Figure 3.3 représente l'axe Nord-Sud. La longueur de la serre modélisée est orientée à 40° vers le Nord-Est pour correspondre à l'orientation de la serre. La structure de l'enveloppe de la serre (en jaune et orange sur la Figure 3.3) est modélisée par une couche d'acier galvanisé de 50 mm d'épaisseur couvrant environ 7% de la surface de l'enveloppe tel que présenté sur les plans du fabricant de la serre. Les propriétés thermiques et optiques de l'acier galvanisé utilisées sont détaillées à l'ANNEXE III dans le Tableau A III-2.

L'enveloppe de la serre est faite de deux films de polyéthylène séparés par un espace d'air de 200 mm et les murs de pignons de la serre sont faits de panneaux de polycarbonate clair de 6 mm d'épaisseur. Les matériaux d'enveloppe transparents sont créés dans le logiciel Window 7.7 (Mitchell et al., 2019) à l'aide des propriétés thermiques et optiques recensées par Valera et al. (2008). Ce logiciel permet de définir les propriétés optiques du matériau en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire ainsi que les propriétés thermiques du matériau en accordance avec le standard NFRC 100 (2010). Le Tableau 3.2 présente les propriétés thermiques et optiques dans les conditions de test standardisées des deux matériaux ainsi créés pour fins de comparaison avec les données retrouvées dans la littérature.

Tableau 3.2 Propriétés thermiques et optiques des matériaux d'enveloppe utilisés

Matériau	Transmissivité τ	Coefficient de transmission thermique global U
Polyéthylène double	0,80 [-]	4,0 [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Polycarbonate	0,75 [-]	3,5 [W.m ⁻² .K ⁻¹]

Les propriétés standardisées des deux matériaux créés correspondent aux valeurs rapportées par les fabricants du revêtement utilisé pour la serre (Plastika Kritis TUV 3992) et des valeurs théoriques relevés dans la littérature (ASHRAE, 2015; Valera et al., 2008).

Les coefficients de transfert de chaleur convectifs utilisés pour les différentes surfaces dans le modèle sont détaillés dans le Tableau 3.3 tels qu'ils ont été considérés dans TRNSYS.

Tableau 3.3 Coefficients de transfert de chaleur convectifs retenus en $W.m^{-2}.K^{-1}$

Type	Équation	Référence
Interne à la paroi de l'enveloppe	$h_i = 1,95 \cdot (T_{env_i} - T_{a_i})^{0,3} \text{ si } (T_{env_i} - T_{a_i}) > 0^\circ C \quad (3.1)$ $h_i = 2,21 \cdot (T_{a_i} - T_{env_i})^{0,33} \text{ si } (T_{env_i} - T_{a_i}) < 0^\circ C \quad (3.2)$	Papadakis et al. (1992)
Externe à la paroi de l'enveloppe	$h_e = 7.2 + 3.84 \cdot V \quad (3.3)$	Garzoli et Blackwell (1987)
Entre le sol et l'air de la serre	$h_{sol} = 2,11 \cdot (T_g - T_{a_i})^{0,31} \text{ si } (T_g - T_{a_i}) > 0^\circ C \quad (3.4)$ $h_{sol} = 1,87 \cdot (T_g - T_{a_i})^{0,25} \text{ si } (T_g - T_{a_i}) < 0^\circ C \quad (3.5)$	Klein et al. (2018)

L'approche suggérée par Papadakis et al. (1992) est retenue pour le calcul du coefficient de transfert de chaleur convectif interne de l'enveloppe en polyéthylène alors que l'équation proposée par Garzoli et Blackwell (1987) est retenue pour le coefficient de transfert de chaleur convectif à la paroi externe de l'enveloppe. L'équation de Papadakis et al. (1992) permet de considérer la différence entre une surface plus chaude ou plus froide que l'air alors que l'équation de Garzoli et Blackwell (1987) a été confirmée par Rasheed et al. (2017) pour représenter la convection extérieure sur une couverture de serre en polyéthylène. Le modèle de base inclus dans TRNSYS (Klein et al., 2018) est considéré pour le coefficient de convection entre le sol et l'air de la serre. Celui-ci est dans le même ordre de grandeur que celui proposé par De Halleux (1989) pour des serres à travées multiples. La conduction transitoire dans la structure est résolue dans TRNSYS par la méthode des fonctions de transfert proposée par Mitalas et Arseneault (1972). La masse thermique de la couverture transparente n'est pas considérée dans TRNSYS. En raison de l'épaisseur et de la densité des films de plastique considérés, cette simplification semble acceptable.

Des échanges massiques d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la serre peuvent être causés par l'infiltration d'air extérieur à travers l'enveloppe de la serre et la ventilation naturelle de la serre à travers les événements latéraux. Ces deux types d'échanges massiques d'air sont modélisés

dans TRNFLOW (Weber et al., 2003) en fonction de la différence de pression entre l'air intérieur et l'air extérieur de la serre et du profil des ouvertures et des équipements de ventilation. Cette différence de pression est causée par l'action de la pression du vent sur les parois et par l'action de la différence de densité de l'air causé par la différence de température et d'humidité entre l'air intérieur de la serre et l'air extérieur.

La vitesse du vent et sa direction ainsi que la pression atmosphérique sont donc nécessaires pour permettre de simuler les échanges massiques d'air à travers l'enveloppe. La hauteur de la station météorologique où elle a été mesurée est de 10 m. La vitesse du vent mesurée est donc corrigée pour la hauteur de référence à l'aide de l'équation (3.6). La hauteur de référence pour les événements de côtés par exemple est égale à 0,3 m, soit la hauteur du bas de l'événement à partir du sol.

$$V = V_m \cdot \left(\frac{H_b}{H_m}\right)^{\beta_m} \cdot \left(\frac{H}{H_b}\right)^{\beta} \quad (3.6)$$

Où V représente la vitesse du vent en m.s^{-1} corrigé à la hauteur de référence, V_m représente la vitesse du vent en m.s^{-1} mesurée à la station météorologique, H_b est la hauteur de la couche limite du vent en m. β_m représente l'exposant de puissance du vent à la station météorologique et β est l'exposant de puissance du vent à l'emplacement de la serre. L'exposant de puissance du vent β dépend de la rugosité du terrain autour de la serre. Pour le cas présent, une valeur de 0,15 a été considérée pour les exposants β et β_m afin de représenter le champ avec obstacles isolés et les boisés autour de la serre et de la station météorologique localisée en périphérie de la ville (Klein et al., 2018).

La pression exercée par le vent sur les surfaces de la serre dépend du coefficient de pression sur la surface, qui varie selon son orientation, sa pente et la direction du vent. Les valeurs présentées dans le Tableau 3.4 ont été considérées pour les surfaces verticales de la serre. Celles-ci sont basées sur le standard EN13031-1 (2019), repérés dans une étude de Maraveas (2020) pour le coefficient de pression moyen sur les parois de serres en polyéthylène.

Tableau 3.4 Coefficients de pression du vent moyens sur une serre à arche gothique

Azimut de la surface	Direction du vent			
	Nord Ouest	Nord Est	Sud Est	Sud Ouest
Sud Est	0,7	-1	-0,3	-1
Sud Ouest	-1	0,7	-1	-0,3
Nord Ouest	-0,3	-1	0,7	-1
Nord Est	-1	-0,3	-1	0,7

Le coefficient de pression moyen du vent sur une surface est utilisé afin de calculer la pression du vent sur une surface à l'aide de l'équation (3.7), la vitesse du vent est ici corrigée pour la hauteur moyenne de la surface considérée.

$$P_v = C_v \cdot \rho_a \cdot \frac{V^2}{2} \quad (3.7)$$

Où P_v est la surpression (ou dépression) causée par le vent sur une façade de la serre en Pa et C_v est le coefficient de pression moyen du vent sur la surface.

La différence de densité causée par une différence de température ou de hauteur de référence entre deux nœuds peut aussi entraîner une différence de pression entre ces deux nœuds, celle-ci est calculée par l'équation (3.8).

$$P_d = \Delta\rho_a \cdot g \cdot \Delta z \quad (3.8)$$

Où P_d est la pression causée par la différence de densité entre l'air dans la zone thermique et l'air extérieur en Pa, $\Delta\rho_a$ est la différence de densité de l'air entre les zones thermiques, g est l'accélération gravitationnelle en m.s^{-2} et Δz est la différence entre les hauteurs de références des zones thermiques en m. La différence de hauteur considérée est la hauteur du plancher de la serre par rapport au sol à l'extérieur de la serre.

L'infiltration d'air extérieur à travers l'enveloppe peut se faire à travers des interstices entre les différentes composantes de l'enveloppes ou à travers des fissures dans celle-ci. Les échanges massiques d'air à travers les interstices sont modélisés par l'équation (3.9).

$$\dot{m}_{a_{i-e}} = L \cdot C_s \cdot \Delta P(z)^n \quad (3.9)$$

Où $\dot{m}_{a_{i-e}}$ représente le débit d'air extérieur causé par les infiltrations dans l'enveloppe en kg.s^{-1} , L représente la longueur de l'infiltration considérée en m, C_s est le coefficient d'écoulement en $\text{kg.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}.\text{m}^{-1}$ et n est l'exposant de l'écoulement adimensionnel. Dans le cas présent, une infiltration a été considérée sur le périmètre de chaque événement de côté lorsque ceux-ci sont fermées ($L = 41,8 \text{ m}$). Une longueur d'infiltration d'environ 20 m a aussi été considérée sur les murs de pignons de la serre pour considérer les infiltrations autour des portes et aux jonctions entre les panneaux de polycarbonate. Aucune valeur de référence n'a été trouvée dans la littérature pour le coefficient d'écoulement à travers les infiltrations dans une enveloppe de polyéthylène double ni pour l'exposant d'écoulement. Des valeurs de $0,002 \text{ kg.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}.\text{m}^{-1}$ et 0,6 pour le coefficient d'écoulement et de l'exposant d'écoulement respectivement ont été choisies arbitrairement. Ces valeurs correspondent aussi aux valeurs recommandées pour l'infiltration à travers des portes non étanchéifiées (Klein et al., 2018). L'utilisation de ces valeurs permet d'obtenir une infiltration moyenne de 0,648 CAH sur la période évaluée, ce qui est dans le même ordre de grandeur que les valeurs rapportées par l'ASHRAE (2015) pour une serre couverte d'un film de plastique (0,6 CAH et 1,0 CAH).

Les ouvertures verticales des événements de côtés sont modélisées dans TRNFLOW par des ouvertures verticales rectangulaires en considérant le pourcentage d'ouverture de l'événement. Les événements de côtés de la serre ont des dimensions de 0,91 m de haut par 23 m de long. Le débit d'air à travers ces deux ouvertures verticales est estimé à l'aide de l'équation (3.10).

$$\dot{m}_{a_{i-e}} = C_d \int_0^{H_{\text{évent}}} \sqrt{2 \cdot \rho_a(z) \cdot \Delta P(z)} \cdot w_{\text{évent}} dz \quad (3.10)$$

Où $\dot{m}_{a_{i-e}}$ représente le débit d'air extérieur échangé par ventilation naturelle à travers l'évent de côté en kg.s^{-1} . C_d représente le coefficient de décharge adimensionnel de l'ouverture de l'évent de côté. H_{event} et w_{event} représentent respectivement la hauteur et la largeur de l'ouverture en m de l'évent de côté. z est la discrétisation sur la hauteur de l'ouverture de l'évent pour résoudre l'intégrale et $\rho_a(z) \Delta P(z)$ représente la variation de la densité de l'air et de la pression entre l'air intérieur et l'air à la surface extérieure de l'évent de côté, en kg.m^{-3} et en Pa, respectivement. Le débit d'air est assumé purement horizontal. Le pourcentage d'ouverture est une entrée de ce modèle afin d'ajuster la valeur de H_{event} . Si l'évent de côté est fermé, on considère une infiltration ayant une longueur égale au périmètre de l'ouverture. Un coefficient de décharge de 0,61 représente une ouverture verticale rectangulaire soumise aux effets de la pression du vent et de la différence de température (Zhang et al., 1989).

La condensation de l'humidité de l'air intérieur de la serre sur la surface intérieure de la couverture de l'enveloppe et la réduction de la transmissivité solaire causée par celle-ci est négligée dans ce modèle. Comme l'eau condensée n'est pas collectée dans la serre, il est possible de considérer que celle-ci sera simplement évaporée par le rayonnement solaire à un moment ultérieur. L'utilisation de cette hypothèse simplificatrice est répandue dans la littérature (Costantino et al., 2021; Esmaeli et Roshandel, 2020). La présence de la condensation limiterait théoriquement l'augmentation de l'humidité au-delà du point de condensation sur la surface intérieure.

3.2.3 Contact avec le sol (étape 3)

Le sol sous la serre est discrétisé par la méthode des éléments à volume fini en utilisant le Type 1244 disponible dans TRNSYS (TESS, 2012). La taille minimale des éléments aux interfaces et le facteur d'augmentation de la taille des éléments s'éloignant des interfaces sont fixés à 0,1 m et 2 m, respectivement. La Figure 3.4 présente la discrétisation du sol sous la serre en éléments à volume fini telle que vue face au mur de pignon de la serre.

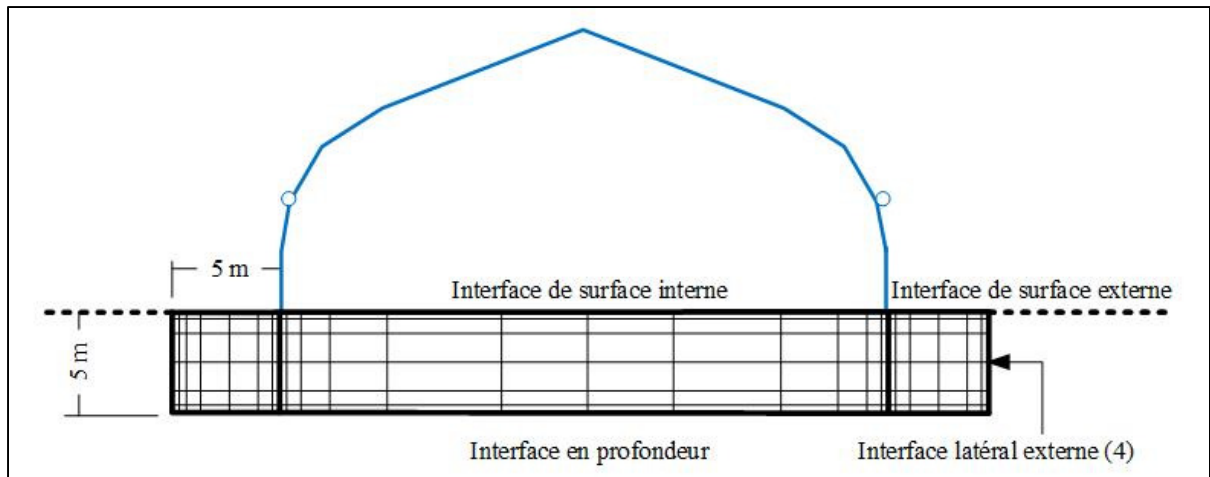


Figure 3.4 Discretisation du sol sous la serre (vue du mur pignon)

Tel que représenté à la Figure 3.4, cinq types d'interfaces sont considérés :

1. L'interface de surface interne du sol en contact avec l'air de la serre,
2. L'interface de surface externe du sol en contact avec l'air extérieur,
3. L'interface en profondeur (à 5 m en profondeur),
4. Quatre interface latéraux internes (alignés avec les parois de la serre),
5. Quatre interfaces latéraux externes (à 5 m des parois de la serre).

La température de l'interface en profondeur est de $6,13^{\circ}\text{C}$, soit la température moyenne annuelle de l'air extérieur à l'emplacement de la serre tel que recommandé pour l'utilisation du Type 1244 (TESS, 2012). La température des interfaces de côtés des éléments situés sur l'interface latéral externe est obtenue par le modèle de Kusuda et Achenbach (1965) en fonction de la profondeur de l'élément et des propriétés thermiques du sol. La température de l'interface de surface des éléments à l'intérieur de la serre dépend du rayonnement solaire absorbé à la surface du sol, de l'échange de rayonnement à ondes longues net entre le sol et les surfaces internes de la serre et de l'échange de chaleur par convection entre l'air intérieur de la serre et le sol. La température des interfaces de surface pour les éléments situés à l'extérieur de la serre est obtenue en utilisant le rayonnement solaire extérieur, l'échange de rayonnement à ondes longues net avec la voûte céleste et l'échange de chaleur par convection entre l'air extérieur de la serre et le sol. Les échanges conductifs à travers les interfaces entre les éléments

du sol discrétisés sont calculés à chaque pas de temps par la méthode de résolution numérique par éléments à volume fini (TESS, 2012).

Les propriétés thermiques du sol peuvent être modélisées selon sa composition, sa granulométrie ainsi que la quantité d'eau contenue dans celui-ci (Lu et al., 2014). Le Tableau 3.5 présente les propriétés thermiques de différents sols recensées par Dalla Santa et al. (2020).

Tableau 3.5 Propriétés thermiques pour différents types de sols

Type de sol	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Capacité thermique massique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Densité [kg.m ⁻³]
Argileux (sec)	0,25 à 1,52	750 à 900	1800 à 2000
Sableux (sec)	0,15 à 0,90	590 à 900	1800 à 2200
Limoneux (sec)	0,26 à 1,09	750 à 900	1800 à 2000
Argileux (humide)	0,60 à 1,90	900 à 1400	2000 à 2200
Sableux (humide)	1,00 à 2,60	950 à 1500	1900 à 2300
Limoneux (humide)	0,82 à 2,60	900 à 1400	2000 à 2200

Les sols sableux sont caractérisés par des grains visibles à l'œil nu alors que les sols argileux sont caractérisés par des grains microscopiques, ceux-ci ont une très forte capacité de rétention d'eau et requièrent donc un drainage approprié pour être employés pour l'agriculture (Hilliard et Reedyk, 2020). Les sols limoneux sont caractérisés par une taille de grain à mi-chemin entre les sols argileux et les sols sableux. La densité du sol dépend fortement du compactage subi, Li et al. (2002) ont étudié l'influence du compactage d'un sol entre 1000 et 1600 kg.m⁻³ sur la croissance du maïs. Un sol moins dense favorise la diffusion des racines dans le sol et la production des plants de maïs (Li et al., 2002). Le contenu en eau du sol tend à augmenter significativement la densité, la conductivité thermique et la capacité thermique massique de tous les types de sol. Dans cette étude, un sol limoneux sec est utilisé, la conductivité thermique est de 0,5 W.m⁻².K⁻¹, la capacité thermique massique est de 800 J.kg⁻¹.K⁻¹ et la densité est de 1800 kg.m⁻³ pour le sol sous la serre. L'absorptivité solaire et l'émissivité de la surface du sol

à l'intérieur de la serre sont fixées à 0,80 et 0,94 conformément aux valeurs présentées dans le Tableau A III-1 pour un sol sec (Castilla, 2013) et à l'étude de Mira et al. (2007).

Aucune donnée mesurée expérimentalement n'est disponible pour l'irrigation. Celles-ci permettraient de caractériser le contenu en eau du sol dans la serre à chaque pas de temps de la simulation. L'influence du contenu en eau du sol sur ses propriétés thermiques a donc été négligée dans ce modèle. L'évapotranspiration du sol dans la serre et l'effet de sa capacité de rétention de l'eau sont aussi négligés dans ce modèle pour les mêmes raisons.

3.2.4 Canopée (étape 4)

Dans ce modèle, la canopée n'est pas modélisée comme un élément physique dans la serre, mais plutôt comme un gain/perte thermique composé d'une partie sensible et d'une partie latente, qui sont calculées en fonction des conditions intérieures de la serre. Cette limitation signifie que l'impact de leur présence sur la distribution du rayonnement solaire simulé dans l'enceinte n'est pas considéré directement contrairement à ce qui est permis par l'approche de Zhang et al. (2020) qui intègre des plants de tomates comme des objets 3D interagissant avec l'air dans la serre. Cette simplification permet de réduire la complexité du modèle et le temps de simulation, mais la distribution du rayonnement solaire doit être ajusté manuellement pour considérer la fraction absorbée par la canopée.

Le modèle énergétique considéré est un modèle de latue programmé comme une composante TRNSYS proposé par Talbot et Monfet (2020). Ce modèle permet d'estimer l'échange de chaleur par convection entre la canopée et l'air ambiant ainsi que le flux de chaleur latente causé par l'évapotranspiration de la canopée. Le bilan énergétique de la canopée pour le modèle de Talbot et Monfet (2020) est décrit par l'équation (3.11).

$$q''_{sol} + q''_{sw} + q''_{LWX} - q''_{st} - q''_{morph} - q''_{conv} - q''_{latent} = 0 \quad (3.11)$$

Où q''_{sol} représente le rayonnement solaire courte ondes courtes absorbée par la canopée en $W.m^{-2}_{cultivé}$. q''_{sw} représente le rayonnement à ondes courtes provenant de l'éclairage artificiel

absorbée par la canopée en $W.m^{-2}_{cultivé}$. Le spectre du rayonnement à ondes courtes (400 à 700 nm) englobe la majorité du spectre photo actif. q''_{LWX} représente l'échange net de rayonnement thermique entre la canopée et les surfaces intérieures de la serre en $W.m^{-2}_{cultivé}$. q''_{st} représente l'énergie stockée dans la masse thermique de la canopée en $W.m^{-2}_{cultivé}$. q''_{morph} représente l'énergie utilisée par les processus morphologiques et chimiques de la plante, tels que la photosynthèse, en $W.m^{-2}_{cultivé}$. q''_{conv} représente l'échange de chaleur convectif entre la canopée et l'air de la serre en raison de la différence de température entre ces deux éléments en $W.m^{-2}_{cultivé}$. Finalement, q''_{latent} représente l'échange de chaleur latente avec l'air de la serre causé par l'évaporation de l'eau transpirée par la canopée.

Le terme de l'échange net de rayonnement à ondes longues entre la canopée et les surfaces de la serre (q''_{LWX}) peut être négligé, car sa contribution est minime comparativement aux termes de rayonnement photo actif artificiel et solaire (Katsoulas et Stanghellini, 2019; Lambers et al., 1998). Le terme de l'énergie stockée sous forme de chaleur dans la masse thermique de la canopée (q''_{st}) peut aussi être négligé étant donné que la capacitance de celle-ci est minime (Katsoulas et Stanghellini, 2019). Finalement, le terme de l'énergie utilisée pour les processus chimiques et morphologiques de la plante (q''_{morph}) peut lui aussi être négligé, car la portion de l'énergie solaire absorbée par la canopée qui est utilisée pour ces processus est très faible (Katsoulas et Stanghellini, 2019). À la suite de ces simplifications, l'équation (3.11) peut être reformulé par l'équation (3.12) pour le modèle de Talbot et Monfet (2020).

$$q''_{sol} + q''_{sw} - q''_{conv} - q''_{latent} = 0 \quad (3.12)$$

Le modèle de Talbot et Monfet (2020) traite l'absorption du rayonnement incident par la canopée selon l'approche « *big leaf* » telle que proposée par Graamans et al. (2017) pour des laitues cultivées sous éclairage artificiel dans des salles de croissance. En considérant la canopée comme un milieu trouble, l'efficacité de l'absorption du rayonnement photo actif incident augmente avec la croissance de la plante en raison de l'interception de la composante réfléchiée par les autres feuilles dans la canopées (Katsoulas et Stanghellini, 2019). Le milieu trouble représentant la canopée est défini par trois paramètres (Stanghellini, 1987). Le premier

est l'indice de croissance foliaire (LAI), qui représente la surface totale de feuilles dans la canopée par mètre carré cultivé. Le LAI peut être calculé par l'équation (3.13).

$$LAI = \frac{A_{pl}}{A_{cult}} \quad (3.13)$$

Où A_{pl} représente la surface totale des feuilles de la canopée et A_{cult} représente la surface totale au sol cultivée, en m^2 . Étant donné que la croissance de la canopée n'est pas évaluée dynamiquement par le modèle, une valeur de $3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ est utilisée pour le LAI sur la base d'une hypothèse proposée par Graamans et al. (2017) pour représenter le cyclage de plants matures et de jeunes plants dans la serre. Une intégration ultérieure de la croissance de celui-ci serait à développer et valider pour ce modèle dans le futur.

Le second paramètre est le coefficient d'extinction adimensionnel de la canopée pour le rayonnement photo actif (k_s). La valeur de ce coefficient dépend de la géométrie et de la disposition des feuilles dans la canopée, une valeur constante est associée à chaque espèce. Tei et al. (1996) rapportent une valeur k_s de $0,66 \pm 0,02$ pour la laitue cultivée en terre considérant une densité de $27,5 \text{ plants} \cdot \text{m}^{-2}$, cette valeur est relativement proche de la densité de plants cultivés dans la serre expérimentale (entre 22 et $35 \text{ plants} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$, selon la parcelle). Faute de mieux, une valeur uniforme de 0,66 pour le coefficient d'extinction de la canopée est admise.

Le troisième paramètre est la fraction de couverture du sol par les parcelles de culture (f_{cult}). Ce coefficient dépend de la surface couverte par les rangs de culture en considérant l'effet d'ombrage des rangs voisins et l'espacement entre les rangs de culture tel que présenté par l'équation (3.14) proposée par Stanghellini (1987).

$$f_{cult} = \frac{w_{rang} + \Delta w_{rang}}{w_{rang} + d_{rang}} \quad (3.14)$$

Où w_{rang} représente la largeur d'un rang de culture, Δw_{rang} représente l'augmentation apparente de la largeur du rang de culture due à la hauteur des plants H_{pl} et d_{rang} représente l'espace entre deux rangs de culture, toutes en m. Δw est calculé par l'équation (3.15) en m.

$$\Delta w_{rang} = d_{rang} + H_{pl} - (d_{rang}^2 + H_{pl}^2)^{0.5} \quad (3.15)$$

Pour des espèces dont la croissance n'est pas verticale (H_{pl} très faible), comme les laitues, l'ombrage des rangs de culture sur ses voisins est négligeable et la valeur de Δw tend vers 0. Dans les conditions de la présente étude, le coefficient de couverture du sol par les parcelles de culture (f_{cult}) est égal à 0,6 pour représenter la couverture du sol par les parcelles de culture dans la serre expérimentale.

Les termes q''_{sol} et q''_{sw} représentant le rayonnement à ondes courtes solaire et provenant de l'éclairage artificiel absorbé par la canopée modélisée comme un milieu trouble (Katsoulas et Stanghellini, 2019), tels que décrits par les équations (3.16) et (3.17). Ces termes sont calculés à partir du rayonnement à ondes courtes solaire transmis dans la serre $q''_{sol.trans}$ et du rayonnement à ondes courtes total émise par l'éclairage artificiel $q''_{sw.emise}$, respectivement.

$$q''_{sol} = f_{cult} \cdot q''_{sol.trans} \cdot (1 - e^{-k_s \cdot LAI}) \quad (3.16)$$

$$q''_{sw} = f_{cult} \cdot q''_{sw.emis} \cdot (1 - e^{-k_s \cdot LAI}) \quad (3.17)$$

Où le terme $q''_{sw.emise}$ est calculé en multipliant la fraction du rayonnement à ondes courtes (f_{sw}) à la puissance électrique consommée par l'éclairage artificiel. Le paramètre LAI est considéré constant dans cette étude, mais son inclusion dans les équations (3.16) et (3.17) prévoit l'intégration future d'un modèle pour la croissance de la plante.

Le terme q''_{conv} dépend du LAI , de la température de la canopée T_{pl} et de la résistance aérodynamique de la canopée r_a . Le calcul de ce terme est décrit par l'équation (3.18).

$$q''_{conv} = LAI \cdot \rho_a \cdot C p_a \cdot \frac{T_{pl} - T_{ai}}{r_a} \quad (3.18)$$

Le terme q''_{latent} dépend de deux résistances. La résistance aérodynamique de la canopée (r_a) limite le transfert de la vapeur d'eau vers l'air par évaporation, alors que la résistance stomatale de la canopée (r_s) limite le phénomène de transpiration de la plante. Le calcul de q''_{latent} est effectué par l'équation (3.19).

$$q''_{latent} = LAI \cdot \lambda \cdot \frac{X_{ai} - X_{pl}}{r_s + r_a} \quad (3.19)$$

Où X_{ai} est la concentration de vapeur d'eau dans l'air intérieur et X_{pl} est la concentration de la vapeur d'eau à la canopée, toutes deux en $g \cdot m^{-3}$ et r_s est la résistance stomatale en $s \cdot m^{-1}$.

La valeur de r_a dépend de la vitesse de circulation de l'air au-dessus de la canopée et de la géométrie et de la disposition des feuilles dans la canopée. Cependant une définition précise de ce paramètre est difficile étant donné la nature incertaine et variable de l'écoulement d'air autour des feuilles qui grandissent (Stanghellini, 1987). De plus l'influence de ce paramètre sur la résolution du bilan énergétique est minime et une valeur constante peut être considérée pour simplifier le modèle (Katsoulas et Stanghellini, 2019). Une valeur constante pour r_a de $100 s \cdot m^{-1}$ est proposée, par Graamans et al. (2017) pour de la laitue soumise à de la circulation d'air forcée par des ventilateurs.

r_s est fonction du rayonnement photo actif absorbé, de la température de l'air, de la concentration en CO_2 et du déficit de pression de vapeur entre l'air et la canopée (Stanghellini, 1987). Cependant, la contribution de chacun de ces termes est inégale et l'utilisation d'un modèle exclusivement basé sur le rayonnement photo actif permet d'obtenir une précision acceptable étant donné la prédominance de ce terme sur les autres (Katsoulas et Stanghellini, 2019). Un modèle de r_s pour la laitue basé sur le PPFD reçu par la plante tel que proposé par

Graamans et al. (2017) est retenu afin de pouvoir différencier la contribution des différentes sources d'éclairages présente dans une serre. Ce modèle est décrit par l'équation (3.20).

$$r_s = 60 \cdot \left(\frac{1500 + PPFD}{200 + PPFD} \right) \quad (3.20)$$

La résolution du bilan énergétique est effectuée selon la modèle programmée dans un composant TRNSYS par Talbot et Monfet (2020). Les modifications apportées à ce modèle sont vérifiées en comparant les RMSE entre les valeurs obtenues avant et après la modification du modèle pour q''_{latent} , q''_{sens} , T_{pl} ainsi que la proportion du rayonnement incident réfléchi par la canopée (q''_{ref}) pour différents intervalles de variation pour les paramètres d'entrées considérés décrits dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Vérification des modifications au modèle de laitue

Paramètre d'entrée du modèle	Intervalle de variation (incrément)
Rayonnement à ondes courtes (q''_{sol} ou q''_{sw})	0 à 300 W.m ⁻² (50)
Température de l'air intérieur (T_{ai})	5 à 30°C (5)
Humidité relative de l'air intérieur (HR_{ai})	50 à 90% (10)
LAI	0,5; 1 à 10 (1)

Pour toutes les différentes combinaisons possibles de ces paramètres d'entrées, le RMSE entre les valeurs de sorties q''_{latent} , q''_{sens} , T_{pl} et q''_{ref} obtenues avec le modèle de Talbot et Monfet (2020) original et le modèle modifié pour intégrer l'absorption à travers un milieu trouble sont de 4,56 W.m⁻²_{cultivé}, 8,52 W.m⁻²_{cultivé}, 0,38°C et 13,70 W.m⁻²_{cultivé} respectivement. La différence entre ces deux modèles s'explique, car la modification proposée permet de considérer que le rayonnement réfléchi par une feuille peut être absorbé par les autres feuilles de la canopée ce qui augmente le rayonnement à ondes courtes total absorbé par la canopée, réduit la portion réfléchie et augmente l'évapotranspiration. L'évapotranspiration et le rayonnement solaire absorbé agissent à leur tour sur la température de la canopée ce qui affecte l'échange de chaleur par convection.

Il faut noter que ce modèle néglige les échanges d'eau entre le sol et l'air, car il a été développé pour la culture hydroponique de laitues (Graamans et al., 2017). De plus, l'évapotranspiration calculée dans ces conditions néglige la disponibilité de l'eau dans le sol et assume que l'irrigation est toujours suffisante.

3.2.5 Systèmes CVCA de la serre (étape 5)

La modélisation des systèmes CVCA inclut quatre ventilateurs de circulation d'air horizontaux qui sont installés dans la serre. Ceux-ci sont en opération continue et dissipent chacun 75 W sous forme de chaleur. Deux ventilateurs à pression positive sont aussi utilisés pour la ventilation mécanique de la serre lorsque la ventilation naturelle est insuffisante. Les échanges massiques d'air causés par l'action des ventilateurs sont modélisés dans TRNFLOW à l'aide de la courbe liant la pression statique combattue par le ventilateur à son débit et par un facteur de vitesse de rotation du ventilateur pour modéliser l'opération à vitesse variable. Celui-ci est égal à 0 lorsqu'arrêté et 1 lorsqu'en marche. La Figure 3.5 présente la courbe des ventilateurs installés dans la serre tels qu'ils sont modélisés dans TRNFLOW.

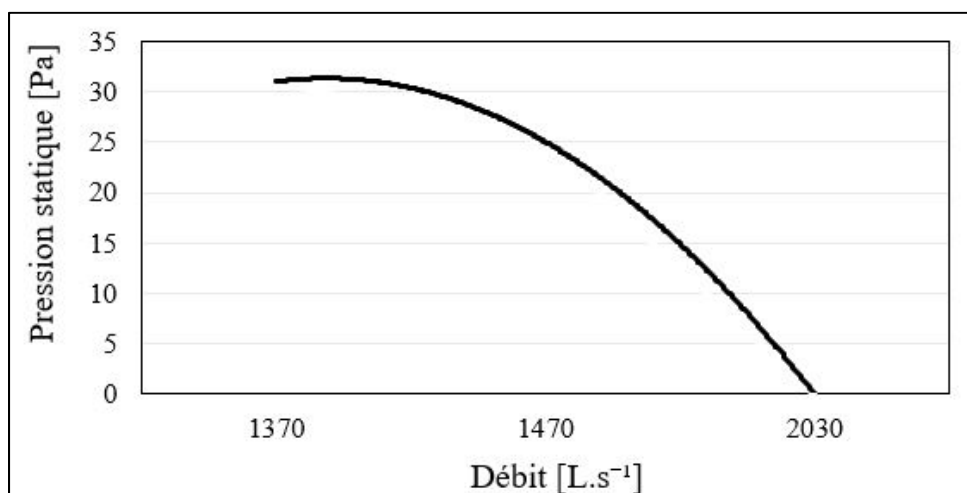


Figure 3.5 Courbe des ventilateurs à pression positive installés

Le débit volumique du ventilateur est calculé grâce à la courbe de la Figure 3.5 en fonction de la différence de pression entre le nœud représentant l'air extérieur proche de la surface où celui-ci est installé et le nœud représentant l'air intérieur de la serre. Les séquences de contrôles pour les équipements permettant la ventilation de la serre doivent être définis dans le modèle de la serre sur l'outil de simulation énergétique TRNSYS. Le Tableau 3.7 présente les points de consigne pour l'ouverture des événements de côté et pour l'activation des ventilateurs à pression positive de la serre.

Tableau 3.7 Points de consignes pour la ventilation de la serre

Équipement	Point de consigne	Type de contrôle
Évent de côté (SE)	18°C (automne) 20°C (printemps)	Ouverture proportionnelle, jusqu'à +4°C
Évent de côté (NO)	20°C (automne) 22°C (printemps)	Ouverture proportionnelle, jusqu'à +4°C
Ventilateur à pression positive (SO)	22°C	Hystérétique, $\pm 1^\circ\text{C}$
Ventilateur à pression positive (SO)	24°C	Hystérétique, $\pm 1^\circ\text{C}$

Tel que présenté dans le Tableau 3.7, l'événement de côté localisé sur le mur sud-est de la serre s'ouvre lorsque la température de l'air intérieur dépasse une valeur seuil qui change selon la saison. Celui-ci s'ouvre graduellement et est complètement ouvert si la température de l'air intérieur augmente 4°C au-dessus de cette valeur seuil. Le deuxième événement de côté, localisé sur le mur nord-ouest de la serre s'ouvre en deuxième selon le même principe. Le premier ventilateur à pression positive est mis en marche si la température dépasse 23°C et restera en marche tant que la température est supérieure à 21°C en raison de son contrôle hystérétique. Le second ventilateur est mis en marche lorsque la température dépasse 25°C et restera en marche tant que celle-ci est supérieure à 23°C pour la même raison.

3.2.6 Variables de sortie requises (étape 6)

Les variables de sortie requises pour la calibration et l'analyse des résultats sont la température de bulbe sec, la température de point de rosée et l'humidité relative de l'air dans la serre et le rayonnement photo actif disponible à la canopée dans la serre. L'éclairage naturel est analysé afin d'obtenir le rayonnement photo actif au niveau de la canopée. Le rayonnement solaire incident aux surfaces extérieures de la serre peut être transmis, absorbé ou réfléchi. Un rayon transmis dans la serre peut être spéculaire (direct) ou diffus. Les rayons transmis à l'intérieur de la serre peuvent alors frapper une autre surface interne de la serre et y être à nouveau absorbés, réfléchis vers l'intérieur ou encore transmis vers l'extérieur de la serre. La Figure 3.6 illustre le parcours du rayonnement incident direct et diffus traversant l'enveloppe de la serre.

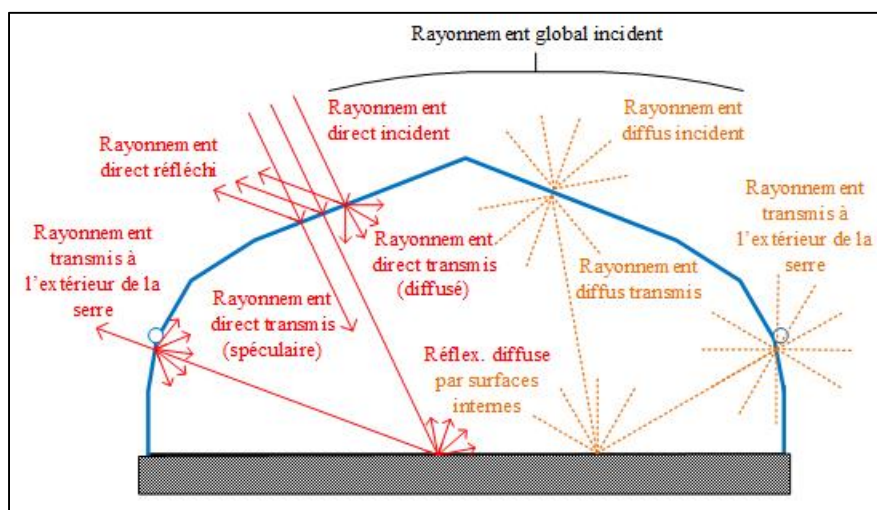


Figure 3.6 Distribution du rayonnement solaire incident

Comme la quantité de rayonnement photo actif disponible aux plantes est un paramètre important de la conception d'une serre, cette valeur doit être simulée précisément, ce qui est difficile à faire de façon analytique en raison du grand nombre de rayons générés lorsque le rayonnement est transmis ou réfléchi de façon diffuse. Le moteur de calcul DaySIM intègre la méthode d'analyse de l'éclairage naturel par traçage des rayons incidents Radiance (Ward-Larson et Shakespeare, 1998) et celle-ci est utilisée pour évaluer le rayonnement photo actif disponible au niveau des plantes dans la serre. Dans le modèle, le nombre de réflexions internes

à considérer est fixé par le paramètre -ab. Le matériau des façades de la serre est modélisé par un matériau translucide dans Radiance ayant une transmissivité de 0,80 et une réflectivité de 0,19. Les données du fabricant indiquent que le polyéthylène utilisé se comporte comme un matériau qui transmet en moyenne 18% du rayonnement incident sous forme de rayonnement diffus et transmet le reste sous forme de rayonnement direct. Cette valeur est inférieure aux valeurs rapportées par Al-Helal et al. (2020) pour différents types de films de plastique utilisés pour la couverture de serre en climat chaud et aride (33 à 43%). Cette différence s'explique, car en climat chaud et aride, l'utilisation de matériaux permettant de diffuser au maximum le rayonnement incident sont favorisés afin d'éviter de brûler les feuilles des couches supérieures de la canopée et de stimuler une croissance homogène de la canopée (Al-Helal et al., 2020).

Dans le modèle développé sur l'outil de modélisation énergétique TRNSYS, quatre points de lecture de l'éclairage naturel ont été définis et ceux-ci sont répartis uniformément dans la serre à une hauteur de 50 cm du sol, tel que présenté à la Figure 3.7. Cette hauteur est équivalente à la hauteur à laquelle la sonde mesurant le PPFD est installée dans la serre au-dessus des cultures. La valeur moyenne rapportée par les points de lectures dans le modèle est utilisée pour estimer la luminosité en lux provenant de l'éclairage naturel à la hauteur des plantes à chaque pas de temps de la simulation, cette valeur est convertie en PPFD à l'aide du facteur de conversion approprié pour le rayonnement solaire.

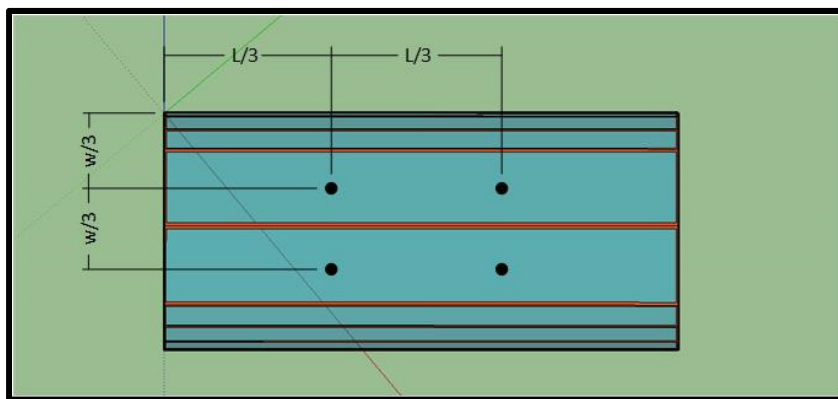


Figure 3.7 Position des points de lecture pour l'analyse de l'éclairage naturel

Les paramètres utilisés pour la simulation de l'éclairage naturel réalisée avec le moteur de calcul DaySIM sont décrits dans le Tableau 3.8, ces valeurs sont des valeurs prescrites pour une analyse grossière et une analyse plus fine (Crone, 1992). Le manuel d'utilisation de Radiance (Crone, 1992) peut être consulté pour plus de détail sur les procédures de calculs.

Tableau 3.8 Paramètres de la simulation de la lumière naturelle avec DaySIM

Paramètre Radiance	Analyse grossière	Analyse fine	Description
Ambiant bounces (-ab)	2	5	Nombre de réflexions diffuses avant que le parcours d'un rayon arrête d'être considéré
Ambiant divisions (-ad)	100	1000	Nombre de rayons considérés provenant d'un point de surface durant un pas de simulation
Ambiant super-samples (-as)	32	250	Nombre de rayons additionnels considérés dans les espaces ayant un gradient de luminosité important
Ambiant resolution (-ar)	300	400	La résolution de la luminosité simulée pour un modèle est calculée par : $\frac{\textit{Dimension maximale} \cdot aa}{ar}$
Ambiant accuracy (-aa)	0,1	0,1	

Le Tableau 3.8 décrit les paramètres utilisés pour la simulation de l'éclairage naturel dans la serre par traçage des rayons incidents. Les valeurs sélectionnées permettent une analyse rapide et grossière de la luminosité, alors que des valeurs plus élevées pour -ab, -as et -ad permettent une plus grande précision, mais augmentent considérablement le temps de simulation (Ward-Larson et Shakespeare, 1998). En raison du grand nombre de simulations à effectuer pour la calibration du modèle, une analyse grossière est privilégiée à ce stade.

3.3 Calibration du modèle

La calibration du modèle est effectuée en comparant la température de bulbe sec, la température de point de rosé et le rayonnement photo actif mesurés dans la serre aux résultats de la simulation pour deux périodes. La première période évaluée est du 6 novembre 2020 au 15 décembre 2020 et la seconde période évaluée est du 25 mars au 15 avril 2021. Les instruments de mesure présentés dans le Tableau 3.1 prennent des lectures des conditions climatiques dans la serre à chaque cinq minutes. La moyenne horaire des lectures prises par les instruments de mesures est utilisée afin de générer un fichier météorologique ayant un pas de temps d'une heure. Tel que décrit dans la section 2.3, la calibration du modèle est réalisée par les six étapes suivantes :

1. Identifier les variables de sortie à l'étude ainsi que les indicateurs de performance statistiques considérés;
2. Simuler le modèle de base et évaluer sa performance par rapport aux données mesurées à l'aide des indicateurs statistiques sélectionnés;
3. Identifier les paramètres d'incertitudes relevés dans le développement du modèle;
4. Établir un ordre de calibration en fonction de la sensibilité du modèle à la variation de chaque paramètre d'incertitude identifié;
5. Calibrer le modèle en suivant l'ordre de calibration pour les paramètres d'incertitudes identifiés;
6. Comparer les résultats du modèle calibré à des valeurs de référence provenant de la littérature.

Les étapes 1 et 2 ayant été couvertes précédemment, la présente section se focalise sur les étapes 3, 4, 5 et 6. Les paramètres d'incertitude présentés dans le Tableau 3.9 ont été identifiés à l'aide des indices de fiabilité de 1 à 9 définis en fonction de la source de donnée utilisée. Ceux-ci sont présentés de façon exhaustive à la section 2.3. La plage de variation considérée pour chaque paramètre est définie en se basant sur l'étendue des valeurs de référence disponibles dans la littérature. Comme des données expérimentales pour calibrer les paramètres associés à la culture ne sont pas disponibles, ceux-ci ne sont pas calibrés, des

valeurs moyennes en fonction de l'utilisation prévue des parcelles sont utilisées et considérées uniformes et constantes dans le temps.

Tableau 3.9 Paramètres de calibration identifiés

Paramètres	Valeur initiale	Plage de variation	Incrément	Valeur calibrée
Transmissivité du polyéthylène [-]	0,80	0,71 à 0,83	0,03	0,71
Transmissivité du polycarbonate [-]	0,75	0,69 à 0,78	0,03	0,78
Émissivité du polyéthylène [-]	0,90	0,20 à 0,90	0,1	0,70
Absorptivité du sol [-]	0,80	0,70 à 0,90	0,01	0,75
Émissivité du sol [-]	0,94	0,88 à 0,96	0,02	0,96
Densité du sol [kg.m ⁻³]	1800	600 à 2200	100	600
Conductivité thermique du sol [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,5	0,25 à 2,5	0,25	0,5
Capacité thermique massique du sol [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	800	600 à 1400	100	1000
Coefficient d'infiltration des interstices de l'enveloppe [kg.s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	0,002	0,002 à 0,02	0,002	0,012
Coefficient de décharge des événements [-]	0,61	0,61 à 0,74	0,01	0,74

L'analyse de sensibilité a été réalisée à l'aide du coefficient de sensibilité de Lam et Hui (1996) tel que décrit par l'équation (2.3) à la section 2.3. Le calcul du coefficient de sensibilité est fait

par rapport à l'écart quadratique moyen sur la température de bulbe sec ainsi que sur la température de point de rosée simulées et mesurées de l'air dans la serre. La moyenne de ces deux coefficients de sensibilité est utilisée pour la calibration afin de considérer l'impact des paramètres sur la température et l'humidité de l'air. L'ordre de calibration suivant a été défini à la suite de l'analyse de sensibilité :

1. Transmissivité solaire du polyéthylène (calibration sur le PAR à la canopée),
2. Émissivité du polyéthylène,
3. Absorptivité solaire du sol dans la serre,
4. Coefficient de décharge des événements de la serre,
5. Transmissivité solaire du polycarbonate,
6. Densité du sol,
7. Capacité thermique spécifique du sol,
8. Coefficient d'infiltration des interstices dans l'enveloppe de la serre,
9. Conductivité thermique du sol,
10. Émissivité du sol.

La calibration de ces paramètres a été répétée deux fois pour vérifier l'impact de la modification des paramètres ayant un faible coefficient de sensibilité sur la valeur optimale de paramètres ayant un coefficient de sensibilité élevé. L'application de ce processus de calibration a permis d'obtenir les résultats présentés dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 Résultats de la calibration du modèle énergétique

Variable	RMSE	R ²
Température bulbe sec	1,83°C	0,95
Température du point de rosée	2,60°C	0,86
Humidité relative	7,78 %	0,76
Rayonnement photo actif à la canopée	60,63 $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$	0,89

Le résultat de l'erreur moyenne quadratique (RMSE) sur la température bulbe sec dans la serre est dans un ordre de grandeur acceptable par rapport à la valeur de 1,6°C rapportée par Baptista

et al. (2010), pour une période de six jours, mais est supérieur à la précision du capteur utilisé ($\pm 0,21^{\circ}\text{C}$). Le coefficient de détermination (R^2) sur la température bulbe sec simulée présente une bonne corrélation avec les données mesurées. La corrélation entre les données mesurées et simulées est acceptable selon le critère établi par la Guideline 14 de l'ASHRAE (2017) pour un modèle calibré à l'aide de données horaires, car R^2 est supérieure à la valeur seuil de 0,75.

Le résultat de la simulation de l'éclairage naturel a permis d'obtenir une erreur quadratique moyenne (RMSE) dans un ordre de grandeur comparable à la valeur de $33,65 \text{ W.m}^{-2}$ ($67,97 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$, considérant un facteur de conversion de $2,02 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$) obtenue par Zhang et al. (2020). Les résultats pour le rayonnement photo actif ainsi simulé présentent aussi une bonne corrélation avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,89 ce qui est un peu inférieur au coefficient de détermination (R^2) de 0,94 obtenu par Zhang et al. (2020).

Aucune étude dans la littérature n'a utilisé la température de point de rosée de l'air pour sa calibration, les valeurs obtenues pour l'humidité relative sont donc discutées plus en détail pour pouvoir les comparer avec les valeurs obtenues dans la littérature. L'humidité relative simulée dans le modèle calibré présente un RMSE de 7,78% par rapport aux données mesurées. Ce paramètre est réputé pour être le plus difficile à calibrer pour l'étude par STD dans un contexte de serre et la valeur obtenue se compare bien aux résultats d'études antérieures (Baptista et al., 2010; Vanthoor et al., 2011). De plus, elle se situe dans la plage d'incertitude du capteur utilisé ($\pm 3,5$ à $\pm 5\%$). Le coefficient de détermination (R^2) pour l'humidité relative simulée de 0,76, ce qui est relativement faible, mais supérieur à la valeur seuil de 0,75. Il est difficile de savoir comment il se situe par rapport aux études antérieures, car cet indicateur statistique n'est pas beaucoup utilisé pour cette variable. Baptista et al. (2010), Vanthoor et al. (2011) ainsi que Zhang et al. (2020), par exemple, ne rapportent pas celui-ci.

La Figure 3.8 présente une image temporelle des valeurs horaires mesurées et simulées à l'aide du modèle calibré pour la température (a. et b.), l'humidité relative (c. et d.) et le rayonnement photo actif dans la serre (e. et f.). Les Figures 3.8 a., c. et e. présentent une période de 4 jours

en automne, du 28 novembre au 2 décembre 2020, alors que les Figures 3.8 b., d. et f. présentent une période de 4 jours au printemps, du 31 mars au 4 avril 2021.

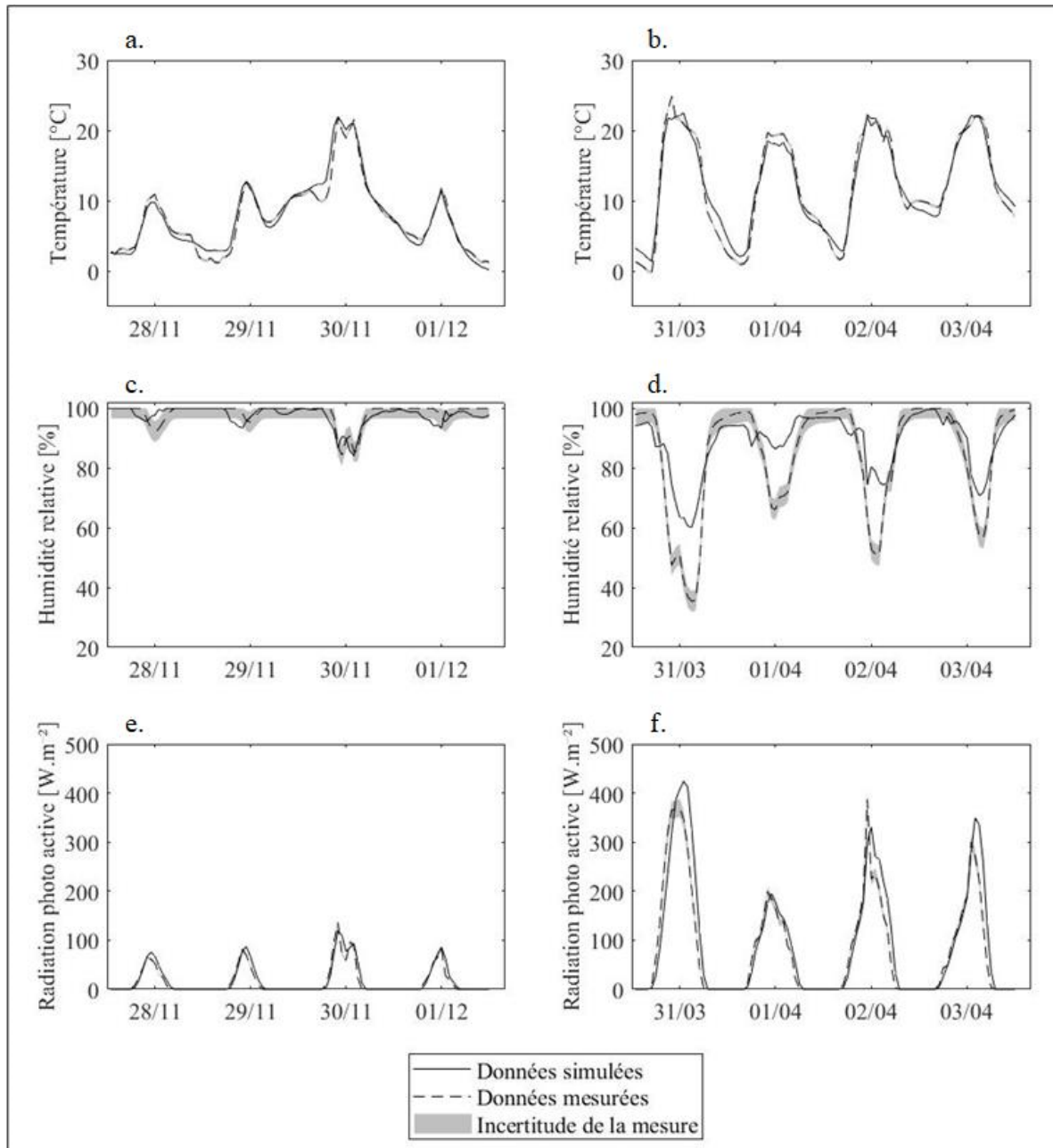


Figure 3.8 Image temporelle des résultats de la calibration pour la période du 28/11 au 01/12 et la période du 31/03 au 03/04

Comme il est possible de l'observer sur la Figure 3.8, la tendance des données simulées suit bien les données mesurées. L'incertitude de l'instrument de mesure est faible et à peine visible pour la température de l'air, cependant, elle est élevée pour l'humidité relative de l'air dans la serre. L'incertitude de la mesure sur le rayonnement photo actif dans la serre varie selon l'intensité du rayonnement et est plus donc grande au printemps qu'en automne. De plus, il est possible de constater que le profil de température simulé est très proche du profil de température mesuré. Cependant, il y a une forte divergence dans l'amplitude de la variation de l'humidité relative de l'air dans la serre au printemps. Durant l'automne, un décalage dans le temps semble se produire entre la courbe d'humidité relative mesurée et simulée. Pour les deux périodes, durant la période nocturne, l'humidité relative mesurée tend vers une valeur de 100%, ce qui n'est pas réaliste. Les profils de rayonnement photo actif mesuré et simulé semblent bien concorder, la différence entre les deux étant plus importante au printemps, ce qui est attendu en raison du fait que l'amplitude de la variation est plus grande durant cette saison.

3.4 Discussion

Plusieurs raisons peuvent expliquer les différences obtenues entre le modèle simulé et les données mesurées. Premièrement, il faut noter que les données météorologiques mesurées sur le site sont incomplètes. La vitesse du vent, sa direction, la pression atmosphérique ainsi que la couverture nuageuse du ciel ne sont pas mesurées localement et les valeurs horaires sont interpolées à partir de points de mesures colligés aux trois heures à une station météorologique à proximité. Toutes ces variables ont un impact important sur les résultats de la simulation énergétique. Par exemple, le vent influence fortement la ventilation naturelle, l'infiltration et la convection forcée aux surfaces extérieures de la serre. La couverture nuageuse influence les pertes par rayonnement à ondes longues vers l'atmosphère ambiante et la distribution du rayonnement incident aux surfaces de la serre par le modèle de Perez et al. (1990). L'émissivité de l'enveloppe et les paramètres influençant le traitement du rayonnement photo actif dans la serre ont été identifiés comme ayant les coefficients de sensibilité les plus élevés du modèle.

Deuxièmement, les modèles théoriques utilisés pour le calcul de la température de la voûte céleste et du sol influencent aussi les résultats. Par exemple, utiliser le modèle de Martin et

Berdahl (1984) plutôt que le modèle de Clark et Allen (1978) pour la température de la voûte céleste entraîne une différence qui se traduit par un RMSE de $3,23^{\circ}\text{C}$ sur la température de la voûte céleste modélisée, ce qui indique un impact potentiel sur les résultats de la calibration. La taille minimale des éléments à volume fini utilisée pour modéliser le sol sous la serre peut aussi influencer les résultats de la simulation. Le RMSE sur la température de surface au sol modélisé avec un maillage deux fois plus fin est de $0,22^{\circ}\text{C}$ par rapport au maillage initial. La précision apportée par un maillage plus fin a peu d'influence sur les résultats. La taille de maillage optimale devrait être déterminé avant de procéder à la calibration. L'influence du contenu en eau du sol dans la serre sur les propriétés thermiques du sol a été négligée, cependant ces paramètres ne présentent pas de forts coefficients de sensibilité et aucune données mesurées n'étaient disponibles pour les modéliser.

Troisièmement, l'incertitude des instruments de mesure utilisé peut causer une différence entre les résultats de la simulation et les données mesurées, particulièrement parce qu'une incertitude sur les données climatiques d'entrée du modèle se traduit par une incertitude sur les résultats de la simulation, mais aussi parce que les variables de sorties du modèle sont comparées à des données ayant une plage d'incertitude. Par exemple, la documentation de l'instrument de mesure utilisé pour mesurer l'humidité relative dans la serre indique que la précision de l'instrument est réduite lorsqu'il est utilisé dans un environnement où l'humidité relative de l'air excède 90%. Or, ce phénomène a été observé fréquemment dans la serre à l'étude en raison de décisions prises par les opérateurs de la serre de limiter la ventilation par temps froid, ce qui semble être la cause des données d'humidité relative mesurées à 100% durant la nuit. D'autre part, le RMSE obtenu est supérieur à la précision de l'instrument de mesure utilisé pour la température de bulbe sec. Cependant, comme l'ordre de grandeur rapporté par des études précédentes est similaire, il semblerait que pour un système aussi sensible, l'incertitude liée aux modèles théorique utilisés est trop grande pour utiliser ce critère de validation.

Quatrièmement, certaines simplifications du modèle proposé peuvent expliquer en partie l'erreur obtenue. Par exemple, pour le bilan d'humidité, le modèle néglige la condensation sur l'enveloppe, l'évapotranspiration du sol et l'effet de la rétention de vapeur d'eau dans le sol.

L'absence de condensation et de rétention de vapeur d'eau dans le sol de la serre explique pourquoi l'humidité relative simulée augmente parfois à 100% alors que dans la réalité la condensation à la paroi limiterait ce phénomène. La canopée dans la serre est aussi considérée constante dans le temps et uniforme dans l'espace. En réalité, la densité de culture dépend de la parcelle et le *LAI* varie durant le cycle de production ce qui fait que l'évapotranspiration de la canopée est surestimée lorsque les plants sont jeunes et sous-estimée lorsque ceux-ci sont matures. Cette simplification pourrait être la cause de l'humidité relative simulée qui est plus élevée que l'humidité relative mesurée dans la serre au printemps. Effectivement, si à ce moment les plants sont plus jeunes et leur *LAI* est plus bas que $3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$, l'évapotranspiration de la canopée est alors surestimée durant cette période.

Finalement, l'analyse de l'éclairage naturel de la serre par traçage des rayons incidents a donné des résultats acceptables. Les paramètres de la simulation de l'éclairage naturel dans le modèle sont plus grossiers et les plantes en tant qu'élément physique interagissant avec la distribution de l'éclairage naturel dans l'espace ne sont pas considérées. Ces simplifications permettent de réduire le temps de calcul de la simulation de l'éclairage naturel significativement. Comme les plantes cultivées sont des laitues, elles poussent moins en hauteur et ont peu d'impact sur la distribution de l'éclairage naturel dans la serre. L'affinage des paramètres de la simulation de l'éclairage naturel dans la serre permet d'obtenir un RMSE de $59,02 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ($R^2 = 0,90$). L'utilisation de l'analyse grossière pour la calibration du modèle semble un compromis acceptable. Une source d'erreur de l'analyse de l'éclairage naturel provient des facteurs de conversion utilisés pour convertir les valeurs de luminosité en PPFD et en irradiance afin de résoudre le bilan énergétique de la canopée. Tel que mentionné précédemment, le facteur de conversion constant utilisé n'est pas représentatif de la réalité, mais cette hypothèse était nécessaire en raison de la nature des données disponibles pour la calibration.

CHAPITRE 4

ÉTUDES DE CAS

Le chapitre suivant présente deux études de cas réalisées à l'aide de modèles énergétiques de serres développés dans TRNSYS en suivant la procédure présentée dans le CHAPITRE 3. Ces études de cas visent à illustrer l'utilité des outils de simulation énergétique pour la conception de la serre ainsi que des systèmes de régulation de la température utilisés dans les serres.

Dans un premier cas, les conditions de croissance maintenues dans deux serres froides localisées à Lemieux sont comparées sur la base de différents indicateurs de performance. Dans un second cas, la performance énergétique d'une serre en arche gothique localisée à Baie-Comeau équipée de deux types de systèmes de chauffage différents pour réguler la température dans la serre est étudiée.

4.1 Étude de cas 1 – Comparaison de serres froides

La première étude de cas vise à comparer la performance énergétique de deux serres froides de conceptions différentes, soient une serre à arche gothique et une serre chinoise partiellement enterrée de dimensions comparables. La performance énergétique dans le cas d'une serre froide est basée sur l'étude du profil thermique à l'aide d'indicateurs de performance appropriés tel que spécifiés au Tableau 2.2. Aucun système de chauffage n'est utilisé pour réguler la température dans les serres froides étudiées. Les deux serres considérées sont localisées à Lemieux (46,3°N 70,1°O), une municipalité de la région du Bas-Saint-Laurent, au Québec. Les données météorologiques utilisées pour la simulation énergétique de cette étude de cas proviennent d'un fichier de données météorologiques standardisées dans le format EPW. Ces données représentent une année météorologique typique observée à Lemieux. Une année météorologique typique est un assemblage de mois représentatif statistiquement de la tendance observée pour cette localisation sur une période d'au moins 30 ans.

La première est une serre en arche gothique identique à celle présentée à la sous-section 3.1, à l'exception que celle-ci est orientée sur l'axe Est-Ouest sur sa longueur afin de bénéficier d'un maximum d'ensoleillement hivernal (Rasheed et al., 2018). À l'exception des données météorologiques utilisées, le modèle respecte l'approche présentée à la sous-section 3.2. La seconde serre froide à l'étude est une serre chinoise partiellement enterrée. Celle-ci a une surface de plancher et un volume d'air intérieur similaire à la serre à arche gothique. L'enveloppe de la serre chinoise est conçue afin d'en maximiser la performance thermique et d'obtenir une plus longue saison de culture.

Il est attendu que plusieurs facteurs tels que la température stable du sol, sa masse thermique, la résistance et l'inertie thermique des matériaux de construction du mur nord dans la serre chinoise permettent d'atténuer les variations extrêmes de la température de l'air intérieur de la serre. D'un autre côté, la réduction de la surface de la couverture transparente de l'enveloppe pourrait causer une diminution du rayonnement photo actif disponible à la canopée. L'inclinaison de la couverture a donc été conçue pour maximiser le rayonnement solaire capté durant l'année.

Pour la modélisation de la canopée, les mêmes hypothèses sont posées pour la culture dans la serre à arche gothique que pour la serre chinoise. La canopée est donc représentée par un modèle de laitue en considérant un LAI de $3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ et la fraction de couverture du sol f_{cult} considéré est de 0,6. La canopée dans les deux serres est modélisée à l'aide du modèle de Talbot et Monfet (2020) modifié, tel qu'il est présenté dans le paragraphe 3.2.4. De plus, la distribution de l'éclairage naturel dans les deux serres a été évalué en utilisant les valeurs des paramètres de simulation de Radiance pour une analyse fine tels qu'ils sont présentés dans le Tableau 3.8.

4.1.1 Présentation de la serre chinoise partiellement enterrée

La serre chinoise proposée a une largeur de 7,6 m, une longueur de 32,5 m et une hauteur maximale de 4,5 m entre le plancher de la serre et son point le plus haut. Le plancher de la serre est à une profondeur de 1 m par rapport au sol. Ces dimensions permettent d'obtenir une

superficie de plancher et un volume d'air dans la serre similaires à la serre en arche gothique tout en maximisant le ratio entre la hauteur de la serre et sa largeur. L'augmentation de ce ratio a été démontré comme permettant d'améliorer la performance thermique de ce type de serre (Geery, 1982; Tong et al., 2013). La couverture transparente est orientée vers le sud pour recevoir le maximum d'éclairage naturel. L'inclinaison de la couverture est de 46 degrés par rapport à l'horizontale dans sa première section, puis de 15 degrés par rapport à l'horizontale dans la seconde section. La Figure 4.1 présente le modèle 3D de la serre chinoise partiellement enterrée utilisé pour modéliser la serre proposée dans TRNSYS.

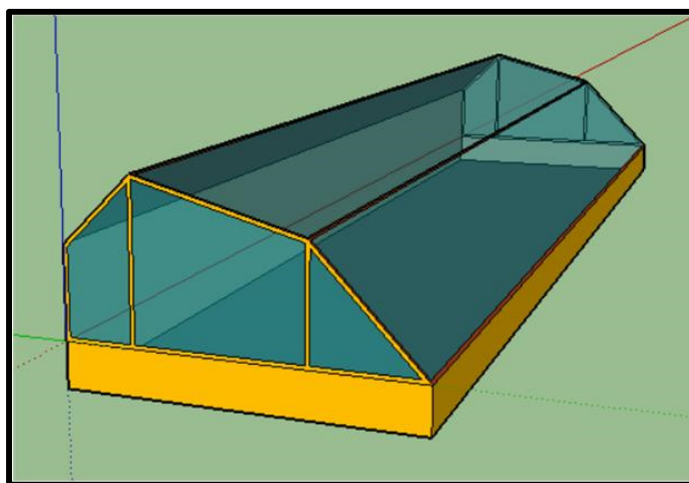


Figure 4.1 Modèle 3D de la serre chinoise

Sur la Figure 4.1, l'axe y représente l'axe Nord-Sud. L'inclinaison de la première section est égale à la latitude de la localisation ($46,3^\circ$) afin de maximiser le rayonnement solaire moyenne annuel intercepté par cette surface. L'inclinaison de la seconde section est choisie afin de mieux capter le soleil lorsqu'il est à son zénith au solstice d'été (62°) tout en conservant un volume d'air similaire à celui de la serre en arche gothique. Une inclinaison de $53,5^\circ$ pour la première section aurait permis de maximiser le rayonnement solaire hivernal capté à cette latitude (Tong et al., 2013) et d'augmenter le volume d'air dans la serre.

Les murs souterrains de la serre ainsi que le mur nord de la serre sont composés de blocs de béton isolés sur leur face extérieure par un panneau de polystyrène extrudé. La portion nord du

toit de la serre est elle aussi isolé par des panneaux de polystyrène extrudé. La surface intérieure du mur et du toit au nord sont couvertes de papier d'aluminium réfléchissant afin de redistribuer le rayonnement solaire dans la serre. Le Tableau 4.1 résume les matériaux de construction utilisés et le coefficient de transmission thermique global pour les différentes surfaces opaques de la serre chinoise, les propriétés thermiques des matériaux de construction utilisés sont détaillées au Tableau A III-2 de l'ANNEXE III.

Tableau 4.1 Matériaux de construction des murs opaques de la serre chinoise

Murs	Construction (épaisseur)	Coefficient de transmission thermique global U
Mur nord	Extérieur – Recouvrement PVC (0.005 m); Polystyrène (0.1 m); Blocs de béton (0.2 m); Papier d'aluminium (N/A) – Intérieur	0,228 W.m ⁻² .K ⁻¹
Toit nord	Extérieur – Recouvrement PVC (0.005 m); Polystyrène (0.1 m); Bois d'épinette (0.013 m); Papier d'aluminium (N/A) – Intérieur	0,233 W.m ⁻² .K ⁻¹
Murs de fondation	Extérieur – Polystyrène (0.1 m); Blocs de béton (0.2 m) – Intérieur	0,227 W.m ⁻² .K ⁻¹
Structure de l'enveloppe	Extérieur - Acier (0,05 m) – Intérieur	5,769 W.m ⁻² .K ⁻¹

Dans le Tableau 4.1, il est possible de constater que la construction du mur et du toit nord de la serre chinoise partiellement enterrée permet de limiter les pertes thermiques à travers ceux-ci. La structure de l'enveloppe transparente est construite à l'aide des mêmes matériaux que pour la serre en arche gothique, c'est-à-dire une enveloppe en polyéthylène double épaisseur et des murs de pignons couverts de panneaux de polycarbonate.

La ventilation naturelle est réalisée par un évent de toit de 30 m de large par 1,2 m de haut orienté vers le sud. Lorsque l'évent de toit est fermé, la longueur de son périmètre est considérée comme un interstice par laquelle l'air peut s'infiltrer. La longueur d'interstices appliquée au coefficient d'écoulement des interstices sur les murs de pignon de la serre est de 20 m. Les paramètres considérés pour définir les infiltrations dans TRNFLOW (coefficient d'écoulement et exposant) sont les mêmes que pour la serre en arche gothique. Les valeurs illustrées par le Tableau 4.2 sont considérées pour le coefficient de pression du vent moyen sur les surfaces de la serre, en se basant sur le standard EN13031-1 pour la géométrie de la serre proposée. Il faut mentionner que le standard EN13031-1 ne présente pas de valeurs pour le toit d'une serre chinoise et les valeurs pour le toit d'une serre à arche gothique ayant une pente similaire sont utilisées. Les coefficients de pression du vent sur le mur nord sont considérés égaux à ceux appliqués sur les murs de côté verticaux dans une serre.

Tableau 4.2 Coefficients de pression du vent moyen sur la serre chinoise

Azimut de la surface (inclinaison)	Direction du vent			
	Ouest	Nord	Est	Sud
Nord	-1	-0,3	-1	0,7
Sud (46°)	-1	0,3	-1	-0,4
Ouest	-0,3	-1	0,7	-1
Est	0,7	-1	-0,3	-1
Toit sud (15°)	-1	0,2	-1	-0,4

Le coefficient de pression moyen du vent sur les surfaces inclinées de la façade sud sont inférieurs à celui appliqué sur les surfaces verticales lorsque le vent arrive de face par rapport à la surface du toit. Comme la serre chinoise proposée est orientée plein sud, les coefficients utilisés pour les autres surfaces sont modifiés afin de représenter cette orientation.

La discrétisation du sol autour de la serre est effectuée par la méthode des éléments à volume fini de manière similaire à celle décrite à la section 3.2.3 en utilisant le Type 1244 dans

TRNSYS (TESS, 2012). La Figure 4.2 illustre la discrétisation du sol sous la serre chinoise partiellement enterrée.

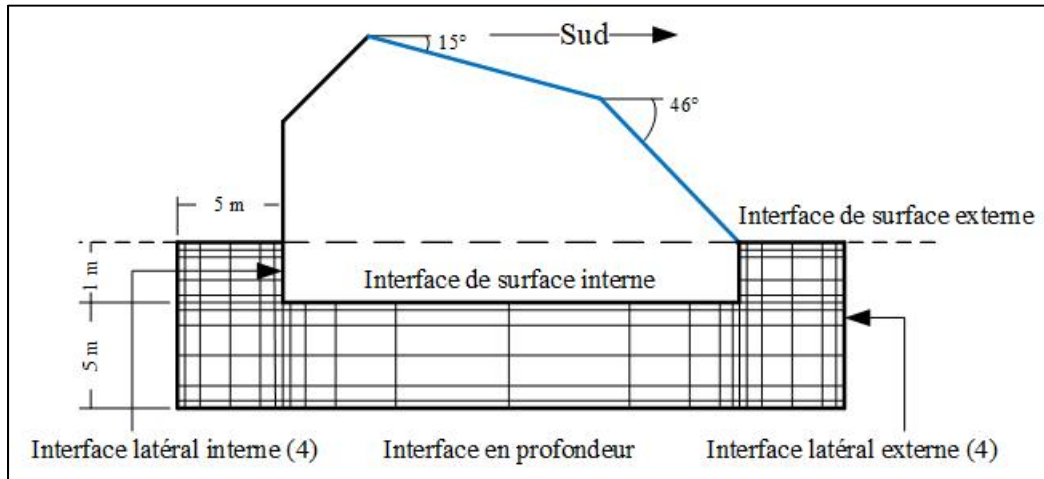


Figure 4.2 Discretisation du sol sous la serre chinoise (vue du mur pignon)

Dans le cas de la serre chinoise partiellement enterrée, le transfert de chaleur entre les murs souterrains et le sol autour de la serre est aussi considéré par le modèle. Cet échange se produit à l'interface latéral interne sur la Figure 4.2.

La serre chinoise est équipée de quatre ventilateurs de circulation d'air ainsi que de deux ventilateurs à pression positive situés sur le mur de pignon ouest. Les caractéristiques techniques, conditions d'opération et séquences de contrôle guidant l'utilisation de ces ventilateurs sont les mêmes que celles définies dans le modèle de la serre en arche gothique et sont présentés au paragraphe 3.2.4. L'ouverture de l'évent de toit se produit lorsque la température de l'air intérieur dépasse 18°C et s'ouvre graduellement jusqu'à une ouverture complète si la température dépasse 22°C. Aucun système de chauffage n'est utilisé.

Les points de lecture pour l'analyse de l'éclairage naturel sont répartis dans l'espace de la même manière que dans la serre à arche gothique à une hauteur de 0,5 m du sol, tel que présenté à la Figure 3.7. Les paramètres d'analyse fine pour l'analyse de l'éclairage naturel sont utilisés.

4.1.2 Résultats

Les performances énergétiques de la serre en arche gothique et de la serre chinoise sont comparées sur la base des indicateurs de performance définis à la section 2.4 en utilisant les résultats d'une simulation énergétique annuelle réalisée en utilisant un pas de temps d'une minute. Les indicateurs utilisés sont la durée de la saison de croissance thermique, l'indice de surchauffe, l'indice de gel et l'intégrale de l'éclairage naturel journalier (DLI) dans la serre. Le nombre de degrés-jours de croissance, l'indice de confort thermique et l'indice photothermique sont aussi présentés pour la culture de la laitue. La Figure 4.3 présente la distribution de la température moyenne journalière enregistrée dans les serres.

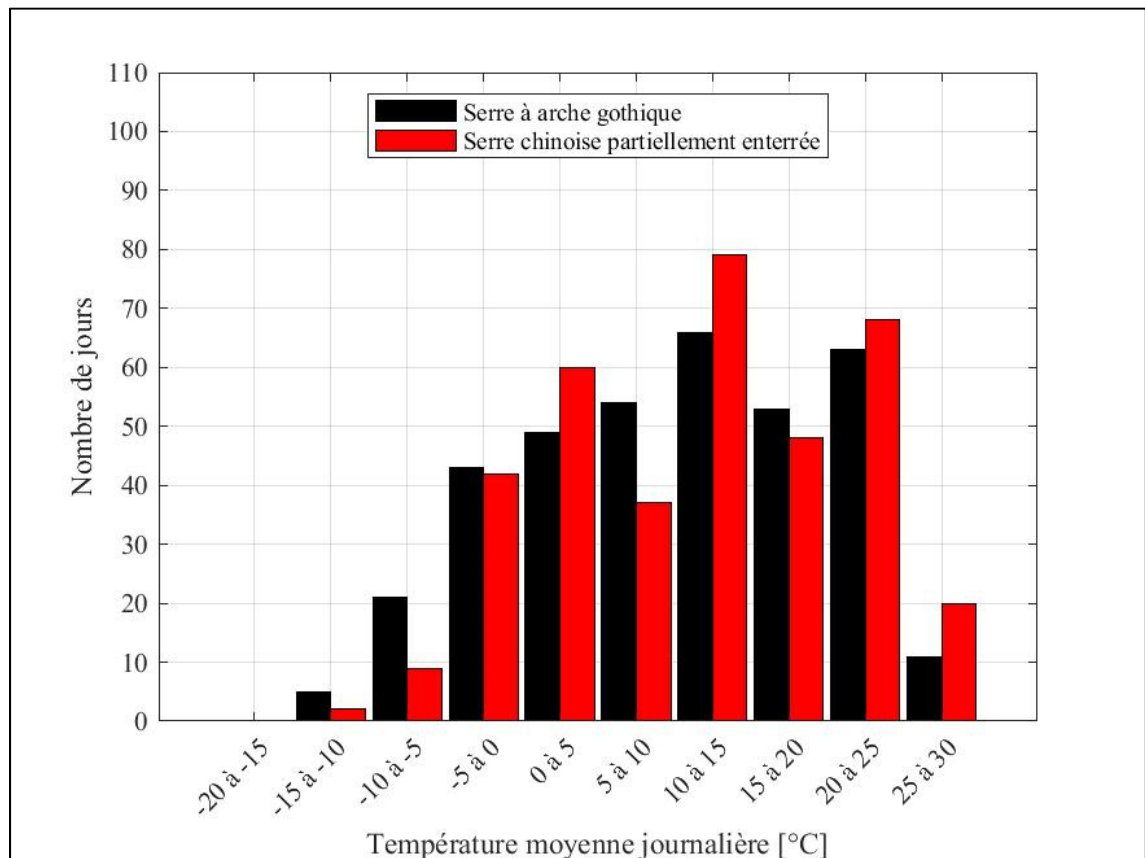


Figure 4.3 Distribution de la température moyenne journalière dans les serres

Les températures moyennes journalières dans la serre chinoise sont réparties entre -15°C et 30°C , alors que dans la serre à arche gothique, celles-ci sont réparties entre -20°C et 30°C . La distribution de la température dans la serre chinoise est généralement décalée vers les températures plus élevées par rapport à la serre à arche gothique. Pour mieux observer l'évolution du profil thermique des deux serres dans le temps, la Figure 4.4 et la Figure 4.5 présentent le profil annuel de la température moyenne journalière et de l'écart de température journalière maximal, respectivement pour les deux types de serres à l'étude.

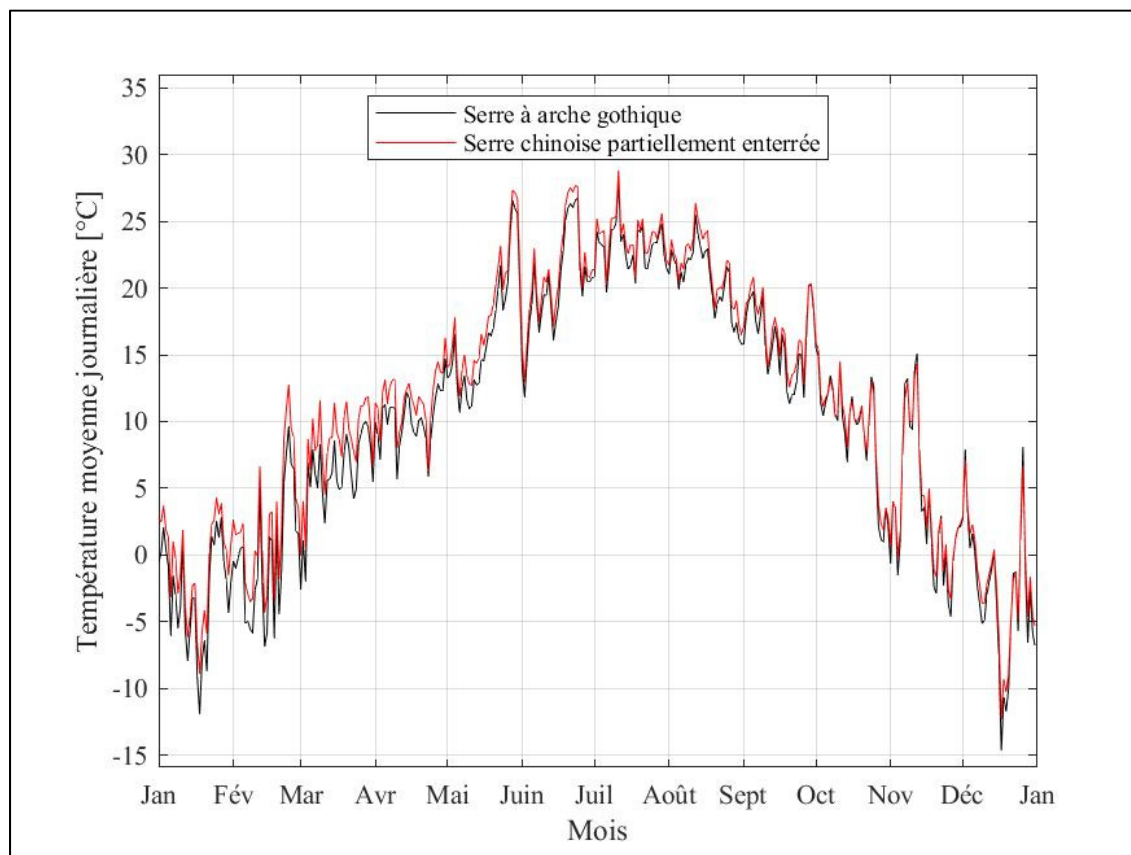


Figure 4.4 Profil annuel de la température moyenne journalière dans les serres

Dans la Figure 4.4, il est possible d'observer des températures plus chaudes dans la serre chinoise partiellement enterrée que dans la serre en arche gothique. Ces résultats s'expliquent par la résistance thermique du mur nord dans la serre chinoise qui permet de limiter les pertes thermiques par celui-ci. Les murs souterrains de la serre permettent aussi de réduire la surface

d'exposition aux températures extrêmes de l'air extérieur. L'inertie thermique du sol autour de la serre et des matériaux de construction utilisés pour le mur nord et les murs souterrains contribue probablement à accumuler la chaleur durant la journée et la relâcher durant la nuit. Cependant, dans la serre chinoise comme dans la serre à arche gothique, les températures sont souvent plus élevées que le point de consigne de la ventilation (24°C) en été, ce qui semble indiquer que la capacité de la ventilation modélisée n'est pas suffisante durant ces mois. L'infiltration dans les serres est une source de pertes de chaleur importante, ce qui explique pourquoi la rétention de chaleur dans les deux serres est limitée en hiver.

La Figure 4.5 présente l'évolution de l'écart de température maximal journalier pour les deux types de serre étudiés. Celui-ci est mesuré en soustrayant la température horaire minimale à la température horaire maximale simulée pour chaque période de 24 h consécutive.

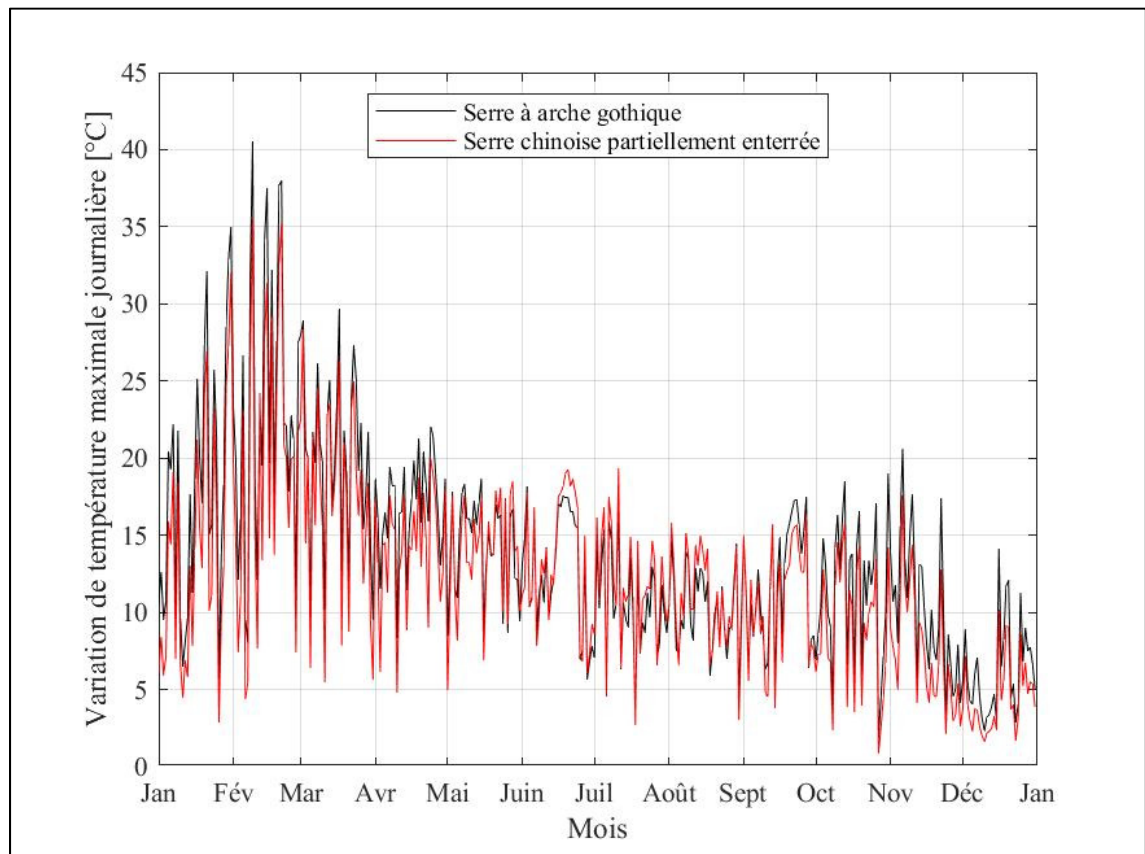


Figure 4.5 Profil annuel de l'écart de température maximal journalier dans les serres

L'écart de température maximal journalier est plus faible dans la serre chinoise que dans la serre en arche gothique du printemps à l'automne. Au printemps et à l'automne, ceci s'explique par les températures plus élevées dans la serre justifiant l'emploi de la ventilation. Celle-ci limite alors l'amplitude de la variation de température de l'air. Durant les mois d'hiver l'écart maximal de température journalier est plus élevé dans la serre à arche gothique, car les températures nocturnes y sont plus basses. L'écart maximal dans la serre chinoise est plus élevé que dans la serre à arche gothique durant l'été, car la ventilation ne permet pas d'y maintenir les points de consigne plus fréquemment que dans la serre à arche gothique. La différence d'ensoleillement journalier reçu par les plantes est aussi évaluée dans les deux serres et la Figure 4.6 présente la distribution mensuelle de l'intégrale de l'éclairage naturel journalier (DLI) dans les deux serres pour chaque mois sous la forme d'une série de boîtes à moustaches.

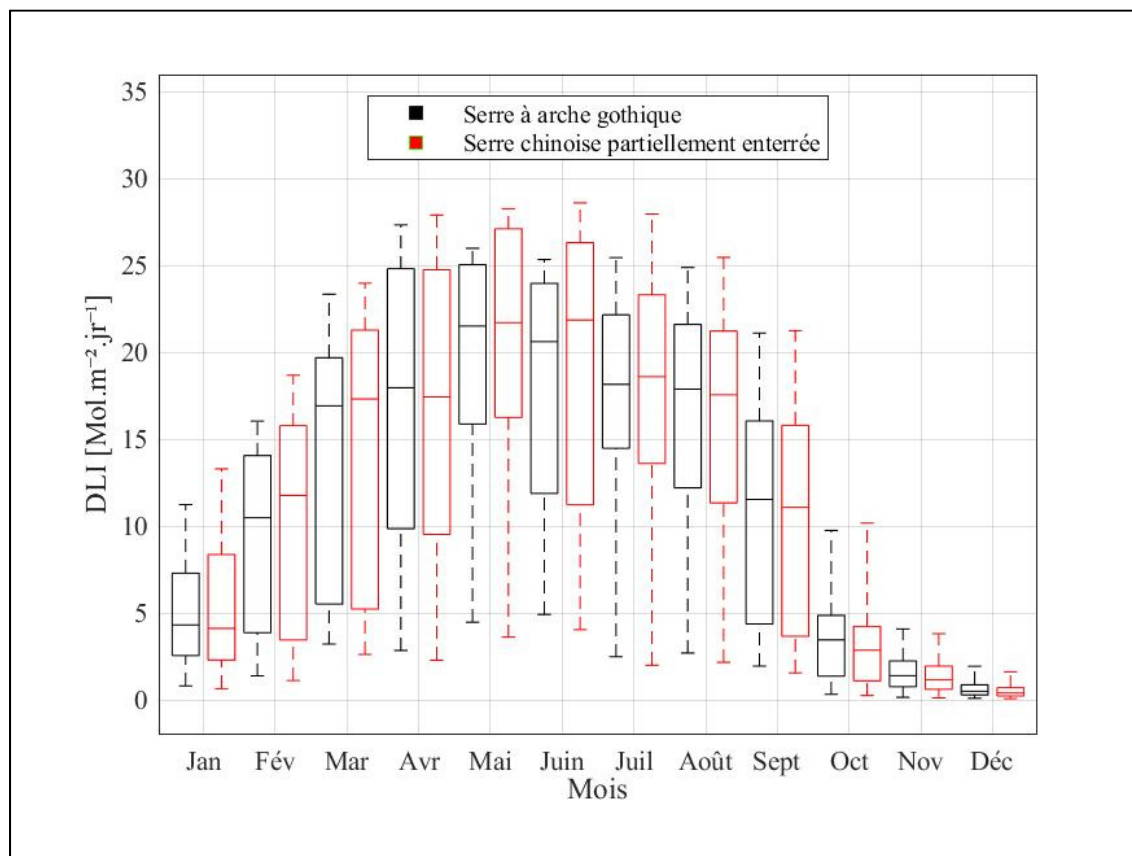


Figure 4.6 Distribution mensuelle de l'éclairage naturel journalier dans les serres

La Figure 4.6 permet d'observer en détail la différence d'éclairage naturel reçu par la canopée dans les deux serres au cours de l'année. La distribution mensuelle de l'ensoleillement journalier est avantageuse dans la serre chinoise partiellement enterrée, ce qui peut s'expliquer par la conception optimisée de sa façade sud. L'éclairage naturel reçu y est moins élevé durant les mois d'octobre à décembre. La Figure 4.7 met en relation la température moyenne mensuelle et l'éclairage naturel journalier moyen mensuel dans les serres.

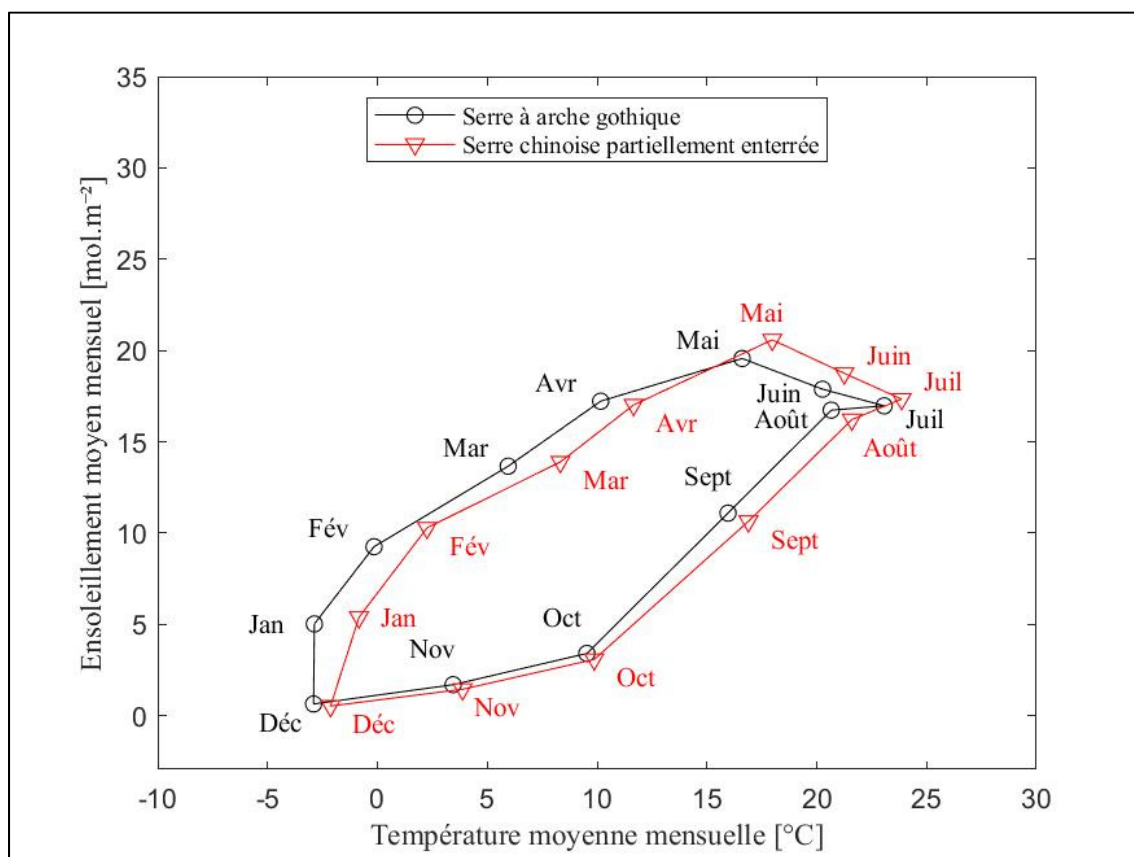


Figure 4.7 Température et éclairage naturel journalier moyen mensuel dans les serres

Il est possible d'observer que les profils de la moyenne mensuelle de l'éclairage naturel journalier par rapport à la température moyenne mensuelle dans les deux serres sont similaires. Dans l'ensemble la serre chinoise semble présenter un profil avantageux pour ces deux variables, car les températures et l'éclairage naturel moyens mensuels sont en général plus

élevés. Ceci vient confirmer les observations faites précédemment. Il faut noter que l'orientation des serres exerce une grande influence sur l'éclairage naturel reçu dans celles-ci et l'impact d'un changement d'orientation devrait être étudié pour les deux types de serre.

Des indicateurs de performance sont cependant utilisés afin de faire la synthèse de l'information observée dans les figures précédentes afin d'évaluer et de comparer le potentiel impact sur les cultures dans ces deux serres. Ceux-ci sont présentés dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Comparaison d'indicateurs de performance pour les serres étudiées

Indicateur de performance	Serre à arche gothique	Serre chinoise partiellement enterrée
Saison de croissance thermique	254 jours	276 jours
Indice de gel	1905 heures	1472 heures
Indice de surchauffe	142 heures	244 heures
Indice de confort thermique (laitue)	1676 heures	1728 heures
Degrés-jours de croissance (laitue)	2872 degrés-jours	3155 degrés-jours
Indice photo-thermique (laitue)	49,2 MJ.m ⁻²	44,1 MJ.m ⁻²

La durée de la saison de croissance thermique indique que la serre chinoise partiellement enterrée permet de maintenir passivement la température de la serre dans une plage adéquate sur une plus longue période. Elle permet aussi de limiter l'occurrence de températures sous la limite de gel, fixée à 0°C pour la laitue (Hanan, 1997). L'occurrence d'évènements de surchauffe de la serre au-delà de la limite biologique fixée à 30°C (Hanan, 1997) est observée en plus grand nombre que dans la serre à arche gothique, de ce nombre, la température de l'air extérieure dépasse la limite biologique durant 77 h. La capacité de la ventilation forcée installée dans la serre est donc insuffisante durant 167 h et 65 h dans la serre chinoise et dans la serre à arche gothique, respectivement.

L'indice de confort thermique adapté pour la laitue indique que la plage optimale de température pour la laitue (10 à 18°C) est respectée davantage dans la serre chinoise que dans

la serre à arche gothique, cependant cette différence est minime. Les degrés-jours de croissance calculés pour la température minimale biologique de la laitue (4°C) sont sensiblement plus élevés dans la serre chinoise partiellement enterrée, ce qui s'explique par les températures plus élevées enregistrées dans cette serre. L'indice photo-thermique pour la laitue avantage cependant la serre en arche gothique, ce qui s'explique par les températures plus basses enregistrées dans cette serre en été. L'indice photo-thermique compare la température à la plage de température optimale de la laitue, puis ajuste le rayonnement solaire reçue en conséquence pour illustrer la capacité de la plante à utiliser celle-ci dans les conditions de température données. L'indice de surchauffe indique que la température dans la serre chinoise dépasse la limite biologique de la laitue plus fréquemment que dans la serre à arche gothique en été. Il faut noter que la valeur de l'indice photo-thermique présenté ici est valide pour la laitue, qui est adaptée à un climat plus frais, ce qui avantage la serre à arche gothique dans cette étude de cas étant donné que les températures dans celle-ci sont moins élevées.

4.1.3 Discussion

La serre chinoise partiellement enterrée permet d'étendre la période de production potentielle d'un peu moins d'un mois grâce à des températures plus élevées en hiver. Ces effets sont confirmés par un indice de gel plus faible pour la serre chinoise que dans la serre en arche gothique, soit 1472 heures où la température moyenne se situe en deçà de la limite de gel, pour la serre chinoise contre 1905 heures pour la serre en arche gothique. Les températures plus chaudes en hiver dans la serre chinoise peuvent s'expliquer par les facteurs suivants :

1. La résistance thermique des murs opaques de la serre chinoise qui limite les pertes de chaleur par conduction à travers ceux-ci;
2. La surface d'exposition réduite aux températures extrêmes de l'air extérieur, les murs souterrains étant exposés à des températures plus élevées et plus stables en hiver;
3. La masse thermique du sol et des matériaux de construction utilisés pour les murs opaques de la serre chinoise permet de stocker l'excédent de chaleur dans la serre le jour et réchauffer la serre la nuit.

Les degrés-jours de croissance sont supérieurs dans la serre en arche gothique pour la laitue. Ce résultat pour cet indicateur s'explique, car il ne considère pas la limite maximale biologique de la plante et les températures moyennes journalières sont plus élevées dans la serre chinoise. L'impact sur la production dans la serre de la température associée à l'éclairage dans la serre en considérant la plage de température de la plante cultivée est décrite par l'indice photo-thermique. La serre chinoise dépasse plus fréquemment la température maximale biologique des plantes. La ventilation dans la serre chinoise ainsi que dans la serre à arche gothique est insuffisante pour prévenir complètement la surchauffe de la serre, l'indice de surchauffe étant de 142 h et 244 heures dans la serre en arche gothique et dans la serre chinoise, respectivement. L'approche de modélisation présentée pourrait être utilisée afin de concevoir adéquatement la ventilation de la serre afin de combattre cet effet. L'impact de la surchauffe se fait ressentir sur l'indice photo-thermique. Effectivement, malgré un profil d'éclairage naturel comparable et un profil de température généralement avantageux dans la serre chinoise, l'indice photo-thermique pour la laitue y est plus faible. Aucune stratégie permettait le contrôle de l'humidité dans le contexte de cette étude puisque dans cette serre froide, la ventilation hivernale a été limitée pour éviter que les températures dans la serre descendent sous la limite de gel. En l'absence de stratégie de contrôle sur l'humidité de la serre, aucun indicateur de performance sur cette variable n'est donc considéré.

Une orientation différente de la serre à arche gothique peut influencer les résultats de l'analyse comparative menée dans cette étude de cas. Les conclusions de cette étude de cas ne peuvent donc pas être généralisées à toutes les conceptions de serres à arche gothique et toutes les conceptions de serres chinoises. Une étude paramétrique sur les paramètres de conception de chaque serre (orientation, dimension et position des événements, ajout d'éléments de masse thermique, etc.) pourrait cependant être réalisée à l'aide de cette approche de modélisation pour optimiser une conception de serre et favoriser les conditions de cultures dans celle-ci. Une étude approfondie de l'indice photo-thermique en définissant les périodes où il est plus élevé pour un certain type de plantes permettrait de mettre en place une stratégie de production adaptée aux conditions saisonnières. Le cyclage des plants de cette façon est une stratégie permettant d'augmenter le rendement de serre passives (Castilla et Montero, 2008).

Les résultats obtenus sont surprenants, car une plus grande différence entre la serre à arche gothique et la serre chinoise partiellement enterrée étaient anticipés. Ceci peut être expliqué par le modèle de l'infiltration considéré résultant de la calibration. Dans ce modèle, l'infiltration représente une importante source de perte de chaleur en hiver et les paramètres d'infiltration calibrés utilisés sont les mêmes pour les deux serres. La calibration des paramètres d'infiltration dans une serre chinoise partiellement enterrée devrait être réalisée dans le futur. De plus, le stockage de la chaleur dans le modèle de sol utilisant les propriétés thermiques du sol calibrées semble faible et peut sous-estimer la contribution du stockage thermique à la régulation de la température dans la serre chinoise.

4.2 Étude de cas 2 – Comparaison de deux systèmes de chauffage de serre

Cette deuxième étude de cas vise à utiliser le modèle énergétique d'une serre chaude développé dans TRNSYS afin de comparer la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'un système de chauffage par un aérotherme au propane à celles d'un système permettant la récupération de la chaleur d'un centre de données. Les indicateurs de performance reliés à l'utilisation de l'énergie pour l'opération de serres chauffées sont sélectionnés afin de comparer les deux systèmes de chauffage (voir Tableau 2.2).

La serre étudiée est localisée dans la municipalité de Baie-Comeau, au Québec (49,2°N; 68,2°O). L'étude de cas vise à tirer profit de la présence d'un centre de données existant dont les salles de serveurs produisent une quantité importante de chaleur fatale. Les systèmes permettant de valoriser dans une serre en arche gothique adjacente afin d'en assurer le chauffage durant l'hiver et les bénéfices énergétiques de cette stratégie de chauffage de la serre par rapport à des méthodes plus conventionnelles sont étudiés.

4.2.1 Modélisation de la serre

Les données météorologiques utilisées pour cette étude de cas proviennent d'un fichier de données standardisé dans le format EPW. Ce fichier contient des données météorologiques

pour une année typique générée à l'aide de données mesurées par une station météorologique localisée à Baie-Comeau.

La serre modélisée dans le cadre de cette étude de cas est une serre en arche gothique similaire à celle modélisée pour l'étude de cas #1. La superficie au plancher est de 153 m^2 (7,6 m de large par 20 m de long) et la hauteur au centre est de 4,5 m. La Figure 4.8 présente le modèle 3D de la serre développée dans l'outil de modélisation TRNSYS3D. La longueur de la serre est orientée selon l'axe Nord-Sud, représenté en vert sur la Figure 4.8.

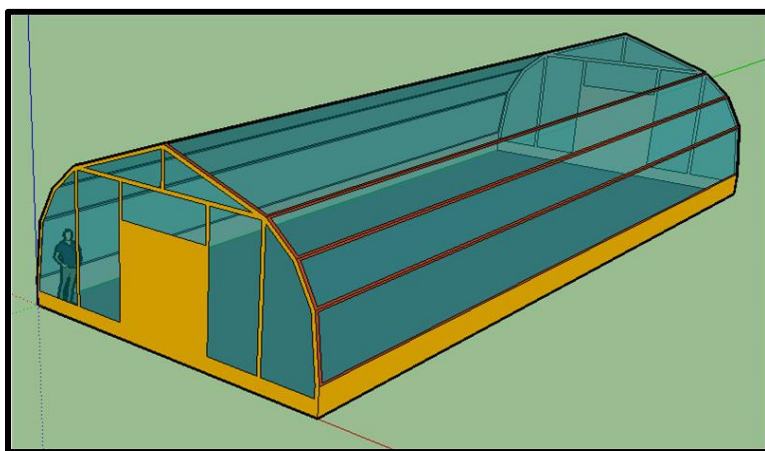


Figure 4.8 Modèle 3D de la serre de Baie-Comeau

Comme pour la serre en arche gothique détaillée dans le paragraphe 3.2.2, la structure de la serre est modélisée par une couche d'acier de 0,05 m ayant les propriétés thermiques présentées dans le Tableau A III-2 de l'ANNEXE III.

Les matériaux de couverture transparents pour l'enveloppe et les murs pignons de la serre sont les mêmes que ceux présentés dans le paragraphe 3.2.2. Les infiltrations à travers l'enveloppe de la serre se produisent à travers des ouvertures sur une longueur totalisant 30 m sur les faces nord et sud et 20 m sur les faces est et ouest. Le pourtour opaque de la serre au niveau du sol est recouvert d'un panneau de polystyrène de 0,1 m d'épaisseur. Aucun évent pour la ventilation naturelle n'est installé sur la serre proposée.

Le sol sous la serre est modélisé par la méthode de résolution numérique de discrétisation en élément à volume fini suivant l'approche présentée à la sous-section 3.2.3 à l'aide du Type 1244 dans TRNSYS (TESS, 2012).

4.2.2 Modélisation des systèmes CVCA

La ventilation de la serre est assurée exclusivement par ventilation forcée à l'aide de deux ventilateurs à pression positive sur la face sud de la serre et d'un volet motorisé installé sur la face nord afin d'assurer l'évacuation de l'air. Ces ventilateurs ont les mêmes caractéristiques que les ventilateurs présentés au paragraphe 3.2.4. Quatre ventilateurs horizontaux sont aussi installés dans la serre afin d'assurer la circulation de l'air, ceux-ci sont en opération continuellement et chacun dissipe 75 W sous forme de chaleur dans la serre.

Deux systèmes de chauffage différents sont étudiés, la capacité de chauffage requise pour le design de ces systèmes est de 96 kW (Cousin et Lekounougou, 2020). Le premier système de chauffage étudié sert de référence et est composé d'un aérotherme au propane. Le second système étudié vise à récupérer la chaleur fatale d'une salle de serveur du centre de donnée.

Système de chauffage conventionnel

Le premier système étudié est un système de chauffage conventionnel utilisé dans les serres, soit par convection d'air chauffée à l'aide d'un aérotherme. La chaleur est tirée de la combustion d'un combustible fossile. Dans le cas présent, en raison de l'éloignement de la serre du réseau de distribution de gaz naturel, le combustible utilisé est le propane. Le pouvoir calorifique de celui-ci est de $25,3 \text{ MJ.m}^{-3}$ lorsqu'utilisé dans des applications de chauffage de l'air (RNC, 2013). La Figure 4.9 présente la serre équipée du système de chauffage convectif.

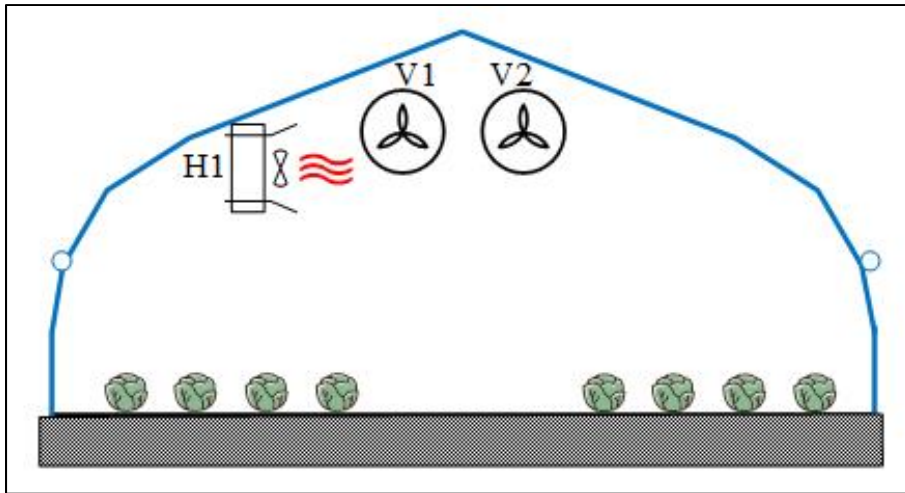


Figure 4.9 Serre de Baie-Comeau équipée du système de chauffage conventionnel

L'aérotherme au propane installé pour le chauffage d'appoint a une capacité de chauffage de 96 kW, un rendement thermique de 83% et son ventilateur demande 1,5 kW de puissance électrique (Carrier Reznor UDBP400).

Système de récupération de chaleur

Ce système est conçu afin de récupérer la chaleur fatale d'une salle de serveurs d'un centre de données composé de huit salles de serveurs. Celles-ci produisent chacune 1 MW de chaleur fatale (Cousin et Lekounougou, 2020). Le processus de refroidissement du centre de données est représenté à la Figure 4.10. L'air frais est d'abord tiré par des ventilateurs d'alimentation de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment (T1), puis il est poussé à travers une membrane filtrante vers les serveurs (T2). La chaleur des serveurs est transférée à l'air par convection et l'air monte dans la salle de serveurs (T3). Finalement, les ventilateurs des cheminées d'extraction évacuent l'air de la salle vers l'extérieur (T4).

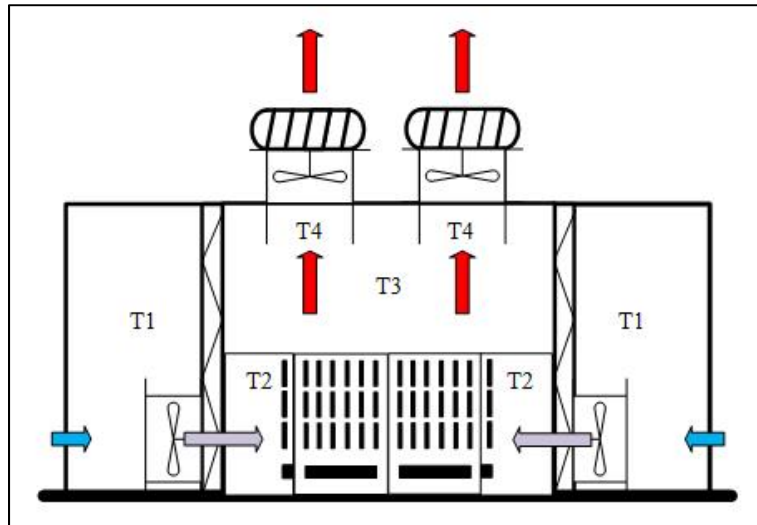


Figure 4.10 Refroidissement d'une salle de serveurs

Le Tableau 4.4 présente la température de l'air mesurée dans deux salles de serveurs aux différents points présentés par la Figure 4.10. Les mesures ont été prises dans une étude sur le terrain menée par Cousin et Lekounougou (2020).

Tableau 4.4 Température de l'air dans les salles de serveurs

Salle de serveur échantillonnée	T1	T2	T3	T4
Salle de serveurs #2	20,7°C	37,8°C	31,3°C	32,6°C
Salle de serveurs #6	20,3°C	37,3°C	32,7°C	30,2°C

En raison de la nature des activités du centre de données et de son importante consommation électrique, il est prévu que des périodes de délestages soient imposées par le fournisseur d'électricité lors des périodes de pointes afin de permettre d'assurer la demande de pointe des services essentiels à la population québécoise. Ces périodes de pointes sont entre 6:00 et 9:00 le matin et 18:00 et 20:00 le soir, si la température extérieure est très froide. Pour cette étude de cas, la température limite pour le délestage du centre de données est fixée à -15°C. Durant cette période, les huit salles de serveurs du centre de données sont coupées de l'alimentation

électrique et aucune chaleur ne peut donc en être extraite. Durant ces périodes, un chauffage d'appoint au propane doit être utilisé dans la serre afin d'éviter le gel.

La chaleur fatale du centre de données est récupérée à l'aide d'un ventilo-convecteur fonctionnant à l'eau glycolée. Une pompe à chaleur eau-eau est utilisée pour rehausser le niveau de température de l'eau chaude obtenue afin d'atteindre un niveau acceptable pour assurer le chauffage de la serre (60°C). Cette eau chaude est stockée dans un réservoir de stockage dans la serre et des pompes permettent de la faire circuler à travers deux réseaux de tuyaux à ailettes distincts afin d'assurer un chauffage uniforme de la serre. La Figure 4.11 représente le système de récupération de chaleur proposé.

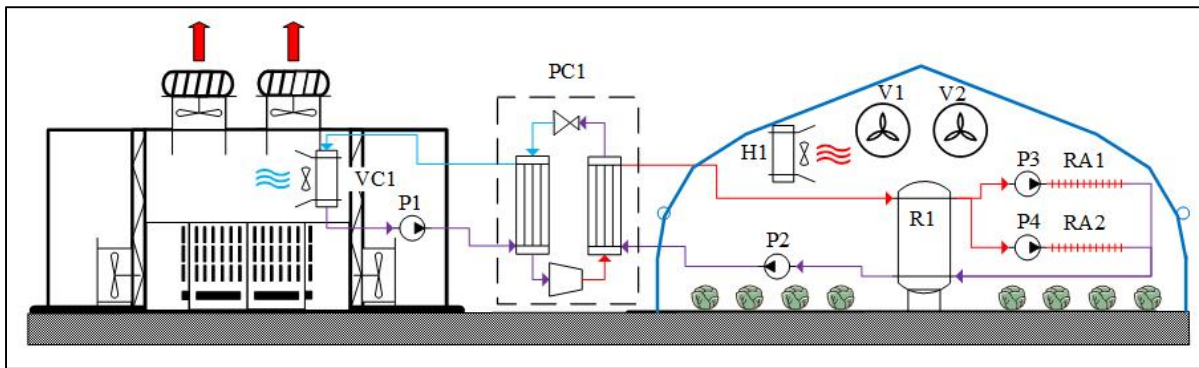


Figure 4.11 Serre de Baie-Comeau équipée du système de récupération de chaleur

Le ventilo-convecteur VC1 est installé à l'entrée d'une cheminée d'une salle de serveur, où la température de l'air est constante et égale à 32°C . Un débit de $1,93 \text{ L.s}^{-1}$ d'eau glycolé entre dans le ventilo-convecteur à une température de 15°C . Ce débit est assuré par une pompe (P1) qui demande $0,4 \text{ kW}$ de puissance électrique (Atlantis TP32-80/2). Dans ces conditions, la température de sortie de l'eau glycolée est de 24°C et le ventilo-convecteur absorbe 69 kW de chaleur de l'air. La puissance électrique appelée par le ventilateur est de $3,73 \text{ kW}$ (Carrier 39LA). Comme le refroidissement de l'air par le ventilo-convecteur est de loin inférieur à la chaleur dissipée par les serveurs, il est assumé que cet équipement de récupération de chaleur n'influence pas la température de l'air à l'entrée et l'utilisation des ventilateurs d'extraction.

L'eau glycolée chauffée par le passage dans le ventilo-convecteur est refroidie par l'évaporateur d'une pompe à chaleur eau-eau (PC1) ayant une capacité de chauffage de 96 kW et un coefficient de performance (COP) de 3,5, évalués pour un débit de $4,1 \text{ L.s}^{-1}$ entrant dans le condenseur à une température de $54,4^\circ\text{C}$ (Carrier 30MPW020). La température à la sortie du condenseur est de 60°C . La pompe sélectionnée pour l'eau du condenseur (P2) demande une puissance électrique de 3,7 kW (Atlantis CR 15-2). L'eau chaude glycolée circule alors dans un échangeur de chaleur immergé dans un réservoir de stockage d'eau chaude (R1).

Lorsque nécessaire les pompes P3 et P4 (Atlantis CR 5-3), demandant chacune 0,6 kW de puissance électrique sont activées pour faire circuler 2 L.s^{-1} d'eau chaude dans les réseaux de tuyaux à ailettes RA1 et RA2. Chaque réseau de tuyaux à ailettes est composé de six boucles de 20 m de long et dissipent une chaleur de 380 W.m^{-1} , cette chaleur dissipée est évaluée par le fabricant pour une température d'eau chaude à 60°C . Un aérotherme au propane d'appoint identique à celui étudié dans le système de référence assure le chauffage de la serre en cas de panne de courant ou de délestage du centre de données. Le Tableau 4.5 résume les conditions de design des principaux équipements utilisés.

Tableau 4.5 Conditions de design du système de récupération de chaleur

Équipement	Température entrée de l'eau glycolée [$^\circ\text{C}$]	Température sortie de l'eau glycolée [$^\circ\text{C}$]	Débit [L.s^{-1}]
VC1	15	24	1,96
PC1 (Évaporateur)	24	15	1,96
PC1 (Condenseur)	54	60	4,10

Le volume du réservoir de stockage R1 est déterminé en considérant que l'énergie stockée doit suffire pour assurer la demande de chauffage maximale de 96 kW durant une demi-heure pour une baisse de température maximale de l'eau chaude dans le réservoir de stockage de 10°C , tel que défini par l'équation (4.1).

$$V_{TES} = \frac{E_{st}}{\rho_{gly} \cdot Cp_{gly} \cdot \Delta T} \quad (4.1)$$

Où E_{st} est l'énergie stockée requise en J, ρ est la densité de l'eau glycolée en kg.m^{-3} , Cp_{gly} est la capacité thermique massique de l'eau glycolée en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et ΔT est la baisse de température maximale admissible. En considérant ρ_{gly} de 1000 kg.m^{-3} et Cp_{gly} de $3747 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour une solution d'eau et de propylène glycol à 40%, le volume de stockage thermique nécessaire V_{TES} est de 5 m^3 .

Points de consignes en chauffage et ventilation

Le contrôle des systèmes de chauffage et des ventilateurs à pression positive est effectué par des contrôleurs en fonction de la température de l'air dans la serre. Les points de consignes considérés pour le chauffage et la ventilation de la serre sont présentés dans le Tableau 4.6.

Tableau 4.6 Points de consigne dans la serre de Baie-Comeau

Heure	Point de consigne (chauffage)
6:00 à 20:00	20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)
20:00 à 6:00	18°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)
Stade de refroidissement	Point de consigne (ventilation)
V1 et volet motorisé	24°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)
V2	26°C ($\pm 1^\circ\text{C}$)

Un point de consigne plus faible est maintenu dans la serre durant la période obscure qu'en période de photosynthèse tel que recommandé par l'ASAE (2002). Les points de consignes pour cette étude de cas ont été sélectionnés par l'opérateur. Ceux-ci ne se situent pas dans la plage de température optimale de la laitue tel que présenté dans la sous-section 1.2.1, mais d'autres sources indiquent que la laitue se comporte bien à des températures de 24°C (Brechtner et al., 1996). Le modèle de la canopée considéré pour cette étude de cas est le même que celui présentés à la section 3.2.4, soit des laitues ayant un LAI moyen de $3 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$.

Intégration dans TRNSYS des systèmes de chauffage

L'intégration de systèmes mécaniques dans TRNSYS se fait par la connexion de composantes discrétisées (Types) représentant les différents équipements requis au modèle de la serre développé. Le Tableau 4.7 fait un résumé des Types utilisés dans TRNSYS pour modéliser les différents équipements des systèmes mécaniques dans la serre.

Tableau 4.7 Types TRNSYS additionnels utilisés dans ce modèle

Composante du modèle	Type TRNSYS
Pompes (P1, P2, P3, P4)	Type 110
Réservoir de stockage thermique (R1)	Type 534
Aérotherme au propane (H1)	Type 663
Pompe à chaleur eau-eau (PC1)	Type 927
Réseaux de tuyaux à ailettes (RA1, RA2)	Type 31
Ventilo-convecteur (FC1)	Type 600

Les paramètres utilisés pour détailler les types utilisés ont été fixés afin de décrire les différents équipements présentés précédemment en fonction de l'information disponible dans la documentation des spécifications techniques de chacun des équipements utilisés.

Il faut cependant noter que le chauffage de la serre peut ne pas se traduire en une augmentation du rendement de la production si l'intégrale de l'éclairage journalier (DLI) est insuffisant étant donné que les plantes ne peuvent faire de photosynthèse sans éclairage. À une telle latitude, l'ensoleillement en hiver peut être limité et la nécessité d'un système d'éclairage artificiel doit être évaluée.

4.2.3 Modélisation de l'éclairage artificiel

La nécessité de recourir à un système d'éclairage artificiel dans la serre a été étudiée à l'aide d'une analyse de l'éclairage naturel journalier dans la serre. Celle-ci est réalisée en suivant la

procédure proposée au en utilisant les paramètres de simulation pour une analyse fine présentés dans le Tableau 3.8. La limite minimale pour le DLI visée est de $10 \text{ mol.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$ pour justifier l'emploi d'un système de chauffage. Cette valeur correspond au bas de la plage de DLI optimal pour la culture de laitues.

Si l'éclairage naturel n'est pas suffisant, l'impact de l'ajout d'un éclairage artificiel par lampes à décharge de sodium haute pression (HPS) sur la consommation énergétique est évalué. La puissance électrique consommée par l'éclairage considéré est de 202 W.m^{-2} , ce qui permet de fournir $262 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ supplémentaires aux plantes, soit une intensité de rayonnement photo actif de 48 W.m^{-2} tel que recommandé pour la croissance de laitues (ASHRAE, 2015). L'éclairage artificiel est activé si le PPFD dans la serre descend sous $100 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ entre 8 :00 et 23 :00 et reste allumé tant que celui-ci reste inférieur à cette limite et que l'intégrale de l'éclairage journalier ne dépasse pas $10 \text{ mol.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$.

L'impact de l'ombrage créé par la présence des lampes HPS au-dessus de la canopée sur l'éclairage naturel est négligé dans cette étude. Les quatre points de lectures de la luminosité dans l'analyse de la lumière naturelle sont positionnés tel que présenté à la Figure 4.3.

4.2.4 Résultats de l'étude comparative, sans éclairage artificiel

Tout d'abord, la Figure 4.12 présente deux séries représentant la consommation énergétique mensuelle de la serre équipée du système de chauffage conventionnel sans récupération de chaleur et de la serre équipée du système de récupération de la chaleur fatale du centre de donnée. La série de gauche présente la consommation énergétique mensuelle de la serre équipée du système de chauffage conventionnel et la série de droite celle de la serre équipée du système de récupération de la chaleur fatale du centre de données. La consommation énergétique de la serre dans les deux cas est aussi séparée en fonction de la source d'énergie utilisée.

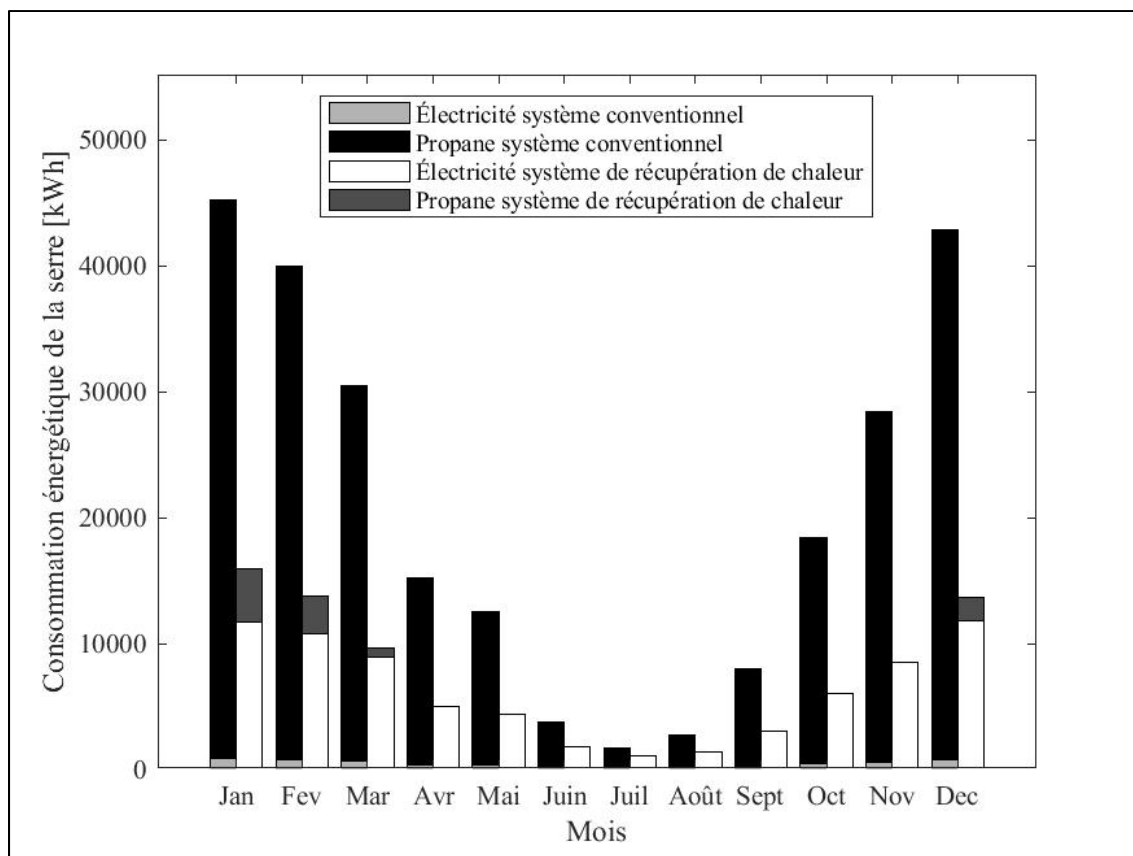


Figure 4.12 Consommation énergétique mensuelle des systèmes étudiés

Il est possible de constater que le système de récupération de chaleur permet d'économiser de l'énergie pour le chauffage de la serre. La source d'énergie utilisée par ce système est principalement l'énergie électrique; du propane est utilisé pour le chauffage durant les mois d'hiver afin de combler la demande lors des périodes de délestage.

En connaissant la consommation énergétique de la serre, il est aussi possible de quantifier les émissions de GES associées à son opération. Celles-ci sont étudiées dans le contexte de l'analyse du cycle de vie. Sans être à proprement parler un indicateur de performance, il s'agit d'un indicateur pertinent dans l'optique d'évaluer l'impact environnemental des systèmes de chauffage proposés. Seules les émissions associées à l'opération des systèmes de chauffage de la serre sont considérées. La Figure 4.13 présente les émissions de GES en kg de CO₂ équivalent de la serre équipée du système de chauffage conventionnel sans récupération de

chaleur et équipée du système de récupération de la chaleur du centre de donnée. Les facteurs d'émissions utilisés sont de 0,0345 kg eq. CO₂/kWh pour l'électricité du réseau dans le contexte québécois (Levasseur et al., 2021) et 0,181 kg eq. CO₂/kWh pour le propane utilisé dans des unités de chauffage fixes (Eggleston et al., 2006).

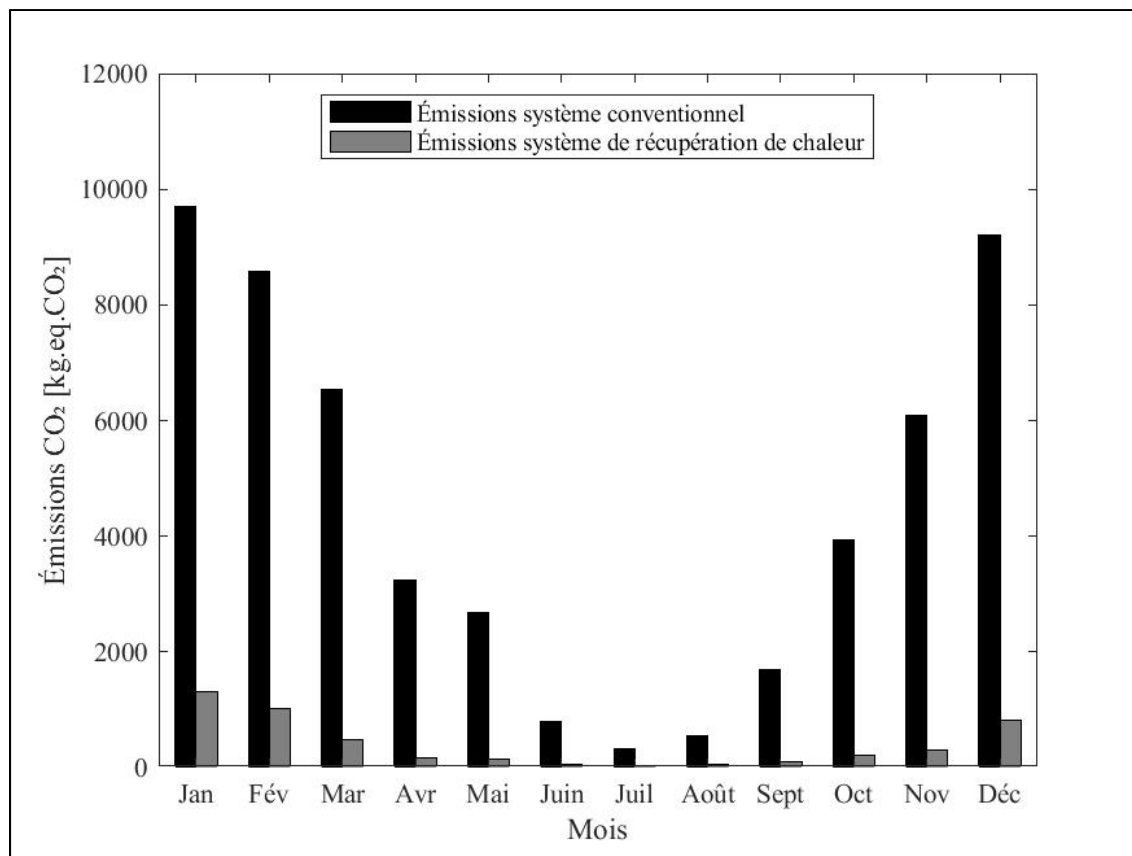


Figure 4.13 Émissions de GES des systèmes étudiés

Tel qu'attendu en raison du facteur d'émission avantageux pour l'électricité du réseau québécois par rapport à la combustion du propane, le système de chauffage conventionnel au propane génère beaucoup plus d'émissions de GES que le système de récupération de chaleur.

4.2.5 Impact de l'éclairage artificiel sur la consommation énergétique

À Baie-Comeau, la durée d'ensoleillement est courte durant l'hiver en raison de la latitude. Si l'éclairage naturel journalier est limité, le chauffage de la serre ne permet pas d'augmenter le

rendement de la production. L'éclairage naturel journalier dans la serre à Baie-Comeau a donc été étudié et la Figure 4.14 présente la distribution mensuelle de l'éclairage naturel journalier (DLI) dans la serre pour chaque mois sous la forme d'une série de boîtes à moustaches. La ligne pointillée indique l'éclairage journalier minimal pour la laitue.

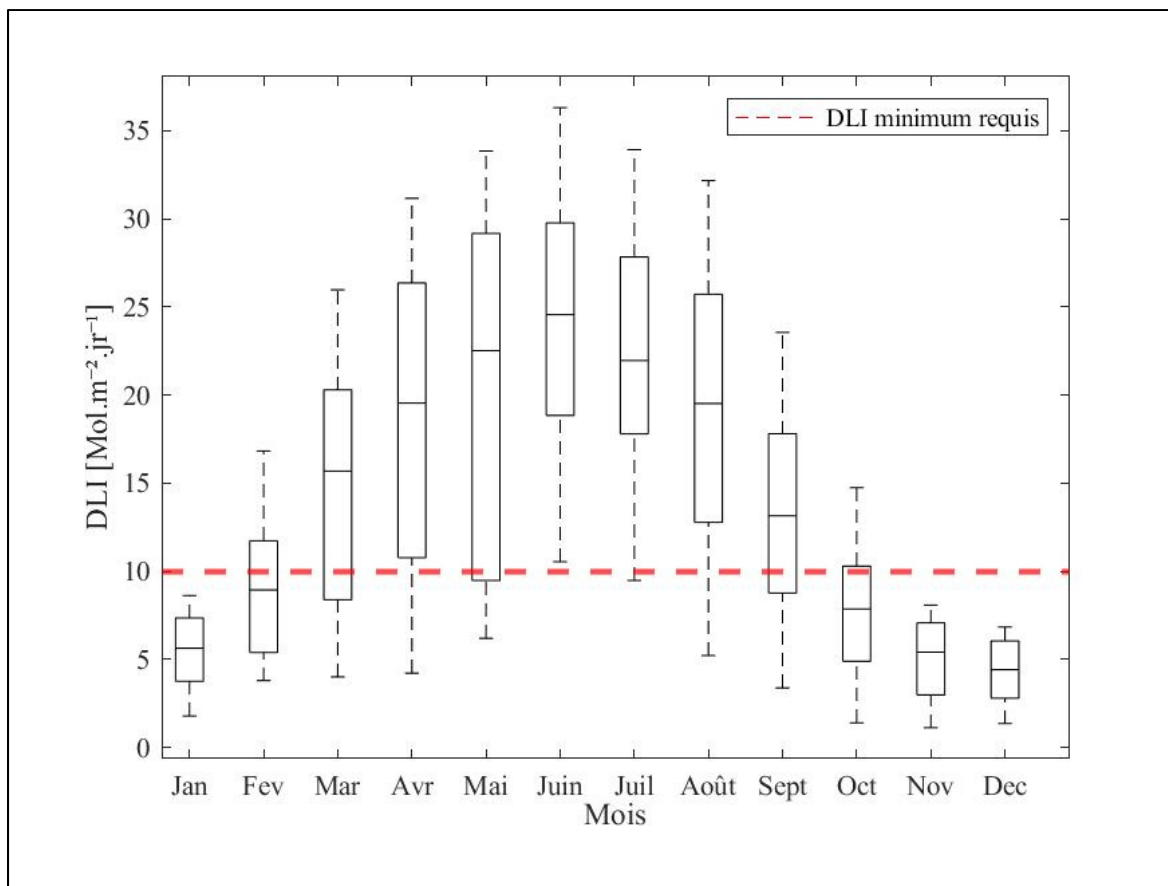


Figure 4.14 Distribution mensuelle de l'éclairage naturel journalier dans la serre de Baie-Comeau

Tel qu'attendu, pour la période d'octobre à février, l'éclairage naturel est souvent insuffisant pour assurer une croissance optimale et la consommation d'énergie pour le chauffage durant ces mois n'est peut-être pas justifiée. La Figure 4.15 présente l'évolution du facteur d'autonomie solaire.

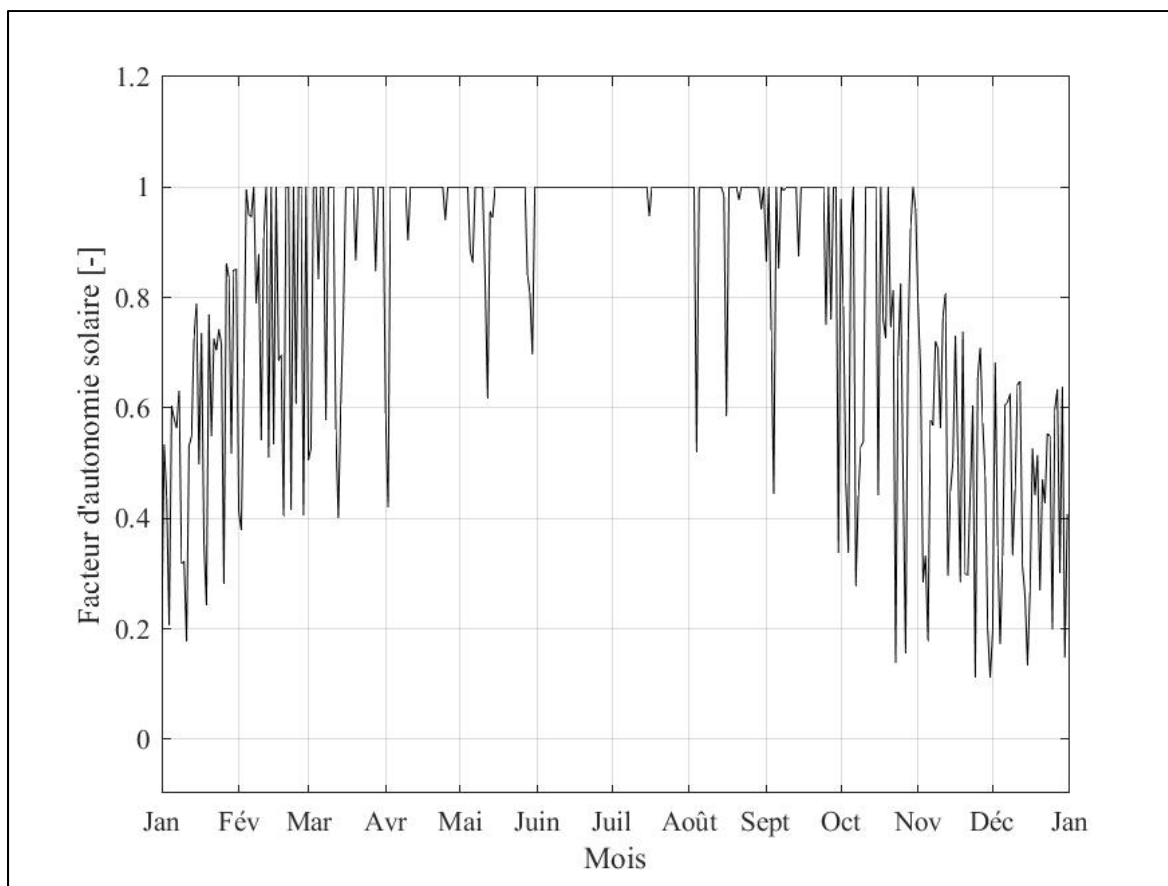


Figure 4.15 Facteur d'autonomie solaire dans la serre de Baie-Comeau

Grâce à cet indicateur de performance, il est possible d'observer l'évolution temporelle de la variation de la disponibilité de l'éclairage naturel à l'intérieur de la serre. À partir de la mi-mars jusqu'à la fin du mois de septembre, l'éclairage minimal journalier dans la serre est atteint de façon relativement constante à l'exception de quelques journées nuageuses.

L'impact sur la consommation énergétique de l'ajout d'un éclairage artificiel composé de lampes à haute pression de sodium a été étudié pour la serre équipée du système de récupération de chaleur. La Figure 4.16 présente la consommation énergétique mensuelle de la serre équipée du système de récupération de la chaleur du centre de données pour chaque équipement installé dans la serre. Les équipements considérés incluent l'éclairage artificiel par lampes HPS requis pour maintenir un éclairage journalier minimal de 10 mol.m^{-2} .

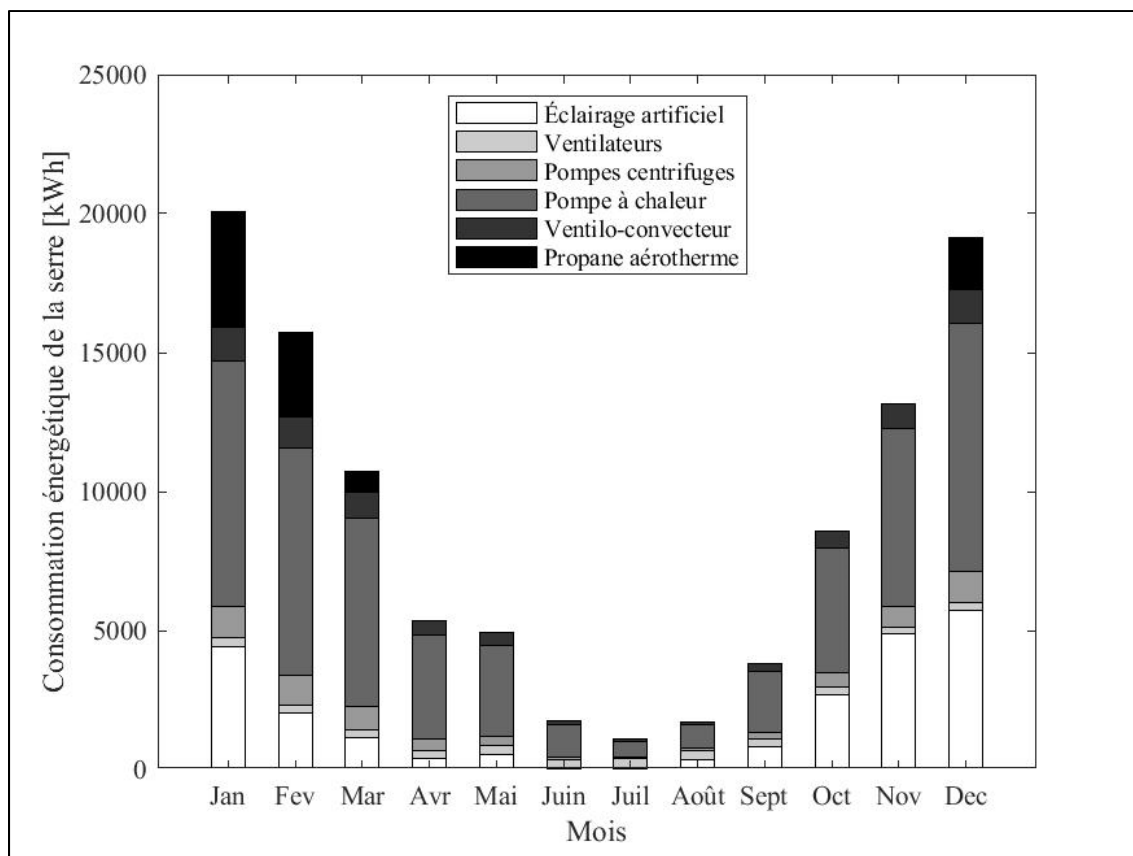


Figure 4.16 Consommation énergétique mensuelle du système de récupération de chaleur incluant l'éclairage par HPS

La Figure 4.16 illustre que la consommation électrique du système de récupération de chaleur est principalement causée par la pompe à chaleur, mais aussi par le ventilo-convecteur de la salle de serveurs et les pompes centrifuges. La consommation des ventilateurs de circulation d'air, à pression positive et de l'aérotherme sont combinées dans la Figure 4.16 pour en améliorer la lisibilité.

La consommation électrique associée à l'éclairage artificiel dans la serre représente dans ces conditions 22 976 kWh annuellement, soit 21,7% de l'énergie consommée annuellement par la serre équipée du système de récupération de chaleur. L'appel de puissance électrique maximal enregistré dans la serre passe alors de 36,8 kW à 67,7 kW. La chaleur dissipée dans la serre lors de l'utilisation de l'éclairage par lumières HPS permet de contribuer au chauffage de celle-ci. La contribution de l'éclairage artificiel au chauffage de la serre représente 1,46%

d'économies en électricité et 0,40% d'économies en propane pour la serre équipée du système de récupération de chaleur et 1,60% d'économies en propane pour la serre équipée du système de chauffage conventionnel. La faible contribution de l'éclairage artificiel au chauffage de la serre s'explique par la période d'obscurité requise et le fait que la plus grande partie de la demande de la serre en chauffage se produit durant cette période. Étant donné que la consommation en électricité pour l'éclairage artificiel est la même peu importe le système de chauffage étudié et que la contribution de l'éclairage artificiel au chauffage de la serre n'est pas significative, l'étude détaillée de l'impact de l'éclairage artificiel sur la consommation énergétique de la serre équipée du système de chauffage conventionnel n'est pas présentée.

4.2.6 Discussion

Le coefficient de performance de la pompe à chaleur de 3,5 permet de réduire la consommation d'énergie (toute source confondue) annuelle de la serre de 66% par rapport à la serre équipée d'un système de chauffage au propane conventionnel. D'un autre côté, le système de récupération de chaleur utilise principalement de l'énergie électrique plutôt que de la chaleur provenant de la combustion du propane dans l'aérotherme d'appoint, ce qui cause un appel de puissance électrique maximal plus élevé soit de 36,8 kW pour la serre équipée du système de récupération de chaleur, contre 2 kW pour la serre équipée du système de chauffage conventionnel. Une analyse économique approfondie serait nécessaire afin de justifier l'achat de composantes supplémentaires pour le système de récupération de chaleur proposé.

Durant les mois de décembre à mars, moment où les températures extérieures sont plus fraîches, la serre équipée du système de récupération de chaleur consomme tout de même de l'énergie provenant de la combustion du propane dans l'aérotherme d'appoint. Ceci s'explique par les périodes de délestages imposées, qui entraînent un total de 175 heures de délestage durant l'année. Lors de l'opération du centre de données, il y a peu de chance que toutes les salles de serveurs soient délestées au même moment, ce qui signifie que la consommation de l'aérotherme d'appoint est surestimée dans cette étude.

Les émissions de GES associées à l'opération du système de récupération de chaleur sont réduites de 91% par rapport à l'utilisation d'un aérotherme au propane, ce qui peut s'expliquer aisément en raison des économies d'énergies permises par le système de récupération de la chaleur fatale du centre de données, mais aussi par la différence entre les facteurs d'émissions d'Hydro-Québec et de la combustion de gaz propane pour la génération de chaleur.

La latitude de Baie-Comeau fait en sorte que l'ensoleillement est réduit en hiver et celui-ci est alors insuffisant pour assurer la croissance optimale de la laitue. Dans ces conditions, l'intérêt de la consommation énergétique associée au chauffage de la serre doit être réévalué, car le rendement de la production est limité par la disponibilité du rayonnement photo actif. Il est commun dans les serres de réduire le chauffage durant les périodes où l'éclairage naturel ne favorise pas la croissance. Les plantes en dormance pouvant supporter des températures plus froides, dans ce cas-ci jusqu'à 4°C, soit la température minimale biologique de la laitue. Cette stratégie permet d'économiser sur le coût du chauffage lorsque celui-ci n'avantage pas la productivité de la culture. Une étude économique approfondie devrait être menée afin d'évaluer le point de consigne en chauffage requis en fonction de l'ensoleillement dans la serre pour minimiser la consommation énergétique inutile tel que proposée par Aaslyng et al. (2003).

Une autre stratégie est de supplémenter l'éclairage naturel par de l'éclairage artificiel afin d'assurer une productivité optimale durant toute l'année. Dans le cas présent, ceci se traduirait par une consommation d'électricité et d'un appel de puissance électrique supplémentaires de 23 000 kWh et 30,9 kW, respectivement. Une analyse économique en incluant un modèle dynamique de croissance de la laitue serait nécessaire pour justifier cette consommation d'énergie additionnelle. La contribution de l'éclairage artificiel au chauffage de la serre est faible, car celui-ci n'est pas allumé durant la nuit, soit le moment où la demande en chauffage de la serre est la plus élevée. L'emploi d'un éclairage artificiel plus efficace, comme un éclairage LED permettrait donc de réduire grandement la consommation électrique associée à l'éclairage artificiel de la serre sans augmenter la consommation en chauffage.

CONCLUSION

Le premier objectif de ce mémoire était d'abord de développer un modèle énergétique de serre développé dans un outil de STD en contexte québécois. Le second objectif de ce mémoire était de calibrer ce modèle pour la simulation énergétique de serres en comparant les résultats de simulations avec des données mesurées. Le dernier objectif de ce mémoire était finalement d'utiliser cette approche de modélisation pour deux études de cas en contexte québécois et d'analyser les résultats des simulations à l'aide d'indicateurs de performance appropriés au contexte de chaque étude de cas.

L'approche de modélisation pour une serre froide existante a d'abord été développée dans TRNSYS. Le modèle proposé a ensuite été calibré pour la température de bulbe sec, la température de point de rosée et le rayonnement photo actif dans la serre. Le modèle est considéré adéquat pour l'étude de serres en contexte québécois après avoir comparé le RMSE et le R^2 sur la température de bulbe sec, l'humidité relative et la rayonnement photo actif dans la serre à des valeurs de référence provenant de la littérature. Finalement, le modèle calibré a été utilisé pour réaliser deux études de cas dans des contextes différents. Des indicateurs de performances relevés dans la littérature pour les deux contextes particulier d'AEC étudiés ont été utilisés afin d'analyser les résultats de celles-ci.

L'approche de modélisation proposée dans TRNSYS a permis de prédire la température, l'humidité relative et le rayonnement photo actif à l'intérieur de la serre expérimentale de Victoriaville avec des erreurs quadratiques moyennes de $1,83^{\circ}\text{C}$ ($R^2 = 0,95$), $7,78\%$ ($R^2 = 0,76$) et $60,63 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ ($R^2 = 0,89$), respectivement. Ces valeurs se comparent bien aux résultats d'autres études réalisées par simulation thermique dynamique de serres non chauffées. La différence entre les résultats du modèle et les données expérimentales peut s'expliquer par des données météorologiques mesurées incomplètes, par une dérive potentielle de l'instrument de mesure de l'humidité relative de la serre ou par l'effet de certaines hypothèses simplificatrices. La croissance de la canopée dans la serre dans le temps, la condensation sur les parois de l'enveloppe, les échanges d'humidité entre le sol et l'air de la serre ainsi que l'effet de l'eau

contenue dans le sol sur ses propriétés thermiques ont notamment été négligés. L'ajout de modèles dans TRNSYS pour modéliser ces phénomènes est envisagé dans de travaux futurs.

La première étude de cas a permis de comparer deux types de serres froides à l'aide d'indicateurs de performance adaptés pour la production de laitues. Les serres froides considérées sont une serre à arche gothique et une serre chinoise partiellement enterrée localisées à Lemieux. Les indicateurs de performance utilisés dans cette étude de cas sont la durée de la saison de croissance thermique, l'indice de confort thermique, l'indice de gel, l'indice de surchauffe, la température moyenne journalière, la variation de température maximale journalière, l'intégrale de l'éclairage journalier, les degrés-jours de croissance ainsi que l'indice photo-thermique. La saison de croissance thermique se termine 22 jours plus tard dans la serre chinoise (29 novembre) et 282 degrés-jours de croissance supplémentaires y sont enregistrés pour la culture de laitue. L'éclairage naturel dans la serre à arche gothique et dans la serre chinoise sont similaires durant la saison de culture. Cependant la ventilation inadéquate des serres entraîne 65 et 167 h de surchauffe dans la serre à arche gothique et dans la serre chinoise, respectivement. Cela se traduit par un indice de confort thermique pour la laitue inférieur dans la serre chinoise par rapport à la serre à arche gothique, malgré les profils de température et l'extension de la saison de croissance thermique dans celle-ci. L'éclairage naturel étant très limité en novembre, les températures nocturnes plus chaudes enregistrées durant cette période dans la serre chinoise ne contribuent pas autant à la croissance de la laitue.

Pour la seconde étude de cas, la consommation énergétique d'une serre active chaude est étudiée selon le système de chauffage utilisé. Un système de chauffage conventionnel utilisant un aérotherme au propane est comparé à un système de récupération de la chaleur fatale d'un centre de données. Les indicateurs de performance utilisés dans ce contexte sont la consommation énergétique, l'appel de puissance électrique et les émissions de GES associées à l'opération des systèmes. L'utilisation de ces indicateurs, traditionnellement utilisées en simulation énergétique de bâtiment, permettent d'évaluer la performance énergétique de la serre en fonction de sa consommation énergétique en considérant l'impact de la source d'énergie sur les émissions de GES de la serre. Cette étude de cas a démontré que l'utilisation

d'un système de récupération de la chaleur perdue par une salle de serveur d'un centre de données permet d'économiser 66% d'énergie annuellement et 91% des émissions de GES associés à l'opération de la serre. L'appel de puissance électrique de la serre est cependant considérablement augmenté par rapport à un système de chauffage conventionnel. Le modèle de la serre à Baie-Comeau a été utilisé pour démontrer le besoin d'éclairage artificiel dans la serre afin de justifier la consommation d'énergie en chauffage durant les mois d'hiver et ainsi assurer une production optimale à l'année. L'ajout d'un éclairage artificiel par lumière HPS pour maintenir l'intégrale de l'éclairage journalier minimal à 10 mol.m^{-2} a fait passer l'appel de puissance maximal de 36,8 kW à 67,7 kW et la consommation de l'éclairage artificiel représente alors 21,7% de la consommation annuelle d'énergie dans la serre équipée du système de récupération de chaleur du centre de données.

En conclusion, l'approche de modélisation proposée permet d'étudier la performance énergétique de serre en se basant sur des indicateurs de performance variés adaptés au contexte. Il importe cependant de disposer de données météorologiques locales complètes afin d'assurer la validité des résultats du modèle. Cette approche pourrait être utilisée afin d'étudier l'impact de l'orientation d'une serre à arche gothique sur le rayonnement photo actif disponible à la canopée et sur la température de l'air dans la serre, par exemple. Elle pourrait aussi être utilisée pour optimiser la configuration de la ventilation ou pour étudier la consommation énergétique de systèmes de chauffage ou de conditionnement de l'air novateurs.

Cette approche pose certaines hypothèses qu'il convient de mettre en évidence. Le bilan massique de l'humidité est incomplet et il serait nécessaire d'intégrer des modèles pour la condensation sur les parois de l'enveloppe et les échanges d'humidité entre l'air et le sol. L'échange de chaleur par rayonnement à ondes longues entre les surfaces et la canopée est négligé dans le modèle de la canopée. La croissance de la canopée n'est pas modélisée et celle-ci est considérée uniforme et constante dans le temps. Un modèle pour la croissance de la canopée et la production de matière organique serait nécessaire étant donné que le ratio de la masse de produit par la consommation énergétique est l'un des indicateurs de performance les plus importants pour l'agriculture en environnement contrôlé.

RECOMMANDATIONS

Les ajouts suivants pourraient être apportés à l'approche de modélisation pour mieux représenter la réalité :

1. Intégrer un modèle pour la condensation sur les parois de l'enveloppe;
2. Ajouter un modèle pour la rétention et l'évaporation de l'eau d'irrigation par le sol de la serre;
3. Ajouter la croissance de la canopée dans le temps au modèle de laitue pour considérer l'impact de celle-ci sur les gains sensibles et latents;
4. Considérer les échanges par rayonnement à ondes longues entre la canopée et les surfaces intérieures de la serre dans la modélisation de la canopée;
5. Définir le bilan massique du CO₂ dans la serre en fonction de l'absorption de celui-ci par la canopée et de la ventilation par exemple puis l'intégrer dans TRNSYS.

Avec les données expérimentales appropriées, la validation de cette approche de modélisation pourrait être approfondie pour vérifier que les phénomènes suivants sont adéquatement modélisés :

1. Comparer les débits de ventilation modélisés et réels, ceci permettrait de valider indépendamment le modèle de la ventilation dans la serre;
2. Comparer la température du sol simulée et mesurée à différentes profondeurs dans la serre, ceci permettrait de valider que la discrétisation du sol par élément à volume fini par le Type 1244 est appropriée pour l'étude d'une serre. Le Type 1244 devra être modifié pour pouvoir enregistrer la température du sol à une profondeur donnée;
3. Comparer l'évapotranspiration et la température de la canopée simulés à l'aide du modèle avec des valeurs mesurées expérimentalement dans une serre pour valider que le modèle de laitue proposé est valide dans le contexte d'une serre québécoise;
4. Comparer les débits d'irrigation avec l'évapotranspiration modélisée, ce qui permettrait de connaître la quantité d'eau qui est évaporée par le sol et de développer un modèle pour les échanges d'humidité entre celui-ci et l'air.
5. Valider la sélection des indicateurs statistiques utilisés dans la littérature.

ANNEXE I

EXEMPLE DE RÉOLUTION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE D'UN MODÈLE DE SERRE

Cette annexe présente la résolution des équations de bilans thermiques et massiques entre les nœuds de calcul dans le modèle de Vanthoor et al. (2011).

Bilans des nœuds

Le bilan thermique pour le nœud a_i dans une serre peut être défini par l'équation A I-1 ci-dessous.

$$Cap_{a_i} \cdot \frac{\partial T_{a_i}}{\partial t} = Q_{adv_{a_e-a_i}} + Q_{conv_{env-a_i}} + Q_{conv_{g-a_i}} + Q_{g_i} + Q_{conv_{pl-a_i}} + Q_{latent_{pl-a_i}} \quad (\text{A I-1})$$

Où Cap_{a_i} est la capacitance de l'air dans la serre en $J.K^{-1}$, $\frac{\partial T_{a_i}}{\partial t}$ est la différence de température de l'air dans la serre entre deux pas de temps de la simulation en K, $Q_{adv_{a_e-a_i}}$ est l'échange de chaleur par advection causé par l'introduction d'air extérieur dans la serre durant le pas de temps de simulation en J, $Q_{conv_{env_i-a_i}}$ est l'échange convectif entre la surface intérieure de la serre et l'air dans la serre en J, $Q_{conv_{g-a_i}}$ est l'échange convectif entre la surface du sol et l'air dans la serre en J, Q_{g_i} représente tout autres gains internes causés par les équipements installés dans la serre en J, $Q_{conv_{pl-a_i}}$ est l'échange convectif entre la canopée et l'air dans la serre et $Q_{latent_{pl-a_i}}$ est l'échange de chaleur latente causé par l'évapotranspiration en J.

Le bilan thermique pour le nœud représentant la surface extérieure de l'enveloppe de la serre (env_e) peut être défini par l'équation A I-2 ci-dessous.

$$Cap_{env_e} \cdot \frac{\partial T_{env_e}}{\partial t} = Q_{conv_{env_e-a_e}} + Q_{SW_{abs_{env_e}}} + Q_{LWX_{sky-env_e}} + Q_{cond_{env_e-env_i}} \quad (A\ I-2)$$

Où Cap_{env_e} représente la capacitance de la couche extérieure de l'enveloppe de la serre en $J.K^{-1}$, $\frac{\partial T_{env_e}}{\partial t}$ représente le changement de température de la surface extérieure de l'enveloppe de la serre au cours d'un pas de temps de simulation en K, $Q_{conv_{env_e-a_e}}$ représente l'échange convectif entre la surface de la couche extérieure de l'enveloppe de la serre et l'air extérieur en J, $Q_{SW_{abs_{env_e}}}$ représente le rayonnement solaire photo actif absorbé par la couche extérieure de l'enveloppe de la serre en J, $Q_{LWX_{sky-env_e}}$ représente le rayonnement à ondes longues net échangé entre la surface extérieure de l'enveloppe de la serre et la voûte céleste en J, $Q_{cond_{env_e-env_i}}$ représente l'échange de chaleur par conduction à travers l'enveloppe de la serre en J.

Le bilan thermique pour le nœud représentant la surface intérieure de l'enveloppe de la serre (env_i) peut être défini par l'équation A I-3 ci-dessous.

$$\begin{aligned} Cap_{env_i} \cdot \frac{\partial T_{env_i}}{\partial t} &= Q_{cond_{env_e-env_i}} + Q_{conv_{env_i-a_i}} + Q_{SW_{abs_{env_i}}} + Q_{LWX_{pl-env_i}} \\ &+ Q_{latent_{env_i-a_i}} \end{aligned} \quad (A\ I-3)$$

Où Cap_{env_i} représente la capacitance de la couche intérieure de l'enveloppe de la serre en $J.K^{-1}$, $\frac{\partial T_{env_i}}{\partial t}$ représente le changement de température de la surface intérieure de l'enveloppe de la serre au cours d'un pas de temps de simulation en K, $Q_{cond_{env_e-env_i}}$ représente l'échange de chaleur par conduction à travers l'enveloppe de la serre en J, $Q_{conv_{env_i-a_i}}$ représente l'échange convectif entre la surface de la couche intérieure de l'enveloppe de la serre et l'air intérieur en J, $Q_{SW_{abs_{env_i}}}$ représente le rayonnement solaire à ondes courtes absorbé par la couche intérieure de l'enveloppe de la serre en J, $Q_{LWX_{pl-env_i}}$ représente le rayonnement à

ondes longues échangé entre la surface intérieure de l'enveloppe de la serre et la canopée en J, et $Q_{latent_{env_i-a_i}}$ présente l'échange de chaleur latente causé par la condensation de l'humidité de l'air intérieur de la serre sur l'enveloppe.

Le bilan thermique pour le nœud représentant la canopée dans la serre (pl) peut être défini par l'équation A I-4 ci-dessous.

$$Cap_{pl} \cdot \frac{\partial T_{pl}}{\partial t} = Q_{SW_{pl}} + Q_{LWX_{pl-g}} + Q_{LWX_{pl-env_i}} + Q_{conv_{pl}} + Q_{latent_{pl}} \quad (A\ I-4)$$

Où Cap_{pl} représente la capacitance de la canopée en $J.K^{-1}$, $\frac{\partial T_{pl}}{\partial t}$ représente le changement de température de la canopée au cours d'un pas de temps de la simulation en K, $Q_{SW_{pl}}$ représente le rayonnement solaire à ondes courtes absorbé par la canopée en J, $Q_{LWX_{pl-g}}$ représente le rayonnement à ondes longues net échangé entre la canopée et la surface du sol de la serre.

Vanthoor et al. (2011) discrétisent le sol dans la serre en plusieurs couches d'épaisseurs croissante afin de prendre en compte l'importante capacité thermique de cet élément de la serre. Le bilan thermique pour le nœud représentant la surface du sol dans la serre (sol) peut être défini par l'équation A I-5 ci-dessous.

$$Cap_g \cdot \frac{\partial T_g}{\partial t} = Q_{conv_{g-a_i}} + Q_{SW_g} + Q_{LWX_{pl-g}} + Q_{cond_{g-g_n}} \quad (A\ I-5)$$

Où Cap_g représente la capacitance de la couche de surface du sol de la serre en $J.K^{-1}$, $\frac{\partial T_g}{\partial t}$ représente le changement de température de la couche de surface du sol au cours d'un pas de temps de la simulation en K, $Q_{conv_{g-a_i}}$ est l'échange de chaleur convectif entre la surface du sol et l'air dans la serre en J, Q_{SW_g} représente le rayonnement solaire à ondes courtes reçu par le sol sous la canopée en J, $Q_{LWX_{pl-g}}$ représente l'échange par rayonnement à ondes longues

entre le sol et la canopée en J et $Q_{cond_{g-g_n}}$ représente l'échange de chaleur par conduction entre la couche de surface du sol et la couche inférieure (g_n) en J.

Le bilan thermique aux couches inférieures du sol dans la serre est défini par l'équation A I-6.

$$Cap_{g_n} \cdot \frac{\partial T_{g_n}}{\partial t} = Q_{cond_{g-g_n}} + Q_{cond_{g_n-g_{n+1}}} \quad (A\ I-6)$$

Où Cap_{g_n} représente la capacitance de la couche n du sol de la serre en $J.K^{-1}$, $\frac{\partial T_{g_n}}{\partial t}$ représente le changement de température de la couche $n+1$ du sol de la serre au cours d'un pas de temps de la simulation en K, $Q_{cond_{g-g_n}}$ représente l'échange de chaleur par conduction entre la couche n et la couche supérieure en J et $Q_{cond_{g_n-g_{n+1}}}$ représente l'échange de chaleur par conduction entre la couche n et la couche inférieure en J. La dernière couche du sol dans la serre est en contact avec une couche à température constante caractérisée par la température du sol en profondeur pour l'emplacement de la serre considéré.

Le bilan pour l'humidité de l'air intérieur dans la serre peut être défini par l'équation A I-7.

$$Cap_{VP_{a_i}} \cdot \frac{\partial VP_{a_i}}{\partial x} = VP_{adv_{a_e-a_i}} + VP_{pl-a_i} - VP_{env_i-a_i} \quad (A\ I-7)$$

Où $Cap_{VP_{a_i}}$ est la capacitance en vapeur d'eau de l'air de la serre en $kg.kg^{-1}$, $\frac{\partial VP_{a_i}}{\partial x}$ représente l'évolution de la quantité de vapeur dans l'air en $kg.s^{-1}$, $VP_{adv_{a_e-a_i}}$ est l'échange de vapeur entre l'air intérieur et l'air extérieur par la ventilation en $kg.s^{-1}$, VP_{pl-a_i} est l'échange de vapeur entre l'air intérieur et la canopée par le phénomène d'évapotranspiration en $kg.s^{-1}$ et $VP_{env_i-a_i}$ est l'échange de vapeur entre l'air intérieur de la serre et la surface intérieure de l'enveloppe de la serre par condensation.

Conduction transitoire

Les échanges de chaleur par conduction à travers une paroi solide sont modélisés dans le domaine transitoire afin de permettre la résolution du modèle numérique. Vanthoor et al. (2011) représentent les deux épaisseurs de film de l'enveloppe de la serre par deux nœuds ayant un profil de température uniforme à travers son épaisseur avec une capacité thermique donnée. L'échange entre la couverture extérieure et la couverture intérieure est alors restreint par une résistance thermique équivalente représentant le matériel de couverture. L'équation A I-8 présente la définition du flux de chaleur conductif à travers l'espace d'air de l'enveloppe selon l'hypothèse du profil de température uniforme à chaque couche.

$$Q_{cond_{env_e-i}} = \frac{k_a \cdot A_{env}}{e_a} \cdot (T_{env_e} - T_{env_i}) \quad (A\ I-8)$$

Où k_a est la conductivité thermique de l'espace d'air entre les deux films de l'enveloppe en $W.m^{-1}.K^{-1}$, e_a est l'épaisseur de l'espace d'air de l'enveloppe en m, A_{env} est la surface de transfert conductif de l'enveloppe en m^2 , T_{env_e} est la température de la paroi extérieure de l'enveloppe en K et T_{env_i} est la température de la paroi intérieure de l'enveloppe en K. Pour une paroi composée de plusieurs couches en séries, l'épaisseur totale et la conductivité thermique équivalente doivent être considérées.

L'hypothèse de la température constante de l'enveloppe sur toute son épaisseur n'est cependant valide que dans les cas où le flux de chaleur par conduction est dominant sur le flux de chaleur par convection à la surface. Cette condition est vérifiée par un critère sur le nombre de Biot présenté par l'équation A I-9.

$$Bi < 0.1 \mid Bi = \frac{h \cdot e_{env}}{k_{env}} \quad (A\ I-9)$$

Où h est le coefficient de convection à la surface en $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, e_{env} est l'épaisseur de la paroi solide de l'enveloppe en m et k_{env} est la conductivité thermique de la paroi solide de l'enveloppe en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Cette hypothèse est généralement respectée dans les serres étant donnée la faible épaisseur des matériaux utilisés pour l'enveloppe.

ANNEXE II

VALIDATION DU COEFFICIENT DE CONVERSION POUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Cette validation est basée sur le fichier de données standardisées pour la distribution spectrale du rayonnement solaire traversant une masse d'air de 1,5 atmosphère mesurée sur une surface inclinée à 37° produit par l'ASTM (2020) tel que présenté à la Figure A II-2 ci-dessous.

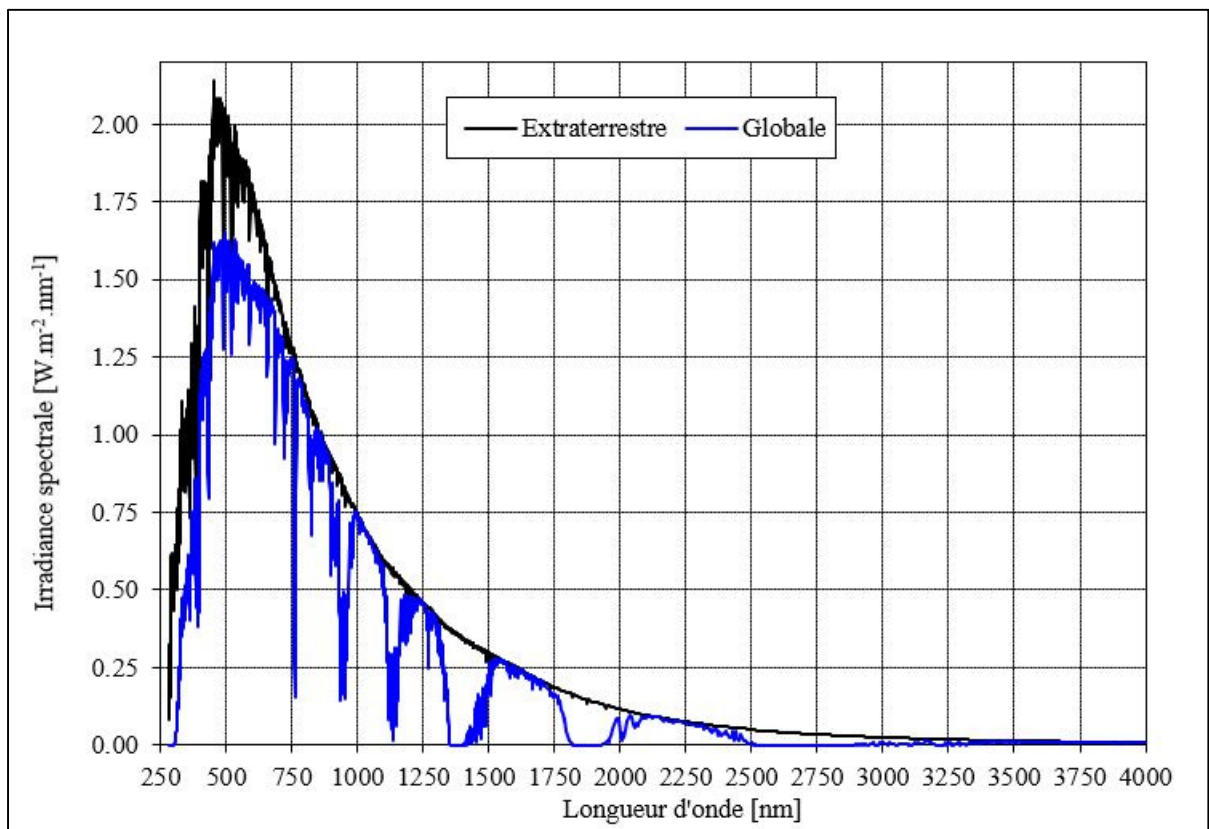


Figure A II-1 Spectre de référence solaire
Adaptée du standard de l'ASTM G173-03

Pour cette distribution spectrale du rayonnement solaire, l'irradiance provenant du spectre photo actif (400 à 700 nm) représente 43% et 42% de l'irradiance globale totale et de l'irradiance directe et circumsolaire totale, respectivement. Sachant que le rayonnement solaire contient 4,56 $\mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ dans le spectre photo actif (Thimijan et Heins, 1983), il est possible de

déduire les valeurs de $1,96 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ dans le spectre complet. Cette valeur est proche de la valeur de $2,02 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ proposée par Reis et Ribeiro (2020), la différence entre ces valeurs peut s'expliquer par l'amplitude du spectre photo actif considéré. Par exemple, en considérant un spectre photo actif de 350 nm à 750 nm le facteur de conversion obtenu est de $2,54 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$. De plus, le rayonnement solaire contient $4,24 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ dans le spectre photo actif si le disque solaire est caché (Thimijan et Heins, 1983), ce qui introduit une autre source de variabilité pour le calcul de ce facteur de conversion.

ANNEXE III

PROPRIÉTÉS DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX DANS LES SERRES

Tableau A III-1 Absorptivité solaire et émissivité de différents matériaux de construction utilisés dans les serres (Castilla, 2013)

Matériau de construction	Absorptivité [-]	Émissivité [-]
Béton	0,6	0,88
Brique rouge	0,55	0,92
Verre	0,03	0,90
Peinture blanche	0,35	0,95
Terreau sec	0,78	0,90
Terreau humide	0,90	0,95
Aluminium	0,32	0,10
Aluminium peint blanc	0,20	0,91
Aluminium peint noir	0,96	0,88
Acier galvanisé	0,80	0,28
Acier galvanisé peint blanc	0,34	0,90

Tableau A III-2 Propriétés thermiques de différents matériaux de construction utilisés dans les serres, données tirées de la librairie de matériaux de construction standardisés de TRNSYS (Klein et al., 2017)

Matériau de construction	Densité [kg.m ⁻³]	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Capacité thermique massique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Bloc de béton	1500	1	1000
Acier galvanisé	7880	15	1800
Recouvrement de PVC	1500	0,23	1000
Polystyrène	30	0,04	1250

ANNEXE IV

DÉTAILS DE CALCULS DE CERTAINS INDICATEURS DE PERFORMANCES

Durée de la saison de croissance thermique

Le calcul de la durée de la saison de croissance thermique, en jours, est réalisé selon la méthodologie proposée par Skaggs et Baker (1985). Il s'agit de la durée calculée à partir du cinquième jour consécutif où la température moyenne est supérieure à la température de gel au printemps jusqu'au dixième jour consécutif où la température moyenne est inférieure à la température de gel à l'automne. La température de gel peut être considéré à 5°C (Skaggs et Baker, 1985). Dans cette étude, la température minimale biologique de la laitue est considérée (4°C pour la laitue). La durée de la saison de croissance thermique est calculée par les équations A IV-1, A IV-2 et A IV-3.

$$TGS = \sum_{j=0}^{365} TGS_j \quad (\text{A IV-1})$$

$$\begin{aligned} TGS_j &= 1 \text{ SI } \overline{T_{a_i}} \\ &> 5^\circ\text{C ET } TGS_j \cdot TGS_{j-1} \cdot TGS_{j-2} \cdot TGS_{j-3} \\ &\cdot TGS_{j-4} = 1 \end{aligned} \quad (\text{A IV-2})$$

$$TGS_j = 0 \text{ SI } \overline{T_{a_i}} < T_{min} \text{ ET } \sum_{j=9}^j TGS_j = 0 \quad (\text{A IV-3})$$

Où TGS_j est une condition booléenne indiquant si le jour j fait partie de la saison de croissance thermique et $\overline{T_{a_i}}$ représente la température journalière moyenne pour le jour i en °C.

Degrés-jours de croissance

Les degrés jours sont calculés en fonction de la température moyenne journalière et de la température de base de la plante cultivée (correspondant à la température minimale biologique). Le calcul des degrés-jours de croissances est réalisé à l'aide de l'équation A IV-4 :

$$GDD = \sum_{j=0}^{365} (\overline{T_{a_i}} - T_{min}) \quad (\text{A IV-4})$$

Où $\overline{T_{a_i}}$ représente la température journalière moyenne pour le jour j en °C et T_{min} représente la température minimale biologique en °C.

Heures de points de consigne non respectés

Le calcul des heures de points de consigne non respectés (*unmet hours* ou UH en anglais) est réalisé à l'aide des équations A IV-5, A IV-6 et A IV-7 ci-dessous [heures] :

$$UH = \sum_{j=0}^{8760} UH_j \quad (\text{A IV-5})$$

$$UH_j = 1 \text{ SI } \left(\bar{x}_j < x_{consigne} - \frac{BM}{2} \text{ OU } \bar{x}_j > x_{consigne} + \frac{BM}{2} \right) \quad (\text{A IV-6})$$

$$UH_j = 0 \text{ SI } \left(\bar{x}_j > x_{consigne} - \frac{BM}{2} \text{ ET } \bar{x}_j < x_{consigne} + \frac{BM}{2} \right) \quad (\text{A IV-7})$$

Où UH_j est une valeur booléenne indiquant si le point de consigne est respecté durant l'heure j , \bar{x}_j représente la valeur moyenne de la variable contrôlée x durant l'heure j , $x_{consigne}$ représente le point de consigne pour la variable contrôlée x durant l'heure j et BM représente la valeur de la bande morte du contrôleur de la variable x .

Les heures de points de consigne non respectés peuvent être calculées pour chaque variables contrôlées dans la serre, il importe de considérer la bande morte dans le point de consigne si un contrôleur hystérétique est utilisé.

Indice de confort thermique

Le calcul de l'indice de confort thermique (ITC) est réalisé à l'aide des équations A IV-8, A IV-9 et A IV-10 [heures] :

$$ITC = \sum_{j=0}^{8760} ITC_j \quad (\text{A IV-8})$$

$$ITC_j = 0 \text{ SI } (\overline{T_{a_l}} < T_{min.optimale} \text{ OU } \overline{T_{a_l}} > T_{max.optimale}) \quad (\text{A IV-9})$$

$$ITC_j = 1 \text{ SI } (\overline{T_{a_l}} > T_{min.optimale} \text{ ET } \overline{T_{a_l}} < T_{max.optimale}) \quad (\text{A IV-10})$$

Où ITC_j est une valeur booléenne indiquant si la température moyenne horaire est située dans la plage de température optimale pour la croissance de la plante à l'heure j , $\overline{T_{a_l}}$ représente la température moyenne horaire de l'air dans la serre à l'heure j en °C, $T_{min.optimale}$ et $T_{max.optimale}$ représentent la température minimale et maximale de la plage de température optimale pour la croissance de la plante considérée, respectivement, en °C.

L'indice de confort thermique est calculé en fonction du nombre d'heures où la température de l'air dans la serre est située dans la plage de température optimale pour la croissance de la plante. Il faut noter que la plage de température optimale varie en fonction de l'activité de la plante (photosynthèse ou respiration).

Écart de température maximal journalier

Le calcul de l'écart de température maximal journalier se fait à l'aide de l'équation A IV-11 à la page suivante [°C] :

$$\Delta T_{a_{i,max}} = \bar{T}_{a_{i,max}} - \bar{T}_{a_{i,min}} \quad (\text{A IV-11})$$

Le calcul se fait en considérant les valeurs maximales et minimales de la température durant une période de 24 heures consécutives.

Où $\Delta T_{a_{i,max}}$ est l'écart de température maximal journalier, $\bar{T}_{a_{i,max}}$ et $\bar{T}_{a_{i,min}}$ sont la température horaire moyenne maximale et la température horaire moyenne minimale en °C, respectivement durant une période de 24h consécutive.

Indice de surchauffe

Le calcul de l'indice de surchauffe (OH) est réalisé à l'aide des équations A IV-12, A IV-13 et A IV-14 [heures] :

$$OH = \sum_{j=0}^{8760} OH_j \quad (\text{A IV-12})$$

$$OH_j = 0 \text{ SI } (\bar{T}_{a_l} < T_{max.biologique}) \quad (\text{A IV-13})$$

$$OH_j = 1 \text{ SI } (\bar{T}_{a_l} > T_{max.biologique}) \quad (\text{A IV-14})$$

Où OH_j est une valeur booléenne indiquant si \bar{T}_{a_l} , soit la température horaire moyenne à l'heure j est inférieure ou supérieure à $T_{max.biologique}$, qui est la température maximale tolérable par la plante cultivée pour permettre son activité biologique, toutes deux mesurées en °C.

L'indice de surchauffe permet de vérifier l'occurrence d'évènement de température extrêmes pouvant causer des dommages aux plantes cultivées. Il se distingue des heures de points de consigne non respectés, car il permet de déterminer la dangerosité pour la culture entraînée par une incapacité du système de refroidissement à maintenir les conditions de croissances optimales dans la serre.

Indice de gel

Le calcul de l'indice de gel (OC) est réalisé à l'aide des équations A IV-15, A IV-16 et A IV-17 ci-dessous [heures] :

$$OC = \sum_{j=0}^{8760} OC_j \quad (\text{A IV-15})$$

$$OC_j = 1 \text{ SI } (\overline{T_{a_t}} < T_{min.dommageable}) \quad (\text{A IV-16})$$

$$OC_j = 0 \text{ SI } (\overline{T_{a_t}} > T_{min.dommageable}) \quad (\text{A IV-17})$$

Où OC_j est une valeur booléenne indiquant si $\overline{T_{a_t}}$, soit la température horaire moyenne à l'heure j est inférieure ou supérieure à $T_{min.dommageable}$, qui est la température minimale tolérable par la plante cultivée, toutes deux mesurées en °C.

L'indice de gel permet de vérifier l'occurrence d'évènement de température extrêmes pouvant causer des dommages aux plantes cultivées. Il se distingue des heures de points de consigne non respectés, car il permet de déterminer la dangerosité pour la culture entraînée par une incapacité du système de chauffage à maintenir les conditions de croissances minimales dans la serre.

Rendement énergétique

Le calcul du rendement énergétique (ER) est réalisé à l'aide de l'équation A IV-18 ci-dessous en kg.MJ^{-1} :

$$ER = \frac{M}{E} \quad (\text{A IV-18})$$

Où M représente la masse de produit obtenue sur une période donnée en kg et E représente l'énergie consommée durant cette période en MJ.

Le rendement énergétique permet de mettre en relation la productivité de l'opération en termes de masse produite et la consommation énergétique de celle-ci.

Intégrale de l'éclairage journalier

Le calcul de l'intégrale de l'éclairage journalier (*DLI*) est réalisé à l'aide de l'équation A IV-19 ci-dessous [$\text{mol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$] :

$$DLI = \sum_{j=0}^{24} \overline{PPFD}_t \cdot 10^{-6} \cdot 3600 \quad (\text{A IV-19})$$

La densité du flux de photon photo actif (*PPFD*) en $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ considéré dans le calcul du *DLI* est la somme de la contribution de l'éclairage naturel et de l'éclairage artificiel. Il y a deux possibilités pour le calcul du *DLI*, soit l'utilisation de la valeur moyenne horaire du *PPFD* et intégrer sur 24h, ou encore utiliser la valeur instantanée du *PPFD* calculée pour le pas de temps de la simulation et intégrer pour le nombre de pas de temps de simulation dans une période de 24 heures.

Indice photo-thermique

Le calcul de l'indice photo-thermique (*PTI*) adapté est réalisé à l'aide des étapes suivantes.

1. Il faut d'abord calculer le taux maximal de photosynthèse à saturation $P_{n.max}(\overline{T}_{a_i})$ en fonction de la température de l'air et des limites biologiques de la plante cultivée à l'aide de l'équation A IV-20 ci-dessous.

$$P_{n.max}(\overline{T}_{a_i}) = \begin{cases} 0 & SI \overline{T}_{a_i} < T_{min} \\ P_{n.max}(T_o) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\overline{T}_{a_i} - T_{min}}{T_o - T_{min}}\right) & SI T_{min} < \overline{T}_{a_i} < T_o \\ P_{n.max}(T_o) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_{max} - \overline{T}_{a_i}}{T_{max} - T_o}\right) & SI T_o < \overline{T}_{a_i} < T_{max} \\ 0 & SI \overline{T}_{a_i} > T_{max} \end{cases} \quad (\text{A IV-20})$$

2. Il faut ensuite calculer le temps thermique normalisé (TT_T) pour la limite de saturation en photosynthèse à la température \bar{T}_l par rapport à la limite de saturation en photosynthèse à la température T_o à l'aide de l'équation A IV-21 ci-dessous [-].

$$TT_T = \frac{P_{n.max}(\bar{T}_{a_l})}{P_{n.max}(T_o)} \quad (\text{A IV-21})$$

3. Finalement, l'indice photo-thermique (PTI) adapté est calculé par l'équation A IV.22 ci-dessous en W.m^{-2} .

$$PTI = TT_T \cdot PPFD_j \quad (\text{A IV-22})$$

L'intégrale sur une certaine période de l'indice photo-thermique (PTI) permet d'estimer la croissance des plantes (Xu et al., 2010). Il faut noter qu'à la différence de Xu et al. (2010), le PPFD incident est considéré plutôt que le PPFD absorbé par la plante, cette simplification n'a pas vraiment d'incidence pour développer un indicateur des conditions de croissance dans une serre et est nécessaire étant donné que la croissance des plantes n'est pas modélisée. Dans le contexte de l'étude de Xu et al. (2010) cette considération était importante, car ils développent un modèle de croissance de plante basé sur cet indicateur, la croissance de la plante augmentant l'efficacité de la captation du rayonnement photo actif par celle-ci.

BIBLIOGRAPHIE

- Aaslyng, J. M., Lund, J. B., Ehler, N., & Rosenqvist, E. (2003). IntelliGrow: a greenhouse component-based climate control system. *Environmental Modelling & Software*, 18(7), 657-666. doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00052-5).
- Al-Helal, I., Alsadon, A., Shady, M., Ibrahim, A., & Abdel-Ghany, A. (2020). Diffusion Characteristics of Solar Beams Radiation Transmitting through Greenhouse Covers in Arid Climates. *Energies*, 13(2). doi: 10.3390/en13020472
- Albright, L., Both, A. J., & J. Chiu, A. (2000). Controlling greenhouse light to a consistent daily integral. *Transactions of the ASAE*, 43(2), 421-431. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.2721>.
- Algarni, S., & Nutter, D. (2015). Survey of Sky Effective Temperature Models Applicable to Building Envelope Radiant Heat Transfer. *Ashrae Transactions*, 121(2).
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56(97), e156.
- Altes-Buch, Q., Quoilin, S., & Lemort, V. (2019). Greenhouses: A Modelica Library for the Simulation of Greenhouse Climate and Energy Systems. Dans *13th International Modelica Conference* (pp. 533-542). doi: <https://doi.org/10.3384/ecp19157533>
- American Society for Testing and Materials International. (2020). Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. Repéré à <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>
- American Society Of Agricultural Engineers. (2002). *Heating ventilating and cooling greenhouses*. St Joseph, MI, USA: ASAE.
- American Society of Heating, R., & Air-Conditioning, E. (2017). *2017 ASHRAE handbook : Fundamentals : SI edition*. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017, ©2017.
- ASHRAE. (2015). *ASHRAE Handbook - HVAC Applications (SI Edition)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE).
- ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE).
- Baglivo, C., Mazzeo, D., Panico, S., Bonuso, S., Matera, N., Congedo, P. M., & Oliveti, G. (2020). Complete greenhouse dynamic simulation tool to assess the crop thermal well-being and energy needs. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115698. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115698>.

- Bakker, J. C. (1991). Effects of humidity on stomatal density and its relation to leaf conductance. *Scientia Horticulturae*, 48(3), 205-212. doi: [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(91\)90128-L](https://doi.org/10.1016/0304-4238(91)90128-L).
- Bakker, J. C., Bot, G. P. A., Challa, H., & Braak, N. J. v. d. (1995). *Greenhouse Climate Control. An integrated approach*. Wageningen: Wageningen Pers. Repéré à <https://edepot.wur.nl/138827>
- Baptista, F., Bailey, B., Meneses, J., & Gracia, L. M. N. (2010). Greenhouses climate modelling: tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. *Spanish journal of agricultural research*, (2), 285-298.
- Bastien, D., & Athienitis, A. K. (2018). Passive thermal energy storage, part 1: Design concepts and metrics. *Renewable Energy*, 115, 1319-1327. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.011
- Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., . . . Duffy, R. (2013). *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for mediterranean climate areas*. FAO.
- Baumbauer, D. A. (2019). *Extending cool season production of vegetables in the high tunnel: balancing heat and light* (Montana State University, Bozeman, Montana, USA).
- Ben Ali, R., Aridhi, E., & Mami, A. (2015). *Dynamic model of an agricultural greenhouse using Matlab-Simulink environment*. doi: 10.1109/STA.2015.7505185
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Bierhuizen, J., Ebbens, J., & Koomen, N. (1973). Effects of temperature and radiation on lettuce growing. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 21(2), 110-116.
- Boulard, T., & Baille, A. (1995). Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. *Journal of agricultural engineering research*, 61, 37-47. doi: 10.1006/jaer.1995.1028
- Bradley, D. E. (2008). Communication publique : TRNSYS-users mailing list.
- Brechner, M., Both, A., & Staff, C. (1996). *Hydroponic lettuce handbook*. Cornell Controlled Environment Agriculture.
- Campen, J., Bot, G., & De Zwart, H. (2003). Dehumidification of greenhouses at northern latitudes. *Biosystems Engineering*, 86(4), 487-493.

- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management*. Wallingford, UK: CABI.
- Castilla, N., & Montero, J. I. (2008). Environmental control and crop production in mediterranean greenhouses. Dans *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions* (797 éd., pp. 25-36). International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium. doi: 10.17660/ActaHortic.2008.797.1.
- Clark, G., & Allen, C. (1978). The estimation of atmospheric radiation for clear and cloudy skies. Dans *Proc. 2nd National Passive Solar Conference (AS/ISES)* (pp. 675-678).
- Clarke, J. A., & Hensen, J. (2015). Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and environment*, 91. doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.002
- Comité Européen de Normalisation. (2019). Greenhouses - Design and construction - Part 1: Commercial production greenhouses. Bruxelles, BG: Comité Européen de Normalisation.
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116583>.
- Cousin, B., & Lekounougou, S. T. (2020). Développement d'une nouvelle technique de récupération de la chaleur émise par des serveurs informatiques dans le but de la convertir et de l'emmagasiner afin de chauffer des serres en milieu nordique Baie-Comeau: Centre d'expérimentation et de développement en forêt boréale.
- 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>
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pedersen, C. O., & Winkelmann, F. C. (2000). Energy plus: energy simulation program. *ASHRAE journal*, 42(4), 49-56.
- Crone, S. (1992). Radiance users manual. *Architectural Dissertation*, 2.
- Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., . . . Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758. doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101758.
- De Halleux, D. (1989). Dynamic models of heat and mass transfer in greenhouses: theoretical and experimental study.

- Dhiman, M., Sethi, V. P., Singh, B., & Sharma, A. (2019). CFD analysis of greenhouse heating using flue gas and hot water heat sink pipe networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104853. doi: 10.1016/j.compag.2019.104853
- Dorer, V., Haas, A., Keilholz, W., Pelletret, R., & Weber, A. (2001). COMIS V3. 1 simulation environment for multizone air flow and pollutant transport modelling. Dans *Seventh International IBPSA Conference*. Citeseer.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind* (5th edition éd.): John Wiley & Sons.
- Eaves, J., & Eaves, S. (2018). Comparing the Profitability of a Greenhouse to a Vertical Farm in Quebec. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie*, 66(1), 43-54. doi: <https://doi.org/10.1111/cjag.12161>
- Eggleston, H., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Esmaeli, H., & Roshandel, R. (2020). Optimal Design for Solar Greenhouses Based on Climate Conditions. *Renewable Energy*, 145. doi: 10.1016/j.renene.2019.06.090
- Feustel, H. E. (1999). COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model. *Energy and Buildings*, 30(1), 3-18. doi: 10.1016/S0378-7788(98)00043-7.
- Fletcher, J. (1973). Glasshouse crops disease control—current developments and future prospects. Dans *7th British Insecticide and Fungicide Conference* (Vol. 3, pp. 857-864). British Crop Protection Council.
- Fox, J. A., Adriaanse, P., & Stacey, N. T. (2019). Greenhouse energy management: The thermal interaction of greenhouses with the ground. *Journal of cleaner production*, 235, 288-296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.344>.
- Garzoli, K. V., & Blackwell, J. (1987). An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 36(2), 75-86. doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(87\)90114-4](https://doi.org/10.1016/0021-8634(87)90114-4).
- Geery, D. (1982). *Solar greenhousees, underground* (1 éd.). McGraw-Hill.
- Ghani, S., El-Bialy, E. M. A. A., Bakochristou, F., Mohamed Rashwan, M., Mohamed Abdelhalim, A., Mohammad Ismail, S., & Ben, P. (2020). Experimental and numerical investigation of the thermal performance of evaporative cooled greenhouses in hot and arid climates. *Science and Technology for the Built Environment*, 26(2), 141-160. doi: 10.1080/23744731.2019.1634421.

- Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, 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
- Graamans, L., van den Dobbelsteen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153, 138-147.
- Ha, T., Lee, I.-b., Kwon, K.-s., & Hong, S.-W. (2015). Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using building energy simulation model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(6), 116-127.
- Hanan, J. J. (1997). *Greenhouses: Advanced technology for protected horticulture*. CRC press.
- Hand, D. W. (1988). Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. Dans (pp. 143-158). International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium.
- 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
- He, J., Lee, S.-K., & Dodd, I. (2001). Limitations to photosynthesis of lettuce grown under tropical conditions: alleviation by root-zone cooling. *Journal of Experimental Botany*, 52, 1323-1330. doi: 10.1093/jxb/52.359.1323
- Hilliard, C., & Reedyk, S. (2020). Soil texture and water quality : Gouvernement du Canada.
- Joliet, O. (1994). HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of agricultural engineering research*, 57(1), 23-37.
- JRG Consulting Group. (2020). Plant the seeds Opportunities to grow southern Ontario's fruit and vegetable sector (pp. 180). Toronto, Canada: Greenbelt Foundation.
- Katsoulas, N., & Stanghellini, C. (2019). Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications. *Agronomy*, 9(7), 392. Repéré à <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/7/392>
- Kesik, T., & Stern, L. (2007). Representation of performance indicators for the conceptual design of passive solar houses. Dans *5th national conference of IBPSA - Canada*.
- Kittas, C. (1986). Greenhouse cover conductances. *Boundary-Layer Meteorology*, 36(3), 213-225.
- 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.

- Klein, S. A., Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2018). TRNSYS18 Mathematical reference (Vol. 4, pp. 705). Madison, WI, USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2015). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.
- Kusuda, T., & Achenbach, P. R. (1965). Earth temperatures and thermal diffusivity at selected stations in the United States. *Ashrae Transactions*, 71(1), 61-74.
- Kwon, J., Khoshimkhujaev, B., Lee, J., Ho, I., Park, K., & Choi, H. G. (2016). Growth and Yield of Tomato and Cucumber Plants in Polycarbonate or Glass Greenhouses. *Horticultural Science and Technology*, 35, 79-87. doi: 10.12972/kjhst.20170009
- Lam, J. C., & Hui, S. C. (1996). Sensitivity analysis of energy performance of office buildings. *Building and environment*, 31(1), 27-39.
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (1998). Leaf Energy Budgets: Effects of Radiation and Temperature. Dans *Plant Physiological Ecology* (pp. 210-229). New York, NY: Springer New York. doi: 10.1007/978-1-4757-2855-2_4.
- Levasseur, A., Mercier-Blais, S., Prairie, Y. T., Tremblay, A., & Turpin, C. (2021). Amélioration de la précision de l’empreinte carbone de l’électricité : estimation des émissions de gaz à effet de serre des réservoirs hydroélectriques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136(1), 37.
- Li, C., Ma, B., & Zhang, T. (2002). Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (*Zea mays* L.) planted in large pots under field exposure. *Canadian journal of soil science*, 82(2), 147-154.
- Lu, Y., Lu, S., Horton, R., & Ren, T. (2014). An empirical model for estimating soil thermal conductivity from texture, water content, and bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 78(6), 1859-1868.
- Maher, T. (2000). *Strategy for the optimal climate control of greenhouse tomatoe* (McGill University, Montreal). (37851).
- MAPAQ. (2018). *Portrait-diagnostique sectoriel des légumes de serre au Québec*. Quebec city, QC, CA: Ministère de l'agriculture des pêches et de l'alimentation du Québec.
- Maraveas, C. (2020). Wind Pressure Coefficients on Greenhouse Structures. *Agriculture*, 10(5), 149. Repéré à <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/5/149>

- Martin, M., & Berdahl, P. (1984). Characteristics of infrared sky radiation in the United States. *Solar Energy*, 33, 321-336.
- McCree, K. J. (1971). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191-216. doi: [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7).
- McDowell, T. P., Bradley, D. E., Hiller, M., Lam, J., Merk, J., & Keilholz, W. (2017). TRNSYS 18: The Continued Evolution of the Software. *Proceedings of the IBPSA Building Simulation*.
- McVeigh, J. C. (1983). CHAPTER 2 - SOLAR RADIATION. Dans J. C. McVeigh (Éd.), *Sun Power (Second Edition)* (pp. 13-24). Oxford: Pergamon. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-026147-8.50008-3>.
- Miller, L. (1977). Soil spectra contributions to grass canopy spectral reflectance. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(6), 721-726.
- Mira, M., Valor, E., Boluda, R., V, C., & Coll, C. (2007). Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils. Implication for land surface temperature determination. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112. doi: 10.1029/2007JF000749
- Mitalas, G., & Arseneault, J. (1972). *Fortran IV program to calculate z-transfer functions for the calculation of transient heat transfer through walls and roofs*. NRC.
- Mitchell, R. K., C. Curcija, D., Zhu, L., Vidanovic, S., Czarnecki, S., Arasteh, D., Carmodi, J., & Huizenga, C. (2019). Window 7.7. Berkeley, CA, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Moe, R., Grimstad, S. O., & Gislerod, H. (2005). The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in Norway. Dans *V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture* 711 (pp. 35-42).
- Mosey, G., & Supple, L. (2021). Renewable Energy for Heat & Power Generation and Energy Storage in Greenhouses (pp. 16): Joint Institute for Strategic Energy Analysis.
- Möttus, M., Sulev, M., Frederic, B., Lopez-Lozano, R., & Noorma, A. (2011). Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modeling. Dans (pp. 7970-8000).
- Nadal, A., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., López-Capel, E., Montero, J. I., Josa, A., . . . Royapoor, M. (2017). Building-integrated rooftop greenhouses: An energy and environmental assessment in the mediterranean context. *Applied Energy*, 187, 338-351. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.11.051

- National Fenestration Rating Council. (2010). Standard ANSI/NFRC 100 : Procedure for determining fenestration products U-factors. Greenbelt, MD, USA: NFRC.
- Nederhoff, E. (2004). Carbon Dioxide Enrichment. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, (May/June 2004), 50-59.
- Nederhoff, E. M. (1994). *Effects of CO₂ concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops* (Nederhoff, S.I.). Repéré à <https://edepot.wur.nl/206000>
- Papadakis, G., Frangoudakis, A., & Kyritsis, S. (1992). Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover. *Journal of agricultural engineering research*, 51, 191-205. doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80037-S](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80037-S).
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271-289. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H).
- Piché, P., Haillot, D., Gibout, S., Arrabie, C., Lamontagne, M.-A., Gilbert, V., & Bédécarrats, J.-P. (2020). Design, construction and analysis of a thermal energy storage system adapted to greenhouse cultivation in isolated northern communities. *Solar Energy*, 204, 90-105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.008>.
- Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, 43(9), 2356-2364.
- 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.
- Rasheed, A., Lee, J. W., & Lee, H. W. (2017). Development of a model to calculate the overall heat transfer coefficient of greenhouse covers. *Spanish journal of agricultural research*, 15(4), 11.
- Reis, M., & Ribeiro, A. (2020). Conversion factors and general equations applied in agricultural and forest meteorology (Vol. 27, pp. 227-258).
- Rempel, A. R., & Rempel, A. W. (2013). Rocks, Clays, Water, and Salts: Highly Durable, Infinitely Rechargeable, Eminently Controllable Thermal Batteries for Buildings. *Geosciences*, 3(1), 63-101. Repéré à <https://www.mdpi.com/2076-3263/3/1/63>
- RNC. (2013). Le chauffage au gaz (pp. 68). Ottawa, Ontario, CA: Office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada.

- Roy, J., Boulard, T., Kittas, C., & Wang, S. (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, 83, 1-20.
- Santamouris, M., Balaras, C. A., Dascalaki, E., & Vallindras, M. (1994). Passive solar agricultural greenhouses: A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, 53(5), 411-426. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90056-6).
- 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.
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2007). Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 81(12), 1447-1459.
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 82(9), 832-859. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.010>.
- 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.
- Snyder, R., & de Melo-Abreu, J. P. (2005). Frost protection : fundamentals, practice, and economics (Vol. 1). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Sodja, A., & Zupancic, B. (2009). Integration of Thermal Dynamics and Lighting in Buildings with Object Oriented Multi-domain Approach. Dans *2009 International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation* (pp. 98-103). doi: 10.1109/CSSim.2009.53
- Sofi, P. A., Ara, A., Gull, M., & Rehman, K. (2019). Canopy temperature depression as an effective physiological trait for drought screening. Dans *Drought-Detection and Solutions* (pp. 77-93). London, UK: IntechOpen. doi: doi.org/10.5772/intechopen.78865
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops an aid to climate management* (University of Wageningen, Wageningen, Netherlands).
- Statistiques Canada. (2021). Tableau 32-10-0018-01 Estimation de la superficie totale des serres et mois en exploitation.

- 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.
- Tei, F., Scaife, A., & Aikman, D. (1996). Growth of lettuce, onion, and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. *Annals of Botany*, 78(5), 633-643.
- Tesi, R. (2001). *Medios de protección para hortoflorofruticultura y el viverismo* (Vol. 1). Madrid, Spain: Ediciones Mundi-Pensa.
- TESS. (2012). TESS components library 17.1.03. Madison, WI, USA: Thermal Energy System Specialists (TESS, LLC).
- Thimijan, R., & Heins, R. (1983). Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. *Hortic Sci*, 18, 818-822.
- Tiwari, G. (2003). *Greenhouse technology for controlled environment*. Harrow, UK: Alpha Science Int'l Ltd.
- Tong, G., Christopher, D. M., Li, T., & Wang, T. (2013). Passive solar energy utilization: A review of cross-section building parameter selection for Chinese solar greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 540-548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.026>.
- Torres, A. P., & Lopez, R. G. (2018). Commercial greenhouse production - Measuring daily light integral in a greenhouse (pp. 7): Department of Horticulture and Landscape Architecture, Purdue University.
- Trimble. (2017). SketchUp Make 2017.
- Vadiee, A., & Martin, V. (2013). Energy analysis and thermoeconomic assessment of the closed greenhouse—The largest commercial solar building. *Applied Energy*, 102, 1256-1266.
- Vadiee, A., & Martin, V. (2014). Energy management strategies for commercial greenhouses. *Applied Energy*, 114, 880-888. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.089>.
- Valera, M. D., Molina, A. F., & Alvarez, M. A. (2008). *Protocolo de auditoría energética en invernaderos*. Madrid, Spain: IDAE.
- Vanthoor, B. H. E., de Visser, P. H. B., Stanghellini, C., & van Henten, E. J. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 2, description and validation of a tomato yield model. *Biosystems Engineering*, 110(4), 378-395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.005>.

- 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: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>.
- 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.
- 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.
- Wang, C., Du, J., Liu, Y., & Chow, D. (2021). A climate-based analysis of photosynthetically active radiation availability in large-scale greenhouses across China. *Journal of cleaner production*, 315, 127901. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127901>.
- Ward-Larson, G., & Shakespeare, R. (1998). *Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- Ward, R., Choudhary, R., Cundy, C., Johnson, G., & McRobie, A. (2015). Simulation of plants in buildings; incorporating plant-Air interactions in building energy simulation. Dans *14th International Conference of IBPSA-Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings* (pp. 2256-2263).
- Warren, S. G. (1982). Optical properties of snow. *Reviews of Geophysics*, 20(1), 67-89. doi: <https://doi.org/10.1029/RG020i001p00067>.
- Watmuff, J., Charters, W., & Proctor, D. (1977). Solar and wind induced external coefficients - Solar collectors. *Cooperation Mediterranee pour l'Energie Solaire, -1*, 56.
- Weber, A., Koschenz, M., Dorer, V., Hiller, M., & Holst, S. (2003). TRNFLOW, a new tool for the modeling of heat, air and pollutant transport in buildings within TRNSYS. Dans *Proc. of the 7-th IBPSA Conference* (Vol. 3, pp. 1363-1368). Citeseer.
- Wei, H., Hu, J., Liu, C., Wang, M., Zhao, J., Kang, D. I., & Jeong, B. R. (2018). Effect of Supplementary Light Source on Quality of Grafted Tomato Seedlings and Expression of Two Photosynthetic Genes. *Agronomy*, 8(10). doi: 10.3390/agronomy8100207
- West, M., & Hansen, E. (1992). Effect of hygroscopic materials on indoor relative humidity and air quality. *Desiccant cooling and dehumidification, ASHRAE, Atlanta GA USA*, 178-182.

- Wetter, M. (2005). BuildOpt—a new building energy simulation program that is built on smooth models. *Building and Environment*, 40(8), 1085-1092. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.10.003>.
- Wetter, M. (2006). Multizone airflow model in Modelica. Dans *5th International Modelica Conference* (Vol. 2, pp. 431-440).
- Wetter, M. (2009). A Modelica-based model library for building energy and control systems. Dans *11th Conference of the International Building Performance Simulation Association* (pp. 652-659).
- Wetter, M., & Haugstetter, C. (2006). Modelica versus TRNSYS—A comparison between an equation-based and a procedural modeling language for building energy simulation. Dans *SimBuild 2006* (Vol. 2, pp. 262-269).
- Wetter, M., Zuo, W., Noudui, T. S., & Pang, X. (2014). Modelica Buildings library. *Journal of Building Performance Simulation*, 7(4), 253-270. doi: [10.1080/19401493.2013.765506](https://doi.org/10.1080/19401493.2013.765506).
- Xin, P., Li, B., Zhang, H., & Hu, J. (2019). Optimization and control of the light environment for greenhouse crop production. *Scientific Reports*, 9(1), 8650. doi: [10.1038/s41598-019-44980-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44980-z).
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.019>.
- Zhang, G., Ding, X., Li, T., Pu, W., Lou, W., & Hou, J. (2020). Dynamic energy balance model of a glass greenhouse: An experimental validation and solar energy analysis. *Energy*, 198, 117281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117281>.
- Zhang, H., Yoshino, H., Hasegawa, K., Liu, J., Zhang, W., & Xuan, H. (2017). Practical moisture buffering effect of three hygroscopic materials in real-world conditions. *Energy and Buildings*, 139, 214-223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.021>.
- Zhang, J. S., Janni, K. A., & Jacobson, L. D. (1989). Modeling Natural Ventilation Induced by Combined Thermal Buoyancy and Wind. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 2165-2174. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.31279>.
- Zhang, Y., Gauthier, L., Halleux, D., Dansereau, B., & Gosselin, A. (1996). Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82, 227-244. doi: [10.1016/0168-1923\(96\)02332-5](https://doi.org/10.1016/0168-1923(96)02332-5)

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: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.144>.