

Modélisation énergétique de serres de petite taille :
Amélioration, calibration et validation d'un modèle de
simulation thermique dynamique développé avec TRNSYS

par

Arnaud BEAULAC

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

MONTRÉAL, LE 16 AVRIL 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Arnaud Beaulac, 2023



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 :

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

Mme Danielle Monfet, codirectrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Abdelatif Merabtine, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme 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 27 MARS 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

« On est beaucoup sur la planète à croire à l'importance d'une agriculture de proximité, à vouloir faire un retour à la terre, mais à chercher une façon de le faire d'une manière écologique, mais aussi rentable. »

- Jean-Martin Fortier

REMERCIEMENTS

Motivé par un intérêt pour la recherche scientifique et une volonté de croissance personnelle, ce parcours aux études supérieures fut parsemé de moments mémorables, tant les succès que les remises en question. Je tiens à remercier plusieurs personnes pour leur apport précieux dans ce projet et dans ma vie.

D'abord, je tiens à remercier mes co-directeurs Danielle et Didier pour leur accompagnement. Votre dynamisme et votre rigueur m'ont amené à me dépasser. Votre dévouement envers la réussite et l'évolution de vos étudiants se démarque. Je vous remercie pour toutes les réunions de suivi, les révisions de mes travaux, les judicieux conseils et les nombreuses discussions dans les couloirs de l'ÉTS, au pub, au parc et lors de conférences à Ottawa, Québec, Montréal et Reims.

Je tiens aussi à remercier les partenaires du projet, Charlotte Giard-Laliberté du CÉTAB+, Gilbert Larochelle-Martin et ses collègues d'Hydro-Québec, ainsi que Timothé Lalonde pour le transfert de connaissance en début et cours de projet. Je remercie également Hydro-Québec et le comité de sélection interne de l'ÉTS pour l'octroi de la bourse Hydro-Québec – ÉTS Montréal.

Au cours de ma maîtrise, qui a coïncidé avec la fin de la pandémie, j'ai eu le privilège de partager mon parcours avec des collègues inspirants et passionnés. Nous avons su créer une ambiance de travail motivante au labo. J'ai apprécié les discussions lors des pauses, des repas, et des activités sociales.

Finalement, je tiens à remercier Pascale, ma famille et mes amis proches qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ce projet professionnel. Je suis très privilégié de vous avoir à mes côtés.

**Modélisation énergétique de serres de petite taille :
Amélioration, calibration et validation d'un modèle de simulation thermique
dynamique développé avec TRNSYS**

ARNAUD BEAULAC

RÉSUMÉ

Au Québec, les producteurs agricoles et les communautés ont recours aux serres de petite taille afin de prolonger la saison de culture. Le maintien des conditions optimales de croissance dans ce type d'espace devient rapidement énergivore, cette consommation d'énergie représentant un défi majeur pour une exploitation serricole rentable. La simulation thermique dynamique de serres est un outil pour y étudier les performances énergétiques. Cependant, il n'existe pas actuellement de modèle énergétique validé permettant de simuler avec confiance les performances énergétiques des serres de petite taille dans le climat québécois.

L'objectif principal est de développer un modèle énergétique de serre de petite taille en contexte québécois. Pour ce faire, l'outil de simulation thermique dynamique, TRNSYS, est utilisé. Un modèle existant est évalué et amélioré avec des composants de modélisation énergétique détaillés. Le modèle est adapté pour représenter une serre à Victoriaville, Québec.

Le modèle est calibré pour fixer les paramètres incertains. Une analyse de sensibilité est d'abord utilisée pour identifier les paramètres incertains sensibles, suivie d'une calibration automatisée en plusieurs étapes. La méthode de calibration automatisée utilise un algorithme génétique multi-objectif pour ajuster les paramètres incertains, en calibrant le modèle pour la température de l'air intérieur et l'humidité relative mesurées. Le modèle est considéré comme calibré pour les phases passive et de ventilation naturelle (56 jours) avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 1,6°C pour la température intérieure et de 8,3% pour l'humidité relative.

Le modèle est ensuite validé avec deux ensembles de données additionnels, une serre froide et une serre minimalement chauffée. Dans les deux cas, la comparaison des résultats de la simulation avec les mesures de l'environnement intérieur a conduit à une RMSE sous 2°C pour la température et sous 10% pour l'humidité relative : ces valeurs se comparant favorablement à celles de la littérature. Le modèle a atteint une erreur relative moyenne de 3,7 % pour l'estimation de la consommation mensuelle d'énergie pour une serre minimalement chauffée.

Compte tenu de ces résultats, le modèle est considéré comme suffisamment précis et applicable pour les études futures de performances énergétiques. Le modèle TRNSYS, par sa polyvalence, offre la possibilité d'explorer différentes configurations de construction, de systèmes et de modes d'opération pour les serres. Cela ouvre des perspectives variées pour évaluer et améliorer les performances énergétiques des serres de petite taille au Québec.

Mots clés : serres, performance énergétique, simulation thermique dynamique, modélisation énergétique, calibration, validation

**Energy modelling of small-scale greenhouses:
Improvement, calibration, and validation of a building performance simulation model
developed with TRNSYS**

Arnaud BEAULAC

ABSTRACT

Due to the unfavourable climate for agriculture in Quebec, producers and communities often turn to small-scale greenhouses to extend their growing season. However, maintaining optimal growth conditions in a greenhouse quickly becomes energy-intensive, posing a major challenge for profitable greenhouse operations. Greenhouse energy modelling is a prevalent tool for studying greenhouse energy performance. However, there is currently no reliable energy model with extensive validation to confidently assess the energy performance of small-scale greenhouses in the Quebec climate.

This thesis aims to develop a validated greenhouse energy model for a typical small-scale greenhouse in a cold climate. The model is created using TRNSYS, a building performance simulation tool, with detailed energy modelling components and a user-defined crop model.

The model is calibrated to fix uncertain parameters. A sensitivity analysis is used first to identify sensible uncertain parameters, followed by a multi-stage automated calibration. The automated calibration method uses a multi-objective genetic algorithm to adjust the uncertain parameters, calibrating the model for the measured indoor air temperature and relative humidity. The model performed well during the free-floating and ventilated stages (56 days) with a combined root mean square error (RMSE) of 1.6°C for the indoor temperature and 8.3% for the relative humidity.

Then, the calibrated model is validated to assess its applicability using two additional datasets. For all the cases, comparing the simulation results with indoor environment measurements resulted in an RMSE of less than 2°C for air temperature and less than 10% for air relative humidity: these values compare favourably to the literature. The model achieved a 3.7% mean relative error in estimating monthly energy consumption for a minimally heated greenhouse.

Given these results, the model is deemed sufficiently accurate and applicable for future investigations. The TRNSYS model, with its versatility, provides the opportunity to explore various construction configurations, systems, and operating modes for greenhouses. This opens up diverse possibilities for assessing and enhancing the energy performance of small-scale greenhouses in Quebec.

Keywords: greenhouses, energy performance, building performance simulation, energy modelling, calibration, validation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Serre : enceinte de production végétale	6
1.1.1 Conditions de l'environnement intérieur d'une serre	7
1.1.1.1 Température	7
1.1.1.2 Humidité	8
1.1.1.3 Rayonnement photosynthétiquement actif.....	8
1.1.1.4 Concentration en dioxyde de carbone.....	9
1.1.2 Caractéristiques de construction d'une serre	9
1.1.2.1 Forme et superficie	9
1.1.2.2 Enveloppe	11
1.1.2.3 Systèmes CVCA et éclairage artificiel	11
1.1.3 Aperçu des serres modélisées avec le logiciel TRNSYS.....	13
1.2 Simulation des performances énergétiques de serres.....	15
1.2.1 Simulation des performances énergétiques d'un bâtiment	15
1.2.2 Bilans thermiques et massiques d'une serre	17
1.2.2.1 Rayonnement solaire.....	19
1.2.2.2 Rayonnement de grandes longueurs d'onde	20
1.2.2.3 Éclairage artificiel.....	21
1.2.2.4 Transfert thermique par convection.....	21
1.2.2.5 Infiltration	22
1.2.2.6 Ventilation.....	22
1.2.2.7 Interaction avec le sol	23
1.2.2.8 Interaction avec les cultures.....	25
1.2.2.9 Condensation.....	28
1.2.3 Éléments inclus et leurs approches de modélisation dans les études récentes	28
1.3 Calibration et validation des modèles énergétiques de serres.....	32
1.3.1 Données expérimentales d'une serre	33
1.3.1.1 Acquisition des données	33
1.3.1.2 Comparaisons des données	33
1.3.2 Processus de calibration.....	34
1.3.2.1 Analyse de sensibilité	36
1.3.2.2 Périodes de calibration.....	37
1.3.2.3 Méthodes de calibration.....	37
1.3.2.4 Méthodologies de calibration des études récentes.....	38
1.3.3 Processus de validation.....	40
1.3.3.1 Critères de validation	42
1.3.3.2 Méthodologies de validation des études récentes	43
1.4 Synthèse de la revue de littérature	45

CHAPITRE 2	DÉMARCHE DE TRAVAIL	47
2.1	Objectifs	47
2.2	Aperçu de la méthodologie	47
2.3	Présentation de l'article scientifique	49
CHAPITRE 3	ENERGY MODELING, CALIBRATION, AND VALIDATION OF A SMALL-SCALE GREENHOUSE USING TRNSYS	51
3.1	Abstract	51
3.2	Introduction	52
3.3	Methods	56
	3.3.1 Creation of the greenhouse energy model	57
	3.3.2 Automated calibration	57
	3.3.2.1 Identification of uncertain parameters	58
	3.3.2.2 Sensitivity analysis	58
	3.3.2.3 Multi-stage calibration	59
	3.3.3 Validation of the calibrated model	63
3.4	Description of the greenhouse energy model	64
	3.4.1 Measured data	65
	3.4.2 Model creation	66
3.5	Model calibration	68
	3.5.1 Identification of the model uncertain parameters	68
	3.5.2 Sensitivity analysis	70
	3.5.3 Calibration of uncertain parameters	71
3.6	Results	73
	3.6.1 Calibration results	73
	3.6.1.1 Indoor air temperature	73
	3.6.1.2 Indoor air relative humidity	75
	3.6.1.3 Overview of the multi-stage calibration	77
	3.6.2 Validation results	78
3.7	Discussion	83
3.8	Conclusion	86
3.9	Appendix A Greenhouse energy model development	87
	3.9.1 Weather data and user-provided inputs	87
	3.9.2 Greenhouse construction	88
	3.9.3 Solar radiation	90
	3.9.4 Longwave radiation	91
	3.9.5 Ground coupling	91
	3.9.6 Infiltration / Ventilation	92
	3.9.7 Crops	96
	3.9.8 Heating system	99
CHAPITRE 4	DISCUSSION	101
4.1	Principaux résultats et contributions	101
	4.1.1 Comparaison des résultats de validation	102
	4.1.2 Approches de modélisation	106

4.1.2.1	Infiltration et ventilation naturelle	106
4.1.2.2	Capacitance thermique.....	108
4.1.2.3	Conduction du sol	108
4.1.2.4	Fichier météorologique	109
4.1.3	Calibration.....	110
4.1.3.1	Analyse de sensibilité	111
4.1.3.2	Reproductibilité.....	111
4.1.3.3	Comparaison avec le modèle initial.....	112
4.2	Limites et suggestions d'améliorations.....	113
4.3	Perspective d'utilisation du modèle	117
4.3.1	Polyvalence et adaptation	117
4.3.2	Indicateurs de performance.....	118
4.3.3	Objectifs et fonctions	119
	CONCLUSION.....	121
	RECOMMANDATIONS	123
ANNEXE I	VOLUME DE CONTRÔLE DES BILANS ÉNERGÉTIQUES ET MASSIQUES DANS UNE SERRE	125
ANNEXE II	DESCRIPTION DES BILANS THERMIQUES ET MASSIQUE D'UNE SERRE.....	127
ANNEXE III	MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE DANS TRNSYS	131
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	136

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Matériaux de revêtement de l'enveloppe d'une serre	11
Tableau 1.2	Principaux systèmes CVCA et d'éclairage artificiel présents dans une serre	12
Tableau 1.3	Caractéristiques des serres développées avec TRNSYS Tiré de Beaulac et al. (2023, p. 4).....	14
Tableau 1.4	Propriétés physicochimiques de types de sol.....	25
Tableau 1.5	Éléments d'un modèle de serres	29
Tableau 1.6	Éléments inclus dans les modèles développés avec TRNSYS et leurs approches de modélisation.....	30
Tableau 1.9	Formules mathématiques des indicateurs statistiques.....	34
Tableau 1.7	Méthodes d'analyse de sensibilité dans les articles de calibration récents	36
Tableau 1.8	Méthodologies de calibration utilisées pour des modèles de serre	39
Tableau 1.10	Recommandations de critères de validation des résultats de simulation ...	42
Tableau 1.11	Méthodologies de validation des modèles de serre développés avec TRNSYS	44
Tableau 3.1	Detail of each of the calibration stages.....	62
Tableau 3.2	Validation periods of the calibrated model.....	63
Tableau 3.3	Monitored on-site weather data	65
Tableau 3.4	Monitored indoor environment conditions and operating variables of the greenhouse	66
Tableau 3.5	TRNSYS components used in the greenhouse model	67
Tableau 3.6	Uncertain parameters and bounds.....	68
Tableau 3.7	Values of the calibrated uncertain parameters.....	72
Tableau 3.8	Hourly results for each of the calibration stages.....	77
Tableau 3.9	Additional hourly statistical metrics for each of the calibration stages	78

XVIII

Tableau 3.10	Heating setpoints during the heated greenhouse validation period	80
Tableau 3.11	Results of the validation of the greenhouse model	82
Tableau 3.12	Initial properties of the glazing materials	89
Tableau 3.13	Convective heat transfer coefficients in $W.m^{-2}.K^{-1}$	89
Tableau 3.14	Wall averaged wind pressure coefficients	93
Tableau 3.15	Infiltration airflow links of the greenhouse	95
Tableau 3.16	Cooling stages modeled in TRNSYS.....	96
Tableau 3.17	Control parameters of the heating system.....	99
Tableau 4.1	Résultats de validation empirique d'études comparables.....	103

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Formes de serre10
Figure 1.2	Exemples de serres de petite taille au Québec10
Figure 1.3	Schéma simplifié des flux thermiques dans une serre19
Figure 1.4	Profil annuel des températures du sol au centre d'une serre en Inde selon la profondeur Adaptée de Ghosal et al. (2004, p. 54).....24
Figure 1.5	Processus de calibration d'un modèle de STD Adaptée de Chong et al. (2021, p. 111542)35
Figure 1.6	Évolution des méthodes de calibration Adaptée de Chong et al. (2021, p. 111537)38
Figure 1.7	Approches analytique, empirique et comparative de validation d'un modèle énergétique de bâtiment41
Figure 2.1	Schéma de l'aperçu de la méthodologie du projet de recherche47
Figure 3.1	Monitored gothic arch greenhouses56
Figure 3.2	Flowchart of the greenhouse energy model creation process56
Figure 3.3	Overview of the gothic arch greenhouse systems.....65
Figure 3.4	Simulation overview67
Figure 3.5	Global sensitivity indices of identified uncertain parameters.....70
Figure 3.6	Comparison of indoor air temperature between measurements and simulation results from (a) calibration stage 1 – Week 1; (b) calibration stage 1 – Week 2; (c) calibration stage 2; and (d) calibration stage 374
Figure 3.7	Comparison of indoor air relative humidity between measurements and simulation results from (a) calibration stage 1 – Week 1; (b) calibration stage 1 – Week 2; (c) calibration stage 2; and (d) calibration stage 376
Figure 3.8	Comparison of indoor air (a) temperature and (b) relative humidity between measurements and simulation results of the unheated greenhouse in 202179

Figure 3.9	Comparison of indoor air (a) temperature and (b) relative humidity between measurements and simulation results of the heated greenhouse for the week of 20 to 27 November 2022	81
Figure 3.10	Comparison of heating consumption between measurements and simulation results of the minimally heated greenhouse	83
Figure 3.11	Representation of the modeled greenhouse geometry	89
Figure 3.12	TRNFLOW network scheme of the greenhouse.....	94
Figure 4.1	Comparaison de modèles d'infiltration pour l'année 2022	107
Figure 4.2	Données d'entrée d'irradiance horizontale totale à un pas de temps de 5 minutes, le 2 octobre 2021	110
Figure 4.3	Comparaison de la température de l'air entre les résultats de simulation des modèles initiales et calibrés pour la serre froide en 2021.....	113

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ANOVA	<i>Analysis of variance</i> ou analyse de variance
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BPS	<i>Building performance simulation</i> ou simulation thermique dynamique de bâtiment
CAH	Changements d'air par heure
CÉTAB+	Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité
CFD	<i>Computational fluid dynamic</i> ou étude numérique de la mécanique des fluides
CO ₂	Dioxyde de carbone
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement de l'air
CV-RMSE	<i>Coefficient of variance of the root mean squared error</i> ou coefficient de variance de l'erreur quadratique moyenne
DE	<i>Differential evolution</i> ou évolution différentielle
DEL	Diode électroluminescente
FIR	<i>Far-infrared radiation</i> ou rayonnement infrarouge lointain
GA	<i>Genetic algorithm</i> ou Algorithme génétique
HBM	<i>Heat balance method</i> ou méthode des bilans thermiques
HJ	Algorithme Hooke-Jeeves
IBPSA	<i>International Building Performance Simulation Association</i>
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
MAE	<i>Mean absolute error</i> ou erreur absolue moyenne
MBE	<i>Mean bias error</i> ou erreur moyenne
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MOGA	<i>Multi-objective genetic algorithm</i> ou algorithme génétique multi-objectifs
MQE	<i>Mean quadratic error</i> ou erreur quadratique moyenne
MRE	<i>Mean relative error</i> ou erreur relative moyenne
MSE	<i>Mean squared error</i> ou erreur carrée moyenne
NIR	<i>Near-infrared radiation</i> ou rayonnement dans le proche infrarouge

NMBE	<i>Normalized mean bias error</i> ou erreur moyenne normalisée
NSE	<i>Nash-Sutcliffe efficiency coefficient</i> ou coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe
OAT	<i>One-At-a-Time</i> ou un à la fois
PAR	<i>Photosynthetically active radiation</i> ou rayonnement photosynthétiquement actif
PC	Polycarbonate
PE	Polyéthylène
PSO	<i>Particle swarm optimization</i> ou optimisation par essais de particules
PPM	Parties par millions
PPFD	<i>Photosynthetic photon flux density</i> ou densité de flux de photons photosynthétiques
RMSE	<i>Root mean squared error</i> ou erreur quadratique moyenne
R ²	Coefficient de détermination
SFT	Société française de thermique
SHP	Sodium haute pression
STD	Simulation thermique dynamique
TFM	<i>Transfer function method</i> ou Méthode des fonctions de transfert de conduction
UV	Ultraviolet
VH	Verre horticole

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

α	Absorptivité [-]
β	Exposant de puissance du vent [-]
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	Masse volumique [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]
C_d	Coefficient de décharge par une ouverture [-]
CF	Couverture nuageuse du ciel [-]
C_p	Capacité thermique massique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
C_s	Coefficient d'infiltration [kg.s ⁻¹ @1Pa]
C_v	Coefficient de pression moyen du vent [-], Capacité thermique volumique [J.m ⁻³ .K ⁻¹]
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]
e	Épaisseur [m]
E	Énergie [J]
f	Fraction [-], Facteur [-]
F_{j-k}	Facteur de forme entre deux surfaces j et k [-]
g	Accélération gravitationnelle [m.s ⁻²], Coefficient de transfert massique [m.s ⁻¹]
h	Coefficient de convection [W.m ⁻² .K ⁻¹]
H	Hauteur [m]
HR	Humidité relative [%]
I	Irradiance horizontale globale [W.m ⁻²]
k	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

$k_{s,sun}$	Coefficient d'extinction du rayonnement photo actif solaire à travers la canopée [-]
$k_{s,al}$	Coefficient d'extinction du rayonnement photo actif de l'éclairage artificiel à travers la canopée [-]
L	Longueur [m], Flux de chaleur latente [W]
\dot{m}	Débit massique [kg.s ⁻¹]
M	Masse molaire [kg.mol ⁻¹]
n	Exposant de la loi de la puissance pour l'infiltration [-]
P	Pression [Pa]
$PPFD$	Densité du flux de photons photo actifs [μmol.s ⁻¹ .m ⁻²]
P_0	Pression de saturation [Pa]
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 [J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
SC	Coefficient de sensibilité [-]
T	Température [K ou °C]
U	Coefficient de transmission thermique global [W.m ⁻² .K]
v	Vitesse du vent [m.s ⁻¹]
\dot{V}	Débit volumique [m ³ .s ⁻¹]
VP	Échange massique de vapeur d'eau [kg.s ⁻¹]
Vol	Volume [m ³]
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]

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>Cdsn</i>	Propre à la condensation
<i>cond</i>	Conduction à travers un corps
<i>conv</i>	Convection entre une surface et un fluide
<i>cov</i>	<i>Cover</i> ou Propre à l'enveloppe de la serre
<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>	<i>Dew point</i> ou point de rosée
<i>e</i>	Extérieur
<i>émis</i>	Émis
<i>évent</i>	Propre à l'évent de la serre
<i>H₂O</i>	Propre à la vapeur d'eau ou à l'eau, selon le contexte
<i>HVAC</i>	Propre aux systèmes CVCA
<i>i</i>	Intérieure
<i>Inf</i>	Propre à l'infiltration
<i>j</i>	Indice pour discrétisation temporelle
<i>Lamp</i>	Propre à l'éclairage artificiel
<i>latent</i>	Latent
<i>g</i>	Propre au sol sous la serre
<i>lw</i>	<i>Longwave radiation</i> ou rayonnement de grandes longueurs d'onde
<i>m</i>	Propre à la station de mesure du vent (hauteur, valeur mesurée, etc.)
<i>morph</i>	Morphologique
<i>Plt</i>	Propre à la canopée des plantes
<i>Serre</i>	Propre la superficie de la serre
<i>sky</i>	Propre à la voûte céleste

<i>Sol</i>	Rayonnement solaire à ondes courtes
<i>SW</i>	<i>Shortwave radiation</i> ou rayonnement de courtes longueurs d'onde
<i>trans</i>	Transmis
<i>v</i>	Causé par le vent (applicable à la pression)
Vent	Propre à la ventilation

INTRODUCTION

L'agriculture est un secteur important de l'économie québécoise. En 2021, il représentait 56 600 emplois et générait des recettes de plus de 11 milliards de dollars (MAPAQ, 2021). Au Québec, les producteurs agricoles sont confrontés à des conditions climatiques rigoureuses qui limitent la saison de croissance des cultures en champ. Les difficultés d'approvisionnement éprouvées dans les dernières années ont mis de l'avant l'importance de l'autonomie alimentaire du Québec. Pour surmonter ces défis et accroître la production locale d'aliments, les serres sont un élément clé de l'agriculture dans la province, comme le montre la *Stratégie de croissance des serres au Québec* (MAPAQ, 2020). Ces infrastructures permettent de créer un environnement contrôlé, offrant des avantages tels que la prolongation de la saison de croissance, l'optimisation du rendement agricole, l'amélioration de la fraîcheur des aliments ainsi que la réduction de l'empreinte carbone liée au transport. Au Québec, en 2021, la culture en serre a permis d'augmenter les recettes du secteur maraîcher malgré les conditions météorologiques moins favorables (MAPAQ, 2021). Cependant, pour maintenir un environnement favorable, les coûts énergétiques associés au chauffage, au conditionnement de l'air et à l'éclairage des serres sont élevés (Gobeil & Dion, 2015; MAPAQ, 2018; Pelletier & Godbout, 2017). Dans le contexte québécois, où les besoins énergétiques provinciaux augmentent et où la décarbonation est nécessaire (MERN, 2022), l'efficacité énergétique des serres doit être étudiée et améliorée pour préserver leur pertinence dans la mouvance de la transition énergétique.

Pour étudier les performances énergétiques d'une serre, la simulation thermique dynamique (STD) est une approche éprouvée. Elle réduit le temps et les coûts nécessaires pour évaluer l'impact de mesures d'efficacité énergétique. En effet, la STD permet de quantifier les flux énergétiques ne pouvant être mesurés dans une serre. La compréhension du comportement énergétique permet notamment d'évaluer avec précision la consommation énergétique, offrant ainsi des informations cruciales pour la réduction de la demande énergétique de la serre et la mise en place de mesures d'efficacité énergétique.

La littérature scientifique compte plusieurs études présentant des modèles de STD de serres. Ces modèles ont été développés et validés pour différents types de serres, à différents niveaux de détails et dans différents contextes climatiques (Beaulac et al., 2023; Katzin et al., 2022). Un modèle doit être adapté à son contexte et détailler les phénomènes qui y sont dominants (Katzin et al., 2022). Très peu de modèles sont partagés et disponibles aux utilisateurs, et encore moins le sont dans un environnement modulable permettant l'ajout de systèmes additionnels.

Face à ce constat, l'objectif de ce mémoire est le développement d'un modèle énergétique de serre de petite taille à l'aide d'un outil de STD, TRNSYS, permettant d'en évaluer les performances énergétiques en contexte québécois. Ce modèle énergétique doit être en mesure de prédire avec précision les conditions de l'environnement intérieur d'une serre, répondant ainsi à divers besoins d'études énergétiques. Les sous-objectifs du mémoire sont les suivants :

1. Revue des bilans énergétiques et des approches de modélisation utilisés pour les serres;
2. Amélioration d'un modèle énergétique existant de serre, fondé sur la mise en équation de phénomènes physiques avec le logiciel TRNSYS;
3. Calibration des paramètres incertains du modèle énergétique d'une serre par une méthode automatisée;
4. Validation des performances de prédictions des conditions de l'environnement intérieur et énergétique d'une serre par le modèle énergétique calibré.

Le modèle énergétique de serre choisi utilise le logiciel de simulation TRNSYS (Klein et al., 2017) en raison de sa structure flexible, qui permet l'intégration de composants individuels (existants ou nouvellement développés) au modèle détaillé de bâtiment multizone, *Type 56*. Les paramètres du modèle existant seront ajustés et fixés à partir des constats tirés de la littérature scientifique, de données mesurées sur site et d'un processus de calibration automatisé. Les résultats de simulation de ce modèle seront calibrés et validés avec des données mesurées sur les serres du *Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité (CÉTAB+)* situé à Victoriaville, Québec, Canada.

La contribution principale de ce projet de recherche est un modèle énergétique de serre produisant des résultats de simulation fiables. Avec un modèle polyvalent dont la capacité de prédiction est validée, de nombreuses opportunités se présentent pour son utilisation. En effet, ce modèle peut servir à l'analyse de divers scénarios de mesures d'efficacité énergétique, d'ajouts de technologies d'énergie renouvelable, d'analyse d'algorithmes de contrôle, de calendriers de semis ou de base de référence pour des demandes de subventions, des politiques environnementales ou des réglementations. Ce modèle peut aussi servir à étudier divers indicateurs de performance, dont les conditions intérieures, la consommation énergétique, l'empreinte carbone, la production de plantes et les coûts d'opération. En quelque sorte, ce projet est un tremplin vers une foule de possibilités d'exploitation visant à soutenir le développement de la serriculture.

Ce mémoire est « par article », il intègre un article soumis pour publication dans le corps du document. Ce mémoire est séparé en quatre chapitres. D'abord, dans le CHAPITRE 1, une revue de la littérature dresse l'état de l'art de la modélisation énergétique de serres, avec une attention particulière sur les modèles développés avec le logiciel de simulation TRNSYS. Ensuite, le CHAPITRE 2 présente la démarche de travail portant sur le développement d'un modèle énergétique de serre de petite taille dans le climat québécois. Le CHAPITRE 3 présente l'article soumis dans la revue *Applied Thermal Engineering* le 14 décembre 2023. Il contient le corps du travail de ce mémoire, soit l'amélioration, la calibration et la validation d'un modèle énergétique de serre. Finalement, le CHAPITRE 4 est une discussion qui inclut l'interprétation des résultats et leur apport au domaine de recherche.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce premier chapitre présente une analyse de l'état actuel de la recherche sur la modélisation énergétique de serres en général, et de façon particulière sur les modèles développés avec le logiciel de simulation TRNSYS puisque c'est le logiciel utilisé dans ce projet de recherche. La revue documente les processus clés dans le développement d'un modèle énergétique de serre et permet d'en identifier les tendances, les différences et les lacunes.

La revue est divisée en quatre sections. D'abord, la section 1.1 définit les caractéristiques de construction et d'opération possibles d'une serre, puis résume les types de serres qui ont été modélisés récemment dans la littérature scientifique. La revue des caractéristiques des serres permet de circonscrire la serre de petite taille sur laquelle porte ce projet de recherche. Deuxièmement, la section 1.2 présente les méthodes actuelles de modélisation énergétique de bâtiment, plus spécifiquement la modélisation basée sur les phénomènes physiques, et leurs applications en contexte de serriculture. Dans cette section, les approches de modélisation énergétique de serre précédemment utilisées sont analysées pour orienter la réalisation du deuxième sous-objectif de ce projet de recherche présenté en introduction. Troisièmement, la section 1.3 présente les processus de calibration et de validation des modèles basés sur les phénomènes physiques. Les méthodologies pour calibrer les modèles de serres sont examinées en vue de cibler le troisième sous-objectif de recherche. Ensuite, la section 1.3.3 expose les approches de validation des modèles énergétiques de serres appliqués dans la littérature scientifique, ainsi que les bonnes pratiques pour répondre au quatrième sous-objectif de la recherche. Finalement, la section 1.4 synthétise les constats tirés de cette revue de littérature scientifique et leurs relations avec les objectifs de recherche.

À la conclusion des sections 1.1, 1.2 et 1.3, des tableaux présentent une revue de seize modèles de serre développés avec le logiciel de STD, TRNSYS. Ces tableaux sont tirés d'un article scientifique publié dans le cadre de la *Conférence annuelle de la Société française de*

thermique (SFT) en 2023 (Beaulac et al., 2023). La sélection des modèles étudiés est faite selon trois critères : une date de publication de moins de dix ans (2013-2022), un modèle qui est décrit en détails pour la première fois, et un processus de validation du modèle y est présenté. L'utilisation du mot-clé *TRNSYS* dans les bases de données permet l'identification de peu d'articles. Treize articles en anglais datant de moins de dix ans (2013-2022) lorsqu'une recherche est effectuée sur *Web of Science* avec les termes (*TRNSYS*) AND (“*greenhouse model**” OR “*greenhouse simulation**” OR (*greenhouse** AND (“*yield model**” OR “*thermal model**” OR “*heating model**” OR “*yield simulation**” OR “*thermal simulation**” OR “*heating simulation**” OR “*control*”))) NOT (“*greenhouse gas**” OR “*greenhouse emission**” OR “*greenhouse effect**”). En étudiant les références de ces treize articles, un total de trente-deux articles est atteint. De ces articles, seize ont ensuite été exclus : huit utilisent un modèle précédemment décrit dans un autre article et huit ne présentent pas de processus de validation. Ainsi, un échantillon de seize modèles est considéré dans cette revue. Cet échantillon offre un aperçu de l'état de la recherche sur la modélisation énergétique de serres avec le logiciel TRNSYS.

1.1 Serre : enceinte de production végétale

Une serre est un type d'enceinte d'agriculture en environnement contrôlé. Un environnement contrôlé désigne un milieu où les conditions telles que la température, l'humidité, l'éclairage et la concentration en CO₂ sont régulées pour permettre une croissance optimale des plantes qui y sont cultivées. Les serres sont des structures composées d'une enveloppe transparente qui permet au rayonnement solaire d'entrer, réchauffant les surfaces opaques internes, qui à leur tour réchauffent l'air par convection. L'enveloppe est conçue pour maintenir la chaleur à l'intérieur. Les conditions internes de la serre sont régulées par des systèmes passifs et actifs. Les systèmes passifs influencent les conditions internes sans nécessiter d'énergie externe autres que l'énergie solaire, tandis que les systèmes actifs régulent les conditions internes avec un apport d'énergie supplémentaire (électrique, thermique). Les caractéristiques de construction ainsi que les systèmes de régulation du climat d'une serre sont adaptés en fonction

de l'emplacement géographique, des besoins de production, des ressources disponibles sur un site donné, et des variétés de fleurs, fruits ou légumes cultivés (Castilla, 2013).

Afin de présenter les caractéristiques spécifiques des serres et de circonscrire la serre qui est modélisée dans ce mémoire, ce sous-chapitre présente les conditions intérieures d'une serre (Section 1.1.1), les caractéristiques de construction de serres (Section 1.1.2), ainsi qu'une revue des caractéristiques des serres modélisées dans des études récentes (Section 1.1.3).

1.1.1 Conditions de l'environnement intérieur d'une serre

Les conditions de l'environnement intérieur d'une serre sont généralement maintenues pour assurer la croissance optimale de la variété des plantes cultivées. Les conditions optimales de croissance biologique des plantes favorisent le processus de photosynthèse et de respiration des plantes. Les plantes sont des organismes vivants résilients. Ils ont donc une plage de conditions qui maintient leur croissance, mais certaines conditions sont fatales.

1.1.1.1 Température

La température influence les processus biologiques de croissance des plantes. Chaque variété de plantes requière différentes températures optimales de croissance et ce, à différents stades de leur développement (Badji et al., 2022). De nombreuses recherches sur les cultures horticoles et maraîchères étudient cette influence dans divers contextes. Les principaux risques pour les plantes liés à la température sont la surchauffe et le gel (Hatfield & Prueger, 2015). Les serres peuvent être classées selon la température qui y est maintenue: les serres froides (non-chauffées), les serres minimalement chauffées (5-8°C), les serres tempérées (12-15°C) et les serres chaudes (20-25°C) (Castilla, 2013).

1.1.1.2 Humidité

Le taux d'humidité doit être adéquat pour créer un environnement propice à la transpiration des plantes par les pores et à l'absorption des nutriments par leurs racines (Yildiz, 2021). En effet, la transpiration des plantes est cruciale pour réguler leur température et permettre le transport de l'eau et des nutriments. La capacité de transpiration est influencée par le déficit de pression de vapeur (DPV), une mesure de l'écart entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur réelle de la serre. Un air trop sec (DPV trop grand) entraîne une transpiration trop rapide, ce qui assèche les plantes. Tandis qu'un air trop humide (DPV trop petit) limite la transpiration. De plus, un excès d'humidité contribue à créer de la condensation sur les plantes, causant le développement de moisissures et de champignons (Agrios, 2005). Le taux d'humidité doit donc être régulé en utilisant des systèmes d'humidification (brumisation) ou de déshumidification (ventilation ou autres) (Badji et al., 2022).

1.1.1.3 Rayonnement photosynthétiquement actif

L'énergie nécessaire pour activer la réaction de photosynthèse provient du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Le spectre du PAR qui permet l'absorption de l'énergie lumineuse par les pigments photosynthétiques des plantes, dont la chlorophylle, se trouve environ entre les longueurs d'onde de 350 nm et 750 nm (McCree, 1971). Le PAR disponible à un moment précis dans la serre est quantifié en [$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$] par la densité de flux de photons photoactifs (PPFD) et le PAR disponible dans une serre sur une période journalière est quantifié en [$\text{mol}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$] par l'intégrale de l'éclairage journalier (DLI). Le rendement de photosynthèse augmente avec l'intensité de PAR (Carotti et al., 2023). Les serres sont conçues pour maximiser la transmission du rayonnement solaire. Le contrôle précis du PAR permet aux producteurs serricoles de maximiser la croissance des plantes, en ajustant la durée et l'intensité de l'éclairage en fonction des besoins spécifiques de chaque variété. Lorsque le rayonnement solaire est insuffisant pour la croissance des plantes, une source d'éclairage artificiel est nécessaire.

1.1.1.4 Concentration en dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un composé inorganique essentiel pour la photosynthèse. L'atmosphère contient en moyenne une concentration de 420 ppm de CO₂ (NASA Global Climate Change, 2023). Une hausse de la concentration en CO₂ favorise la photosynthèse pour une même intensité de PAR (Castilla, 2013). L'enrichissement de CO₂ est une pratique courante dans les serres pour optimiser le rendement des productions. Plusieurs études quantifient l'influence de la concentration de CO₂ sur la croissance des plantes. La concentration optimale dépend des autres conditions environnementales internes de la serre (température, humidité, PAR), ainsi que la variété de plante cultivée. Dans les serres refroidies par ventilation naturelle, le maintien d'une concentration de CO₂ supérieure à celle extérieure est ardu, dû au renouvellement d'air.

1.1.2 Caractéristiques de construction d'une serre

Les caractéristiques de constructions et les systèmes actifs et passifs d'une serre dépendent de l'emplacement géographique, des exigences de production, et des ressources disponibles sur un site particulier. Les serres sont très versatiles. Les sous-chapitres 1.1.2.1 à 1.1.2.3 présentent les principales caractéristiques d'une serre. Ils permettront de comparer les modèles précédemment développés entre eux. Cette section présente quelques caractéristiques de construction, de quelques études sélectionnées, selon les critères préalablement mentionnés, et ne se veut pas un recensement exhaustif des serres existantes.

1.1.2.1 Forme et superficie

La superficie des serres varie considérablement, allant de petites structures à travée simple de quelques mètres carrés, jusqu'à de vastes complexes commerciaux à travées multiples de plusieurs hectares. Plusieurs formes de structures de serres existent, la Figure 1.1 en recense certaines. La forme et la superficie d'une serre sont adaptées aux besoins de cultures spécifiques à chaque installation (Sahdev et al., 2019).

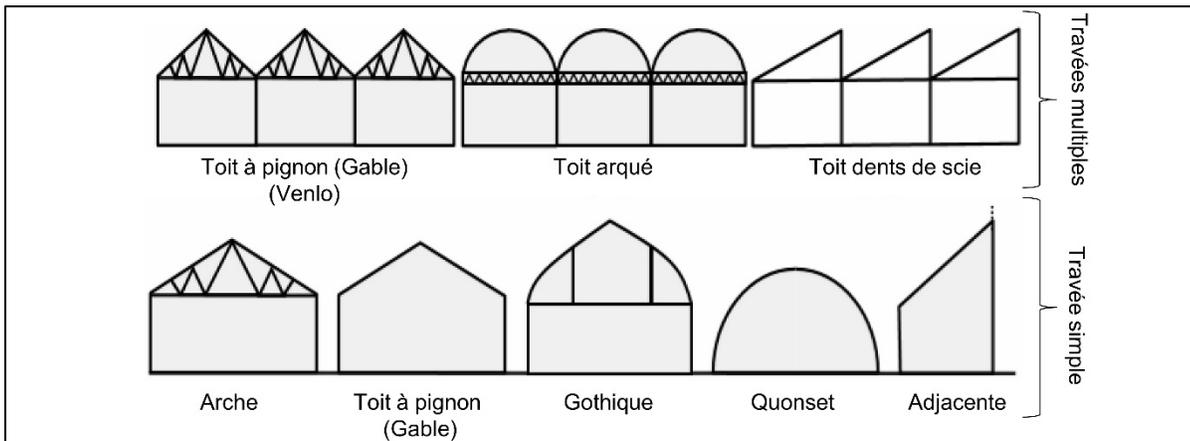


Figure 1.1 Formes de serre
Adaptée de Yildiz (2021, p. 210)

Au Québec, les serres de petite taille sont caractérisées par une superficie de moins de 1000 m² (MAPAQ, 2018). 60% des entreprises serricoles québécoises exploitent des serres de petite taille, représentant environ 10% de la superficie de production (MAPAQ, 2018). Ce sont des productions de plus petite envergure opérées par des producteurs agricoles ou pouvant servir de serres communautaires, tel qu'illustré à la Figure 1.2.



Figure 1.2 Exemples de serres de petite taille au Québec

La serre de petite taille « typique » est décrite dans *Le maraichage nordique* (Fortier & Sylvestre, 2021), mais plusieurs variantes existent. Les serres de petite taille sont généralement des serres ouvertes, caractérisées par la ventilation extérieure pour combler les besoins de refroidissement et de déshumidification. Les cultures sont cultivées à même le sol de la serre, ou parfois en pots. Dans les serres de petite taille, les systèmes favorisés sont principalement

passifs. En contexte québécois, les systèmes actifs couramment utilisés sont le chauffage et la ventilation forcée.

1.1.2.2 Enveloppe

L'enveloppe d'une serre est caractérisée par sa capacité à transmettre le rayonnement solaire ainsi que par ses propriétés thermiques. Le Tableau 1.1 présente un aperçu des matériaux de revêtement les plus couramment utilisés pour les serres. Chaque matériau possède des avantages et des inconvénients, et il est essentiel de choisir l'enveloppe qui répond le mieux aux conditions climatiques locales et aux besoins spécifiques du type de culture (Castilla, 2013; Valera, 2008). Le matériau de l'enveloppe est parfois modifié pour limiter la condensation sur la paroi ou pour diminuer l'émissivité des rayonnements à grandes longueurs d'onde (Castilla, 2013). Une autre technique d'économie d'énergie est de remplacer une section de l'enveloppe de la serre, généralement le mur nord ou le bas des serres, par des matériaux isolants opaques.

Tableau 1.1 Matériaux de revêtement de l'enveloppe d'une serre

Matériau	Avantages	Inconvénients
Verre horticole (VH)	<ul style="list-style-type: none"> · Bonne transmissivité au PAR · Durabilité 	<ul style="list-style-type: none"> · Isolation thermique · Coût
Polyéthylène simple épaisseur (PE)	<ul style="list-style-type: none"> · Transmissivité au PAR adéquate · Coût 	<ul style="list-style-type: none"> · Isolation thermique · Durabilité
Polyéthylène double épaisseur soufflé (PE double)	<ul style="list-style-type: none"> · Isolation thermique · Coût · Transmissivité au PAR réduite, mais adéquate 	<ul style="list-style-type: none"> · Durabilité
Polycarbonate (PC)	<ul style="list-style-type: none"> · Isolation thermique · Durabilité · Transmissivité au PAR adéquate 	<ul style="list-style-type: none"> · Coût

1.1.2.3 Systèmes CVCA et éclairage artificiel

Jusqu'à présent les caractéristiques de construction présentées sont des systèmes passifs. Le Tableau 1.2 résume les principaux systèmes actifs présents dans une serre. Les systèmes de chauffage, de ventilation, et de climatisation (CVCA) et les systèmes d'éclairage artificiels

jouent un rôle fondamental dans la gestion des conditions environnementales des serres agricoles et horticoles, présentées dans la section 1.1.1.

Tableau 1.2 Principaux systèmes CVCA et d'éclairage artificiel présents dans une serre

Conditions intérieures	Systèmes (Variétés)
Température	<ul style="list-style-type: none"> · Chauffage (Source énergétique, Type d'échangeur de chaleur) · Refroidissement (Refroidisseur, Ventilation naturelle, Ventilation forcée) · Écran thermique · Écran d'ombrage
Humidité	<ul style="list-style-type: none"> · Humidification · Déshumidification (Ventilation naturelle, Ventilation forcée, Autres)
PAR	<ul style="list-style-type: none"> · Éclairage artificiel (Technologies : DEL, SHP, halogénure métallisé) · Écran d'ombrage
Concentration en CO₂	<ul style="list-style-type: none"> · Injection de CO₂ (Comprimé, Généré)
Légende : DEL : Diode électroluminescente ; SHP : Lampe à vapeur de sodium à haute pression	

Pour réguler la température, un système de chauffage permet de maintenir une température minimale souhaitée, tandis qu'un système de refroidissement (climatiseur, *fan & pad*) ou de ventilation d'air extérieur permet de gérer la température maximale. Dans les climats froids, un écran thermique permet de réduire les pertes thermiques vers l'extérieur de la serre. Dans les climats chauds, un écran d'ombrage permet de diminuer les gains solaires dans la serre, réduisant du même coup le PAR transmis.

Pour contrôler les manques et les excès d'humidité, des systèmes d'humidification et de déshumidification sont ajoutés. Pour la déshumidification, la ventilation est l'option la moins énergivore, mais elle implique l'apport d'air frais, ce qui requiert un conditionnement supplémentaire. Pour éviter le conditionnement de l'air neuf, différentes technologies de déshumidification sont disponibles (condensation sur une surface froide, adsorption par des matériaux hygroscopiques, etc.) (Amani et al., 2020).

Des systèmes d'éclairage artificiels peuvent être installés pour suppléer la quantité d'éclairage naturel reçue par les plantes. Diverses technologies d'éclairage sont disponibles, et leurs caractéristiques spécifiques peuvent influencer la consommation d'énergie et les besoins en chauffage. Par exemple, les diodes électroluminescentes (DEL) présentent une consommation électrique moindre pour produire la même quantité de PAR que les lampes à vapeur de sodium à haute pression (SHP), par conséquent, elles génèrent moins de chaleur.

Dans une serre, la régulation de l'enrichissement en CO₂ s'effectue par l'apport direct dans l'enceinte, à partir d'un réservoir de CO₂ comprimé ou d'un générateur au carburant.

1.1.3 Aperçu des serres modélisées avec le logiciel TRNSYS

Les caractéristiques présentées dans la section 1.1.2 démontrent la versatilité d'une serre et les possibilités de combinaisons de constructions, de systèmes passifs, de systèmes actifs, ainsi que de réglages des conditions internes. Pour donner un aperçu des serres qui ont fait l'objet d'études sur la modélisation énergétique, le Tableau 1.3 présente un résumé des caractéristiques de construction et d'opération. Le Tableau 1.3 résume aussi l'objectif pour lequel le modèle est créé. Les objectifs des études mettent en lumière que plusieurs modèles énergétiques permettent justement d'étudier l'influence des caractéristiques de construction d'une serre sur les conditions de l'environnement intérieur.

Pour ce qui est des caractéristiques de construction, les serres de petite taille (< 1000 m²), qui sont davantage représentées dans les modèles étudiés (10/16), sont construites dans une grande variété de formats. Les serres de grande taille (6/16) sont quant à elle généralement de type *Venlo* avec une enveloppe à paroi simple, peu importe leur localisation, considérant que les modèles étudiés proviennent de divers endroits dans le monde.

Pour ce qui est des caractéristiques d'opération des serres, les systèmes CVCA utilisés pour maintenir les conditions intérieures optimales dans une serre varient. Le chauffage est le système le plus modélisé (13/16). La ventilation naturelle ou forcée (10/16), l'écran thermique (8/16), le refroidissement (7/16) et l'éclairage artificiel (4/16) sont les autres systèmes les plus communs. L'ajout de système d'humidification (2/16) et de déshumidification (2/16) est peu fréquente. Des systèmes passifs sont aussi utilisés dans les serres comme l'isolation des murs ou du sol. En moyenne, les modèles étudiés comptent trois systèmes CVCA. Les serres passives n'en comptent aucun et les serres de plus haute technologie en compte cinq. La majorité des modèles de serre contiennent des cultures (9/16). Les types de culture retrouvés

dans les modèles développés avec TRNSYS sont parfois non définis (3/16), mais ils sont considérés dans les bilans thermiques et massiques.

Tableau 1.3 Caractéristiques des serres développées avec TRNSYS
Tiré de Beaulac et al. (2023, p. 4)

Référence	Objectif	Forme	Enveloppe	Superficie [m ²]	Systèmes actifs	Cultures
(Vadiee & Martin, 2013)	Évaluer la conservation énergétique dans une serre fermée en comparant diverses configurations de systèmes	Gable; Simple	Verre	2700	C, R, H, DH, L	N/D
(Ha et al., 2015)	Évaluer les besoins en chauffage dans différentes régions (Corée du sud) et intégrer un chauffage géothermique	Venlo ; Multiple	Verre	1000	C, VF	VIDE
(Ward et al., 2015)	Modéliser l'interaction air-cultures et une serre intégrée à un bâtiment	Intégrée au bâtiment	Verre	27	VF	Tomates
(Semple et al., 2017)	Évaluer le ratio de surplus énergétique d'une serre et tester différents types d'enveloppe	Venlo ; Multiple	PE double	4000	C, VF, S, H	N/D
(Rasheed et al., 2018)	Développer un modèle pour analyser les choix d'enveloppe, d'orientation et de type de serre	Ronde; Simple	PE double	184	C, R, VN	VIDE
(Rasheed et al., 2019)	Évaluer l'impact des écrans thermiques sur la consommation énergétique d'une serre	Arche; Simple	PE double	184	C, R, S, VN	VIDE
(Ahamed et al., 2020)	Développer un modèle TRNSYS avec les fonctionnalités existantes et évaluer sa performance	CSG ; Simple	Verre	210	C, R, S, DH, L	N/D
(Baglivo et al., 2020)	Évaluer l'impact de la discrétisation de l'air intérieur en plusieurs nœuds	Venlo; Simple	Verre	500	C, R, L	Fleurs
(Mohammadi et al., 2020)	Développer un modèle de serre solaire passive sur TRNSYS	CSG; Simple	PE	88	Serre passive	VIDE
(Rasheed et al., 2020)	Évaluer la performance d'un modèle TRNSYS pour modéliser une serre à portées multiples	Venlo; Multiple	PC	7572	C, R, S, VN	VIDE
(Choab et al., 2021)	Développer un modèle et tester les paramètres pour optimiser la conception des serres au Maroc	Gable; Simple	Verre	1000	C, R, L	Tomates
(Lee et al., 2021)	Modéliser une serre existante pour estimer les besoins énergétiques lorsque jumelé avec une centrale thermique	Venlo; Multiple	PO	768	C, S, VF	Mangues
(Adesanya et al., 2022)	Évaluer l'influence des approches de modélisation du rayonnement solaire	Venlo ; Multiple	Verre	4374	C, S, VN	VIDE
(Lalonde, 2022)	Développer un modèle détaillé de serre TRNSYS et analyser des mesures d'efficacité énergétique	Gothic; Simple	PE double	247	C, VN, VF	Laitues
(Ogunlowo et al., 2022)	Développer un modèle de serre avec discrétisation du volume avec TRNSYS	Gothic; Simple	PO	168	Serre passive	VIDE
(Yeo et al., 2022)	Développer un modèle de serre intégrée sur le toit d'un bâtiment	Arche ; Multiple	PO	600	C, VN	Tomates

Type CSG : Serre solaire passive de style chinoise **Enveloppe** PE : Polyéthylène; PC : Polycarbonate; PO : Polyoléfine **Systèmes actifs** C : Chauffage; R : Refroidissement; S : Écran thermique, H : Humidification, DH : Déshumidification, VN : Ventilation naturelle; VF : Ventilation forcée; L : Éclairage

Les caractéristiques des serres ont un impact sur les conditions intérieures et sur la consommation énergétique. Elles doivent donc être prises en compte lors du développement d'un modèle énergétique. Le développement d'un modèle énergétique pour la simulation thermique dynamique d'une serre fait l'objet de la section 1.2.

1.2 Simulation des performances énergétiques de serres

La simulation des performances énergétiques d'un bâtiment est une méthode éprouvée depuis plusieurs années pour évaluer et prédire les conditions intérieures et la consommation énergétique d'un bâtiment (IBPSA, 2023). Selon Cimmino & Bernier (2022), la simulation des performances énergétiques d'un bâtiment remplit plusieurs rôles:

- Comparer les alternatives de design;
- Démontrer la conformité à une norme ou une certification de performance;
- Prévoir la consommation énergétique future d'un bâtiment neuf ou rénové;
- Vérifier le bon fonctionnement des systèmes;
- Optimiser et corriger le fonctionnement des systèmes.

L'étude de la simulation des performances énergétiques de serres existe déjà depuis plusieurs années, mais il est encore aujourd'hui d'un grand intérêt (Guo et al., 2021; Katzin et al., 2022; Lalonde, 2022). Le processus de modélisation ne diffère pas de celui qui est utilisé pour les bâtiments, mais les éléments spécifiques de construction, d'opération et d'occupation des serres y sont intégrés. La section 1.2.1 présente un aperçu des techniques possibles de modélisation énergétique, alors que la section 1.2.2 décrit les transferts hygrothermiques interagissant dans une serre. Des approches de modélisation utilisées pour représenter chaque phénomène physique sont ensuite présentées. Finalement, la section 1.2.3 présente une revue de la composition des modèles énergétiques développés avec TRNSYS.

1.2.1 Simulation des performances énergétiques d'un bâtiment

Une simulation utilise des modèles pour reproduire le comportement d'un système étudié, ici, ce système est un bâtiment. Les modèles de simulation des performances énergétiques d'un bâtiment peuvent être classés en deux grandes catégories : les modèles «boîte noire» (également appelés descriptifs, empiriques, ou basés sur les données (*data-driven*)) et les modèles «boîte blanche» (également appelés «boîte grise», mécanistiques, explicatifs, ou basés sur les phénomènes physiques) (Coakley et al., 2014; Guo et al., 2021).

Un modèle « boîte noire » décrit un bâtiment à l'aide d'équations fondées sur des approches mathématiques ou statistiques (régression, réseaux neuronaux, apprentissage machine, etc.) reliant des données d'entrée, telles que les données d'opération et les conditions météorologiques, à des résultats mesurés. Ces modèles sont capables de prédire le comportement du système sans tenir compte des lois de la physique de l'environnement dans lequel il évolue (Coakley et al., 2014; Guo et al., 2021).

En revanche, un modèle « boîte blanche » vise à fournir une compréhension du système étudié par la mise en équation d'expressions mathématiques basées sur les phénomènes physiques. Ces modèles prennent en compte les paramètres physiques d'un bâtiment, les paramètres des systèmes et ceux de l'environnement. Cela permet d'évaluer l'impact des changements de ces paramètres et de fournir des informations allant au-delà des conditions météorologiques où les données utilisées pour leur développement sont obtenues. Dans cette catégorie, se trouvent les modèles de STD, calculant à des intervalles de temps discrets l'état thermique d'un système en utilisant des bilan thermiques et massiques (Coakley et al., 2014; Guo et al., 2021).

Certains modèles de STD de bâtiments sont développés à l'aide de logiciels tels que OpenModelica (*Dynamola*), Simulink (*Matlab*), EnergyPlus (Crawley et al., 2000) ou TRNSYS (Klein et al., 2017). Dans ces logiciels de STD des bâtiments, les modèles basés sur les phénomènes physiques sont construits à l'aide de composants préexistants. Ces logiciels simplifient la programmation comparativement au développement d'un nouveau code et de nouvelles fonctions devant toutes être créées par le développeur. Les avantages et inconvénients de chacun des logiciels de simulation énergétique des bâtiments sont discutés par Crawley et al. (2008).

Ces logiciels sont couramment utilisés pour simuler le comportement énergétique des bâtiments, néanmoins plusieurs études de modélisation énergétique des serres utilisent les logiciels suivants :

- *Dymola* /OpenModelica (Altes-Buch et al., 2022; Piché et al., 2020)
- EnergyPlus (Lebre et al., 2021; Ouazzani Chahidi et al., 2021)
- TRNSYS (Listé au Tableau 1.3)

Dans ce mémoire, le logiciel TRNSYS est l'outil de modélisation sélectionné. Bien qu'il n'ait pas l'avantage d'être libre d'usage comme OpenModelica et EnergyPlus, la flexibilité de TRNSYS offre plusieurs avantages :

- 1- Sa structure modulaire et sa vaste librairie de composants permet l'ajout simplifié de sous-modèles de systèmes CVCA et d'énergies renouvelables, ainsi que des séquences de contrôle réalistes;
- 2- L'intégration simplifiée de modèles détaillés pour plusieurs flux thermiques et massiques pertinents pour les serres (bâtiment multizone 3D, rayonnement, interaction avec le sol, infiltration/ventilation);
- 3- La possibilité d'ajouter, de modifier et/ou de partager des composants à la librairie;
- 4- Plusieurs modèles de serres ont été développés avec TRNSYS et les résultats sont encourageants pour la poursuite (Adesanya et al., 2022; Choab et al., 2021; Lee et al., 2021; Mohammadi et al., 2020; Yeo et al., 2022).

En effet, tel que le Tableau 1.3 l'indique, TRNSYS a été utilisé pour modéliser plusieurs variétés (format, enveloppe, superficie) de serres. Dans la plupart des modèles, les résultats rapportés semblent être concluants selon le processus de validation effectué (les processus de validation seront analysés à la section 1.3.3). Seulement Ahamed et al. (2020) évoquent que TRNSYS n'est pas adapté pour la modélisation énergétique de serres et que des ajouts complexes sont nécessaires pour modéliser les interactions spécifiques aux serres (évapotranspiration des plantes, écrans thermiques) afin d'obtenir des résultats représentant correctement la réalité. La modélisation de ces éléments ainsi que des éléments traditionnels de la modélisation énergétique de bâtiment sont présentés à la section suivante.

1.2.2 Bilans thermiques et massiques d'une serre

La modélisation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse interagissant dans un bâtiment est relativement complexe, car ces phénomènes physiques y sont nombreux. La méthode des bilans thermiques et massiques est l'approche la plus fondamentale pour calculer les conditions intérieures d'un bâtiment, un bilan thermique pour la température et des bilans massiques pour l'humidité et le CO₂.

La méthode des bilans thermiques (*Heat balance method*, HBM) est utilisée dans plusieurs logiciels de STD de bâtiments (Crawley et al., 2008). Cette méthode s'appuie sur le principe de conservation de l'énergie, en appliquant un bilan thermique à trois nœuds : surfaces externes, surfaces internes et l'air (ASHRAE, 2013). Ce bilan pose l'hypothèse que l'air intérieur de la serre est homogène, tel une cuve parfaitement brassée. Il y a donc un seul volume de contrôle de l'air. Cette hypothèse est discutée à l'ANNEXE I.

Les bilans énergétiques de la HBM et le bilan massique de la vapeur d'eau sont présentés à l'ANNEXE II. Le bilan du CO₂ ne fait pas partie de la portée de l'actuel projet de recherche puisque la concentration de CO₂ est normalement celle de l'extérieur dans une serre ventilée.

Les bilans thermiques sont réalisés en fonction des éléments traditionnels d'un bilan thermique de bâtiment : les gains ou pertes par le rayonnement solaire (Q_{Sol}), par les échanges de chaleur sensible et latente avec l'enveloppe (Q_{Cov} et L_{Cov}), par les échanges de chaleur sensible et latente avec le plancher (Q_{Flr} et L_{Flr}), par la conduction dans le sol (Q_{Grd}), par les charges internes provenant des équipements et des occupants (Q_{GInt}), par les systèmes CVCA (Q_{HVAC} et L_{HVAC}) et par les apports d'air neuf (ventilation (Q_{Vent}) et infiltration (Q_{Inf})). Dans une serre, à ces éléments s'ajoutent des gains internes tels que l'interaction avec les cultures (Q_{Plt} et L_{Plt}). Ces éléments des bilans thermiques sont présentés de manière simplifiée à la Figure 1.3 qui illustre les principaux flux énergétiques impliqués dans les interactions avec l'air de la serre. Cependant, elle ne couvre pas tous les échanges, notamment le rayonnement à grandes longueurs d'onde entre toutes les parois de l'enveloppe, qui n'est illustré que par $Q_{Cov-Cov}$.

Les sections suivantes soient 1.2.2.1 à 1.2.2.9 présentent les éléments des bilans thermiques et massiques ainsi que les approches de modélisation utilisées pour les décrire. Ces éléments peuvent être décrits par différentes équations, des plus simples aux plus complexes. Le niveau de complexité vient du nombre de paramètres requis. Cette revue ne prétend pas recenser toutes les approches de modélisation publiées dans la littérature, mais vise plutôt à donner un aperçu des approches qui seront abordées dans ce mémoire.

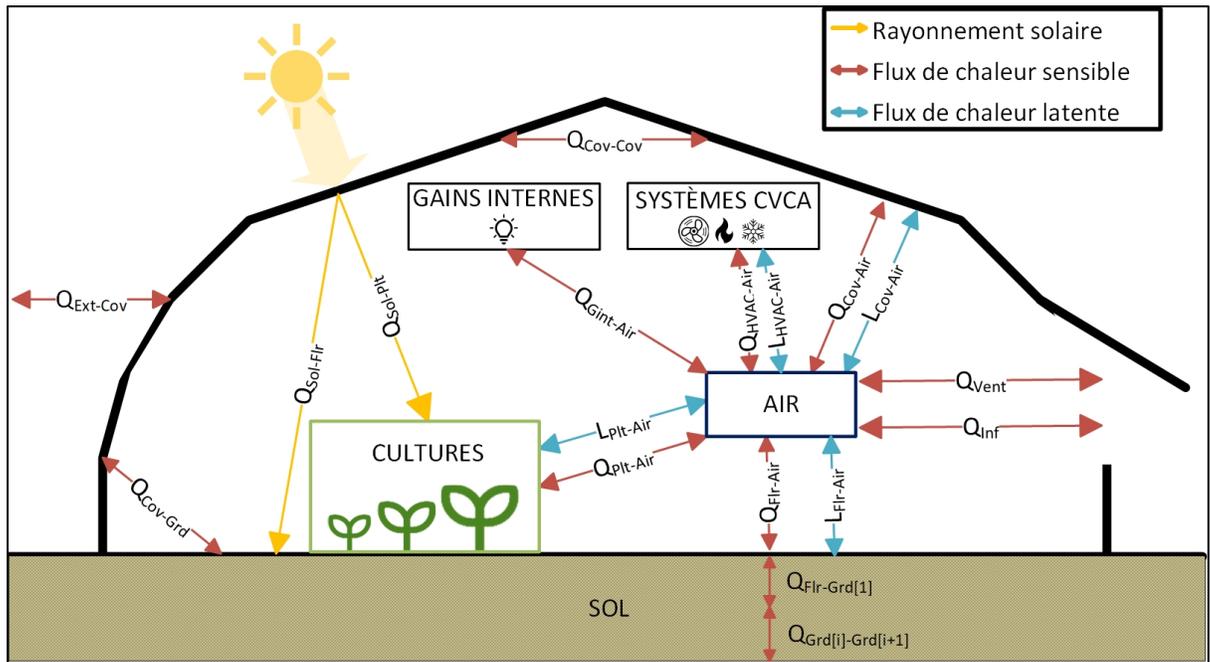


Figure 1.3 Schéma simplifié des flux thermiques dans une serre

1.2.2.1 Rayonnement solaire

L'apport de chaleur provenant du Soleil peut être décrit par l'équation (1.1).

$$Q_{Sol} = f_{Sol} \cdot I_{Sol} \cdot A_{Serre} \quad (1.1)$$

Où A_{Serre} représente la superficie de la serre, I_{Sol} , le rayonnement solaire horizontal global et f_{Sol} , la fraction du rayonnement global qui contribue à chauffer la serre.

Le rayonnement solaire horizontal global I_{Sol} est fourni en entrée du modèle. La fraction de rayonnement solaire entrant dans la serre est influencée par les propriétés radiométriques de l'enveloppe de la serre. Les propriétés radiométriques d'une paroi, soit la transmissivité, la réflectivité et l'absorptivité peuvent être considérées constantes ou varier selon l'angle d'incidence du Soleil avec cette paroi, ainsi que la longueur d'onde du rayonnement incident. L'angle d'incidence est déterminé selon la provenance du rayonnement, direct ou diffus. Les fractions de rayonnement global direct et diffus sont parfois estimées à partir du rayonnement global (Type 16 – TRNSYS), ou directement données en entrée au modèle (ex. : fichier EPW).

Pour ce qui est des fractions de rayonnement de chaque longueur d'onde soit le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), le rayonnement dans le proche infrarouge (NIR) ou le rayonnement ultraviolet (UV), ces fractions sont généralement constantes.

Le rayonnement solaire transmis dans la serre est ensuite distribué aux surfaces où il est absorbé, réfléchi ou transmis vers l'extérieur de la serre. Plusieurs façons de distribuer le rayonnement de courtes longueurs d'onde existent. Les logiciels de STD comme TRNSYS (Klein et al., 2017) proposent des modèles standards ou détaillés de distribution du rayonnement. Les approches de modélisation disponibles dans TRNSYS pour modéliser la transmission et la distribution du rayonnement solaire sont présentées à l'ANNEXE III.

1.2.2.2 Rayonnement de grandes longueurs d'onde

Le rayonnement de grandes longueurs d'onde entre deux objets, également appelé rayonnement thermique ou rayonnement infrarouge lointain (FIR), est modélisé selon la loi de Stefan-Boltzmann (Équation (1.2)):

$$Q_{FIR} = A_1 \cdot F \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.2)$$

Où A_1 est l'aire de la surface de l'objet 1; F , appelé facteur de vue, exprime la visibilité de deux objets l'un par rapport à l'autre; ε_1 et ε_2 , sont les émissivités des deux objets, qui sont une propriété du matériau des corps; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$ est la constante de Stefan-Boltzmann; T_1 et T_2 sont les températures des deux objets.

L'échange de rayonnement thermique entre les objets de la serre, tel que l'enveloppe, la culture et le sol, est modélisé de cette manière. Les principaux échanges de rayonnement thermique sont avec le ciel. La température effective du ciel est généralement utilisée lors du calcul des pertes radiatives des bâtiments (Bergman, 2011). La température du ciel peut être donnée en entrée, ou calculée en fonction de la température de l'air extérieur, de l'humidité et de la couverture nuageuse (Algarni & Nutter, 2015).

1.2.2.3 Éclairage artificiel

Dans les cas où l'éclairage artificiel est présent, l'énergie thermique produite par les lampes (Q_{Lamp}) est fonction de l'énergie électrique fournie aux lampes (I_{Lamp}). Q_{Lamp} peut être un gain interne global vers l'air de la serre ou être divisé entre les modes de transfert d'énergie thermique : le rayonnement de courtes longueurs d'onde (PAR, rayonnement dans l'infrarouge proche (NIR)), le rayonnement de grandes longueurs d'onde (infrarouge lointain - FIR) et la conduction avec les surfaces de la serre, ainsi que la convection avec l'air intérieure de la serre (Katzin et al., 2020). Les paramètres de ces échanges thermiques dépendent du type de technologies d'éclairage installé (SHP, DEL, etc.).

1.2.2.4 Transfert thermique par convection

La convection entre deux corps est généralement calculée selon la loi de Fourier (Équation (1.3)) :

$$Q_{conv} = h \cdot A_{conv} \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.3)$$

Où h est le coefficient d'échange convectif, A_{conv} est l'air de la surface d'échange entre les deux corps, T_1 et T_2 (°C) sont les températures des deux corps.

Le coefficient d'échange thermique h est parfois décrit par une fonction non linéaire de la différence de températures ou peut dépendre d'autres facteurs tels que la vitesse du vent. Une approche plus simple suppose un h constant. Dans les cas simples, T_1 représente la température de l'air de la serre, et T_2 est la température de l'air extérieur. Une approche plus complexe considère explicitement les échanges de chaleur se produisant sur la surface extérieure de la serre. Dans ce cas, T_1 représente la température de l'enveloppe de la serre, ce qui nécessiterait de modéliser cet objet. La convection entre les autres objets de la serre (écrans, lampes, culture, tuyaux de chauffage, etc.) est modélisée de la même manière. Des recensements des équations empiriques des coefficients de convection aux parois externes et internes disponibles dans la littérature sont présentés dans l'article de Roy et al. (2002).

1.2.2.5 Infiltration

L'infiltration est une des pertes thermiques principales d'un bâtiment, il en est de même pour les serres (Sanford, 2011). L'énergie perdue par l'infiltration est typiquement représentée par les changements d'air entre deux nœuds (Équation (1.4)):

$$Q_{Inf} = \dot{V} C_v (T_1 - T_2) \quad (1.4)$$

Où T_1 et T_2 sont les températures des deux corps, C_v est la capacité thermique volumétrique de l'air, et \dot{V} est le débit d'air d'infiltration.

Dans les cas les plus simples, Q_{Inf} est négligé ou supposé constant. Un nombre de changements du volume d'air à l'heure (CAH) dans la serre est posé constant. Dans les autres cas, des approches de modélisation utilisent des fonctions empiriques liées aux conditions de l'environnement intérieur et extérieur. Certaines approches de modélisation comme COMIS (*Conjunction of Multizone Infiltration Specialists*) (Feustel, 1999) calculent le débit d'infiltration en fonction, entre autres, de la vitesse du vent extérieur, des différences de température entre l'air intérieur et l'air extérieur ainsi que du nombre, de la géométrie et de l'emplacement (toit, mur latéral) des ouvertures.

L'équation (1.5) décrit le calcul du débit massique de vapeur d'eau échangée entre l'air intérieur et l'air extérieur par infiltration. Ce débit fait partie de bilan massique de la vapeur d'eau dans la serre, mais n'affecte pas le bilan thermique de l'air intérieur.

$$\dot{m}_{Inf} = \dot{V}_{Inf} (\chi_1 - \chi_2) \quad (1.5)$$

Où \dot{V}_{Inf} représente aussi le débit d'air d'infiltration et χ_1 et χ_2 sont, respectivement, les concentrations de vapeur d'eau à l'intérieur et à l'extérieur de la serre.

1.2.2.6 Ventilation

L'énergie perdue par la ventilation Q_{Vent} est représentée par les changements d'air entre deux nœuds (Équation (1.6)).

$$Q_{Vent} = \dot{V}_{Vent} C_v (T_1 - T_2) \quad (1.6)$$

Où T_1 et T_2 sont les températures des deux corps, C_v est la capacité thermique volumétrique de l'air, et \dot{V}_{Vent} est le débit d'air de ventilation.

Dans les cas les plus simples, \dot{V}_{Vent} est donné en entrée ou selon un horaire (Van Henten, 2003). Dans d'autres cas, \dot{V}_{Vent} est calculé avec des approches de modélisation plus complexes prenant en compte des facteurs tels que l'ouverture des fenêtres, la vitesse du vent extérieur, les différences de température entre l'air intérieur et l'air extérieur, ainsi que le nombre, la géométrie et l'emplacement (toit, mur latéral) des ouvertures. La ventilation naturelle dans les serres a fait l'objet de plusieurs études (Boulard et al., 1997; Kuroyanagi, 2017; Li et al., 2020). Des analyses plus détaillées utilisent la dynamique des fluides numériques (CFD) pour étudier les mouvements de l'air autour et à l'intérieur de la serre (Kuroyanagi, 2017; Li et al., 2020; Liang et al., 2023; Yeo et al., 2022). La CFD demande beaucoup de puissance informatique de calcul pour modéliser sur une longue durée.

Le débit de perte de vapeur d'eau vers l'extérieur \dot{m}_{Vent} se calcule de la même façon que les pertes de vapeur d'eau par infiltration:

$$\dot{m}_{Vent} = \dot{V}_{Vent} (\chi_1 - \chi_2) \quad (1.7)$$

1.2.2.7 Interaction avec le sol

Le sol est la principale surface opaque d'une serre, il absorbe donc la majorité de l'énergie solaire transmise. Cette énergie est par la suite transférée vers l'air de la serre par convection et rayonnement de grandes longueurs d'onde ou stockée dans le sol. Le sol agit comme masse de stockage thermique (Fox et al., 2019; Nawalany et al., 2014). Il se charge durant la journée quand le Soleil est présent et se décharge à son coucher. Le sol génère aussi un effet de stockage saisonnier. La Figure 1.4 présente le décalage entre la température du sol et la température de l'air durant l'année. La température du sol se réchauffe pendant l'été, et lorsque que la température moyenne de la serre chute en septembre, le sol permet de réchauffer la serre. Pour

tenir compte de ce phénomène, le sol est souvent discrétisé en plusieurs couches en une dimension de différentes épaisseurs selon les modèles de Zwart (1996), de Vanthoor et al. (2011) et de Zhang et al. (2020). L'équation (1.8) représente le bilan de chaque couche.

$$\rho_{\text{grad}} C_{p,\text{grad}} V_{\text{grad}} \frac{dT_{\text{grad},i}}{dt} = Q_{\text{cond},i-1} - Q_{\text{cond},i} \text{ où } i = 1,2 \dots n \text{ et } Q_{\text{cond},0} = Q_{\text{cond},\text{grad}} \quad (1.8)$$

Où n est le nombre de couches de sol modélisées, $T_{\text{grad},i}$ est la température d'une couche de sol ($^{\circ}\text{C}$), $\rho_{\text{grad}} C_{p,\text{grad}} V_{\text{grad}}$ est la capacité thermique des masses de la couche de sol, $Q_{\text{cond},i-1}$ est le flux de chaleur conductif entre la couche i et $i-1$ et $Q_{\text{cond},i}$ est le flux de chaleur conductif entre la couche i et $i+1$.

La condition frontière de la dernière couche est une température stable. En effet, à partir d'une profondeur précise, la température du sol est stable, puisqu'elle n'est pas perturbée par les échanges en surface. La discrétisation en une dimension signifie que les échanges avec le sol en périphérie de la serre ainsi que la surface extérieure adjacente à la serre sont négligés.

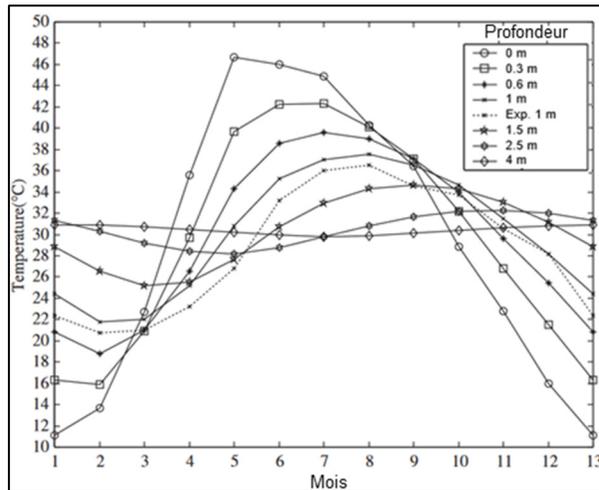


Figure 1.4 Profil annuel des températures du sol au centre d'une serre en Inde selon la profondeur
Adaptée de Ghosal et al. (2004, p. 54)

Les propriétés thermiques et physiques du sol (k , ρ et C_p) sont considérées stables dans les différentes couches du sol. Elles varient selon le type de sol comme le présente le Tableau 1.4, tiré de Dalla Santa et al. (2020). L'humidité du sol n'est pas variable dans la plupart des modèles, bien que l'eau augmente le coefficient de transfert de chaleur du sol (Nawalany & Sokołowski, 2021).

Tableau 1.4 Propriétés physicochimiques de types de sol

Type de sol	Conductivité thermique (k) [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Capacité thermique massique (C _p) [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Masse volumique (ρ) [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

1.2.2.8 Interaction avec les cultures

Les cultures sont les principaux occupants de la serre. Elles interagissent avec l'environnement par transferts de chaleur sensible, ainsi que latente, par transpiration. Les approches de modélisation de la transpiration des cultures sont revues en détail par Katsoulas & Stanghellini (2019). Cette section présente un aperçu de leur étude. Les approches vont d'une fonction ajustée empiriquement où la transpiration ne dépend que du rayonnement solaire, jusqu'à des modèles détaillés qui incluent le bilan énergétique de la culture et la réponse des stomates aux attributs environnementaux, y compris la température de l'air, le DPV, le rayonnement total intercepté par la culture et la concentration de CO₂. Les constantes et les fonctions empiriques ont l'inconvénient d'avoir été développées et validées pour une gamme de conditions spécifiques.

Pour ce qui est des modèles dynamiques, il existe une grande variété de modèles des interactions hygrothermiques des plantes avec leur environnement (Graamans et al., 2017;

Ward et al., 2015). L'équation (1.9) représente le bilan thermique d'une plante avec son environnement.

$$Q_{SW,Plt} + Q_{LW,Plt} + Q_{conv,Plt} - L_{Plt} - Q_{st} - Q_{morph} = 0 \quad (1.9)$$

Où $Q_{SW,Plt}$ est le rayonnement de courtes longueurs d'onde absorbé, $Q_{LW,Plt}$ est le rayonnement de grandes longueurs d'onde net absorbé, $Q_{conv,Plt}$ est le flux échangé par convection, L_{Plt} est le flux de chaleur latente vers l'air, Q_{st} est le flux stocké dans les feuilles, tiges et fruits et Q_{morph} est le flux utilisé pour la photosynthèse.

Dans la plupart des modèles dynamiques des interactions des plantes, Q_{st} et Q_{morph} sont négligées (Graamans et al., 2017; Monteith & Unsworth, 2013; Ward et al., 2015). De cette réduction est obtenu le modèle « *big-leaf* » (Monteith, 1965) présenté par l'équation (1.10).

$$Q_{Rnet} + Q_{conv,Plt} - L_{Plt} = 0 \quad (1.10)$$

Le rayonnement net (Q_{Rnet}) est la quantité totale de rayonnement absorbé par la plante. L'absorption d'énergie correspond à la somme l'énergie absorbée due au rayonnement de courtes longueurs d'onde ($Q_{SW,Plt}$) et le flux de rayonnement de grandes longueurs d'onde ($Q_{LW,Plt}$) pouvant être entrant (+) ou sortant (-) (Équation (1.11)). Dans la littérature scientifique, le rayonnement de grande longueur d'onde peut être négligé (Graamans et al., 2017) ou inclus (Ward et al., 2015; Wei et al., 2021). Le rayonnement de courtes longueurs ($Q_{SW,Plt}$) d'onde provient du Soleil et/ou de l'éclairage artificiel (Équation (1.12)).

$$Q_{Rnet} = Q_{SW,Plt} + Q_{LW,Plt} \quad (1.11)$$

$$Q_{SW,Plt} = Q_{Sol,Plt} + Q_{Lamp,Plt} \quad (1.12)$$

L'échange de chaleur par convection $Q_{conv,Plt}$ dépend d'un coefficient de convection $h_{conv,Plt}$, de l'aire de la surface des feuilles des plantes de la serre A_{Plt} et de la différence de température entre la température des feuilles T_{Plt} et la température de l'air intérieur T_i (Équation (1.13)). Le coefficient de convection est généralement en fonction de l'indice foliaire (traduction de *Leaf Area Index*, LAI) et de la résistance à la convection des feuilles, nommé la résistance

aérodynamique r_a . Cette résistance peut être posée constante (Graamans et al., 2017), obtenue d'équations empiriques ou calculée à partir du nombre de Nusselt (Monteith & Unsworth, 2013). Le LAI est le rapport entre la surface totale de toutes les feuilles dans une serre et la surface cultivée de la serre.

$$Q_{conv,Plt} = h_{conv,Plt} \cdot A_{Plt} \cdot (T_{Plt} - T_i) \quad (1.13)$$

L'évapotranspiration est un phénomène par lequel les stomates de la feuille transpirent et de l'eau s'en évapore. L'évaporation de l'eau transfère de l'énergie sensible vers de l'énergie latente, ce qui refroidit la plante. L'échange de chaleur latente présenté par l'équation (1.14) dépend d'un coefficient d'évapotranspiration $h_{Latent,Plt}$, de l'aire de la surface des feuilles des plantes de la serre A_{Plt} et de la différence de concentration en vapeur d'eau entre l'air près de la surface χ_{Plt} et l'air intérieur de la serre χ_i (Penman, 1948). Le coefficient d'évapotranspiration inclut deux résistances : la résistance aérodynamique r_a , présentée au paragraphe précédent, et la résistance stomatale r_s . La résistance stomatale est complexe à modéliser (Katsoulas & Stanghellini, 2019). Cette résistance peut aussi être posée constante, obtenue d'équations empiriques en fonction de quelques facteurs environnementaux (PPFD, irradiance, DPV) (Graamans et al., 2017) ou calculée par un modèle détaillé (Jarvis et al., 1976).

$$L_{Plt} = h_{Latent,Plt} \cdot A_{Plt} \cdot (\chi_{Plt} - \chi_i) \quad (1.14)$$

La modélisation des plantes permet d'étudier l'échange d'énergie avec l'environnement intérieur, mais aussi d'étudier la croissance des plantes et du même coup le rendement agricole ou horticole. Lorsque le LAI est inclus dans le calcul de la transpiration, une estimation, une hypothèse ou un modèle décrivant le LAI doit également être inclus (Monteith & Unsworth, 2013). La taille des feuilles des plantes vient nécessairement influencer la quantité d'énergie échangée. Selon la variété cultivée et les besoins en productivité, la méthode de semis et de récolte peut varier. Parfois, les semis sont transplantés en même temps, suivent une croissance semblable, et les plants à maturité sont récoltés complètement. Dans d'autres cas, les plants sont gardés à un nombre de feuilles stable et seulement les fruits sont récoltés.

1.2.2.9 Condensation

La condensation se produit lorsque l'air humide est en contact avec une surface plus froide que le point de rosée de l'air. En d'autres mots, la pression de vapeur saturée à la température de la surface est plus élevée que la pression de vapeur de l'air. La condensation se produit généralement sur la surface intérieure de la couverture de la serre, mais elle peut également se produire sur la culture elle-même ou au sol. L'équation (1.15) décrit le débit de condensation (\dot{m}_{Cdsn}).

$$\dot{m}_{Cdsn} = g \cdot A_{Cdsn} \cdot (\chi_{Air} - \chi_{Surface}) \quad (1.15)$$

Où χ_{Air} est la concentration de vapeur de l'air, $\chi_{Surface}$ est la concentration de vapeur saturée à la température de la surface, A_{Cdsn} est l'aire de la surface où il y a condensation et g est un coefficient de transfert de masse (en $m \cdot s^{-1}$). Ce coefficient g peut être lié au coefficient d'échange thermique h (Lavigneur, 2022).

L'échange de chaleur latente L_{Cdsn} est défini par l'équation (1.16).

$$L_{Cdsn} = \lambda \dot{m}_{Cdsn} \quad (1.16)$$

Où λ est la chaleur latente d'évaporation de l'eau.

1.2.3 Éléments inclus et leurs approches de modélisation dans les études récentes

Le Tableau 1.5 résume les éléments présentés dans la section 1.2.2. Selon le niveau de détails recherché, un modèle peut inclure ou exclure certaines interactions physiques. Pour chacune de ces interactions, plusieurs approches de modélisation peuvent être utilisées. Le Tableau 1.6 présente les éléments qui composent les modèles développés avec TRNSYS étudiés.

Tableau 1.5 Éléments d'un modèle de serres
Tiré de Beaulac et al. (2023, p. 3)

Éléments	Description	
Bilan énergétique	Gains solaires	Approche utilisée pour modéliser l'interaction du rayonnement solaire avec les surfaces de la serre
	Éclairage artificiel	Type de lampes (DEL, SHP), Variable de contrôle (Horaire, Rayonnement solaire), Gain interne divisé en rayonnement et convection (Divisé, Combiné)
	Rayonnement thermique	Nombre d'objets considérés dans les échanges de rayonnement thermique
	Convection/Conduction	Nombre d'objets considérés dans les échanges convectifs et conductifs
	Sol	Composant pour modéliser le sol (Condition frontière constante (Type 56), Condition frontière variable (Type 77), Discrétisation du sol (Type 49 et 1244))
	Infiltration /Ventilation	Approche utilisée pour modéliser les débits d'infiltration et de ventilation : Intrans au modèle (CAH), fonction de variables (T_i , T_e , v), TRNFLOW ou dynamique des fluides numériques (CFD)
Bilan massique Vapeur d'eau	Transpiration	Approche utilisée pour modéliser l'évapotranspiration des cultures (Constant, Modèle fonction des variables énumérées, FAO Penman-Monteith)
	Évaporation / Condensation	Présence d'un modèle pour l'évaporation /condensation sur les parois de la serre
Bilan massique CO ₂	Bilan CO ₂	Présence d'un bilan massique du dioxyde de carbone dans la serre
Modèle de cultures	Rendement / Photosynthèse	Présence d'un bilan sur le rendement ou le taux de photosynthèse pour les cultures de la serre
	Indice foliaire (LAI)	Approche utilisée pour modéliser la taille des cultures dans la serre

Tous les modèles utilisent la représentation 3D d'un bâtiment multizone (Type 56). La majorité des modèles pose l'hypothèse de la « cuve parfaite », donc possède une seule zone interne. Baglivo et al. (2020), Ha et al. (2015) et Ogunlowo et al. (2022) divisent l'air de la serre en plusieurs zones. La division de l'air de la serre est discutée dans l'ANNEXE I. Dans tous les cas, les gains solaires sont modélisés par TRNSYS avec le Type 16. Le rayonnement solaire interne est en fonction des données d'entrée du fichier météo ainsi que l'angle d'incidence du rayonnement direct et diffus sur les parois, tel que décrit dans l'ANNEXE III. L'éclairage artificiel est souvent modélisé par l'ajout d'un gain interne qui combine les transferts de chaleur par rayonnement thermique et par convection. Baglivo et al. (2020) modélisent le positionnement des lampes avec l'option de TRNSYS *3D GeoPosition*, ce qui permet d'inclure les facteurs de vue dans le calcul du flux de rayonnement thermique.

Tableau 1.6 Éléments inclus dans les modèles développés avec TRNSYS et leurs approches de modélisation

Tiré de Beaulac et al. (2023, p. 5)

Référence	Gains solaires	Éclairage artificiel	Rayonnement thermique ¹	Convection/Conduction ¹	Sol (Type)	Infiltration/Ventilation	Transpiration	Évaporation/Condensation	Bilan CO ₂	Rendement/Photosynthèse	LAI
(Vadiee & Martin, 2013)	α	N/D, Rad. Combiné	4	3	56	Ti; Te; v	O	✓	✗	✗	✗
(Ha et al., 2015)	α	✗	4	3	56	CAH	✗	✗	✗	✗	✗
(Ward et al., 2015)	α	✗	3	2	s/o	CAH	Ti; H; Rad; CO ₂	✗	✓	✓	O
(Semple et al., 2017)	α	✗	6	5	56	CAH	O	✗	✗	✗	✗
(Rasheed et al., 2018)	α	✗	3	2	49	TRNFLOW	✗	✗	✗	✗	✗
(Rasheed et al., 2019)	α	✗	4	3	49	TRNFLOW	✗	✗	✗	✗	✗
(Ahamed et al., 2020)	α	N/D, Horaire Combiné	5	4	56	CAH	O	✗	✗	✗	✗
(Baglivo et al., 2020)	α	SHP, Horaire Divisé	5	4	56	TRNFLOW	FAO Penman-Monteith	✗	✗	✗	O
(Mohammadi et al., 2020)	α	✗	3	2	56	CAH	✗	✗	✗	✗	✗
(Rasheed et al., 2020)	α	✗	4	3	49	TRNFLOW	✗	✗	✗	✗	✗
(Choab et al., 2021)	α	N/D, Horaire Combiné	5	4	77	CAH	FAO Penman-Monteith	✗	✗	✗	O
(Lee et al., 2021)	α	✗	5	4	56	CAH	Ti; Te; H; Rad; v	✗	✗	✗	O
(Adesanya et al., 2022)	α	✗	4	3	56	TRNFLOW	✗	✗	✗	✗	✗
(Lalonde, 2022)	α	✗	4	3	12 44	TRNFLOW	Ti; H; Rad; CO ₂	✗	✗	✗	O
(Ogunlowo et al., 2022)	α	✗	3	2	56	CAH	✗	✗	✗	✗	✗
(Yeo et al., 2022)	α	✗	4	3	s/o	CFD	Ti; H; Rad ; Croissance	✗	✗	✗	O
Note 1 : nombre d'objets inclus dans le bilan thermique											
Légende : α : Proportionnel aux données d'entrée ; ✓ : Inclus ; ✗ : Exclus ; O : constant Variables : Ti : Température intérieure ; Te : Température extérieure ; H : Humidité relative intérieure ; Rad : Rayonnement solaire ; v : Vitesse du vent ; CAH : Changement d'air à l'heure											

Le nombre d'objets inclus dans les échanges de rayonnement de grandes longueurs d'onde varie entre 2 et 6, puis entre 1 et 5 pour la convection/conduction. Pour la conduction dans le sol, la majorité des modèles (10/16) posent une condition frontière constante ou variable à l'extérieur de la paroi *Plancher* (Type 56 ou 77). Dans ces cas, le plancher peut avoir plusieurs couches de différentes épaisseurs/compositions, mais il est modélisé comme un modèle « boîte-noire » par la méthode des fonctions de transfert de conduction (TFM). L'approche

alternative est la discrétisation du sol avec un maillage 3D et une résolution des transferts thermiques par la méthode des volumes finis (Type 49 ou 1244). Aucune étude ne compare ces différentes approches de modélisation.

Pour déterminer les débits d'air d'infiltration et de ventilation, certains modèles posent un taux de changement d'air à l'heure constant (CAH) (8/16) ou calculé en fonction de variables climatiques (1/16). Une autre approche est l'utilisation de TRNFLOW (6/16), un outil de modélisation de l'écoulement de l'air à travers les ouvertures du bâtiment. Seuls Yeo et al. (2022) calculent le débit de ventilation avec un modèle dynamique des fluides numériques (CFD).

La chaleur latente est considérée dans le bilan d'énergie dans plus de la moitié des études (9/16), et lorsqu'elle est incluse, la transpiration des cultures est modélisée. La méthode la plus simple est de poser l'hypothèse d'un gain de vapeur d'eau constant durant la journée (3/16). Le débit de vapeur d'eau provenant de la transpiration peut aussi changer selon l'étape estimée de croissance des cultures (Semple et al., 2017) ou être déterminée en fonction des conditions intérieures de la serre (6/16). Deux modèles utilisent la méthode de Penman-Monteith recommandée pour les cultures en champs. Dans les six modèles où la transpiration des cultures est détaillée, le LAI est requis. Pour les six cas rapportés, le LAI est constant. Ceci indique que les cultures sont déjà toutes à maturité pour les cultures à fruits ou que les cultures sont à des stades différents de croissance pour les légumes-feuilles. L'évaporation provenant du sol est considérée seulement par Vadiée & Martin (2013), selon l'hypothèse que le phénomène d'évaporation est constant et proportionnel au débit d'eau utilisé pour l'irrigation. Le bilan de CO₂ et le rendement sont pris en compte seulement dans le modèle de Ward et al. (2015) : ils sont établis en fonction de la photosynthèse et selon les conditions de l'environnement intérieur de la serre. Toutefois, ces deux variables ne sont pas comparées avec des données mesurées.

Pour chacun des éléments présentés, un choix doit être fait d'utiliser une approche de modélisation plus simplifiée ou détaillée. En général, un modèle détaillé représente mieux la

réalité et permet de mieux expliquer le phénomène (Katzin et al., 2022), mais la démonstration n'est pas toujours validée. Peu d'articles comparant les différentes techniques de modélisation avec TRNSYS sont publiés et peu d'arguments quantitatifs appuient les choix de modélisation. Les approches de modélisation détaillées préexistantes dans TRNSYS sont fréquemment utilisées dans la littérature. Les approches de modélisation considérées détaillées sont les modèles détaillés de distribution du rayonnement solaire et thermique, les *Type 49* et *1244* pour modéliser les échanges conductifs dans le sol et le modèle *TRNFLOW* pour l'infiltration et la ventilation. On note aussi plusieurs ajouts, surtout pour des modèles dépendants des conditions internes, développés par les utilisateurs, ils visent surtout à modéliser l'évapotranspiration, la condensation et le rendement agricole. Face à toutes ces possibilités, il est important de souligner le manque de consensus sur les approches de modélisation à utiliser pour modéliser une serre avec TRNSYS. D'ailleurs, aucun modèle n'intègre une approche de modélisation détaillée pour chacun des éléments du bilan thermique d'une serre.

Les modèles développés avec TRNSYS possèdent un grand nombre de paramètres et de fonctionnalités. Les études présentent parfois de façon abrégée leur modèle ou même parfois seulement avec une photo du schéma-bloc dans TRNSYS, ce qui donne peu d'information sur tous les choix de développement de modèles. Ces modèles n'étant pas partagés, il y a un enjeu de reproductibilité qui requiert le développement de nouveaux modèles pour les nouveaux utilisateurs.

1.3 Calibration et validation des modèles énergétiques de serres

Cette section présente les processus de calibration et de validation des modèles énergétiques de serre. Ces deux processus reposent sur les données expérimentales. Les principes d'acquisition et d'utilisation des données expérimentales sont présentés à la section 1.3.1. Le processus de calibration est présenté à la section 1.3.2 et le processus de validation à la section 1.3.3. Chaque sous-section présente d'abord les éléments fondamentaux de chaque processus, puis elles arborent les méthodologies utilisées dans les études récentes.

1.3.1 Données expérimentales d'une serre

1.3.1.1 Acquisition des données

Les données expérimentales constituent les piliers essentiels sur lesquels repose le développement de modèles. Elles représentent la réalité mesurée d'un système concret, et par conséquent, leur fidélité à cette réalité est déterminante. Pour obtenir des données expérimentales, une serre est instrumentée. Pour ce faire, la calibration des instruments, la qualité des données, la durée et l'intervalle de l'acquisition des données sont des aspects cruciaux à considérer pour la validation des modèles énergétiques des serres. La précision d'un modèle ne peut pas dépasser l'incertitude des mesures (Bontsema et al., 2011). Les conditions intérieures, présentées à la section 1.1.1, peuvent toutes servir de quantités d'intérêt (QDI) expérimentales. À celles-ci peuvent s'ajouter certains flux énergétiques, ainsi que la consommation énergétique des systèmes actifs de la serre, principalement le chauffage.

L'acquisition de données peut être réalisée dans deux contextes d'exploitation de la serre. Parfois, les données proviennent d'une serre expérimentale où les séquences d'opération sont spécifiquement prévues pour la validation d'un modèle énergétique. Dans d'autres cas, les données proviennent d'une serre en opération (commerciale) où les opérateurs sur site opèrent les systèmes actifs selon leurs besoins. Comme pour la calibration, la validation sur une grande période de temps, préférablement sur une année, permet de mieux couvrir toutes les conditions climatiques externes et les conditions d'opération de la serre (Mai, 2023; Sansregret & Lavigne, 2015).

1.3.1.2 Comparaisons des données

Ces données mesurées dans une serre sont comparées aux résultats simulés par un modèle énergétique pour en juger les performances. En complément de l'analyse qualitative des évolutions temporelles des QDI à l'aide de graphiques, la comparaison s'opère en recourant à des indicateurs statistiques. Les indicateurs statistiques ont pour but d'évaluer quantitativement l'écart entre la valeur prédite et la valeur observée. Les principaux indicateurs statistiques

retrouvés dans les études consultées sont répertoriés dans le Tableau 1.7. Les formules mathématiques de ces indicateurs statistiques s'appliquent pour chaque pas de temps i pour une durée de n pas de temps. La variable \hat{y}_i représente les QDI expérimentales, la variable y_i représente les QDI prédites par le modèle et la variable \bar{y} est la moyenne des QDI expérimentales \hat{y}_i .

Tableau 1.7 Formules mathématiques des indicateurs statistiques

Indicateur statistique	Abréviation	Formule	
Erreur Moyenne de biais (<i>Mean bias error</i>)	MBE	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n}$	(1.17)
Erreur maximum	maxE	$\max (\hat{y}_i - y_i)$	(1.18)
Erreur Moyenne absolue (<i>Mean Absolute Error</i>)	MAE	$\frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i - y_i }{n}$	(1.19)
Erreur relative moyenne (<i>Mean relative error</i>)	MRE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{y}_i - y_i}{\bar{y}}$	(1.20)
MBE normalisée (<i>Normalized MBE</i>)	NMBE	$\frac{1}{\bar{y}} \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n}$	(1.21)
Erreur carrée moyenne (<i>Mean squared error</i>)	MSE	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}$	(1.22)
Erreur quadratique moyenne (<i>Mean quadratic error</i>)	MQE	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}$	(1.22)
Erreur quadratique moyenne (<i>Root mean squared error</i>)	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$	(1.23)
Coefficient de variation de la RMSE RMSE relative	CV-RMSE rRMSE	$\frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$	(1.24)
Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe Coefficient de détermination	NSE R ²	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}$	(1.25)

1.3.2 Processus de calibration

Un modèle développé à partir de mises en équation des phénomènes physiques contient plusieurs paramètres. Plus le modèle contient des sous-modèles détaillés, plus le nombre de paramètres augmente. Une étape importante du développement d'un modèle est la définition des valeurs des paramètres du modèle (Coakley et al., 2014). Les valeurs de ces paramètres peuvent provenir de trois sources différentes soit la littérature scientifique, des mesures sur site et/ou des documents de construction. Les valeurs des paramètres sont parfois incertaines

puisqu'elles n'ont pas été mesurées directement sur le site. Même les valeurs issues des fiches techniques des fournisseurs peuvent se dégrader de leurs caractéristiques d'origine.

En STD, la calibration est généralement la méthode appliquée pour définir les valeurs des paramètres incertains. La calibration permet d'ajuster les valeurs des différentes entrées du modèle de manière que les conditions internes observées correspondent étroitement à celles simulées (Figure 1.5). Cette approche accroît la confiance dans les valeurs des paramètres, et du même coup, la confiance globale des résultats de simulation (Reddy, 2006).

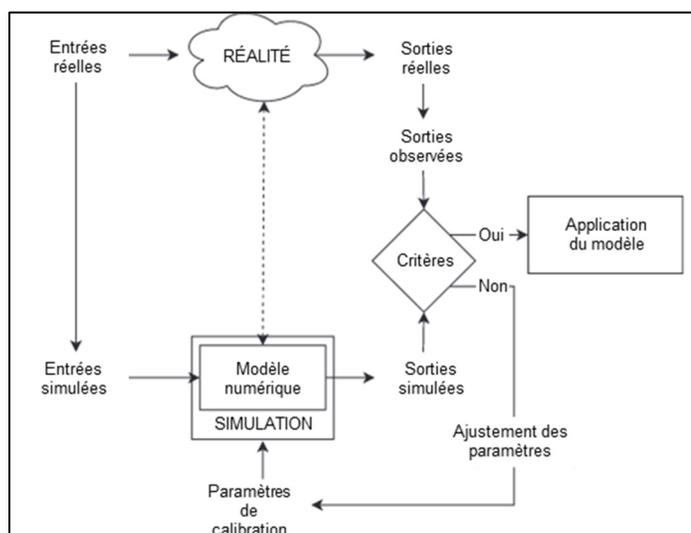


Figure 1.5 Processus de calibration d'un modèle de STD
Adaptée de Chong et al. (2021, p. 111542)

Le processus de calibration d'un modèle énergétique de bâtiment ne peut être résumé dans une procédure stricte. Le succès de la procédure de calibration réside dans l'utilisation d'outils appropriés pour extraire le maximum d'informations des données disponibles (Sansregret & Lavigne, 2015). Quatre éléments clés du processus de calibration sont présentés dans les sections 1.3.2.1 à 1.3.2.3, ainsi que 1.3.3.1:

1. Identification des paramètres à calibrer, des données d'entrée et de sortie (Section 1.3.2.1);
2. Sélection de la période de calibration (Section 1.3.2.2);
3. Sélection de la méthode d'ajustement des paramètres (Section 1.3.2.3);
4. Choix des critères d'évaluation de la calibration (1.3.3.1).

1.3.2.1 Analyse de sensibilité

Les paramètres incertains devant être calibrés doivent être sélectionnés selon leur influence sur les données de sortie afin de cerner leur priorité d'analyse et d'en réduire la durée. Pour ce faire, plus de 65% des calibrations automatisées utilisent une analyse de sensibilité (SA) (Chong et al., 2021). Plus le modèle contient des sous-modèles détaillés, plus le nombre de paramètres est grand. La SA quantifie l'influence d'un paramètre sur les données de sortie d'un modèle. Pour chaque paramètre du modèle, une distribution de valeur possible est définie (Chong et al., 2021).

Le Tableau 1.8 présente les types de SA et leur pourcentage d'utilisation dans les modèles récents de STD des bâtiments (Chong et al., 2021). Une SA locale modifie la valeur d'un paramètre à la fois et quantifie l'impact sur la donnée de sortie. Une SA globale cherche à fournir une compréhension plus large du comportement du modèle en évaluant l'importance relative des paramètres d'entrée sur les valeurs de sortie. Parmi l'ensemble des méthodes d'analyse de sensibilité étudiées, la méthode de filtrage et la méthode de régression sont les plus populaires dû à la plus faible charge de calculs, comparativement aux SA basées sur la variance ainsi que celles basées sur les méta-modèles (Tian, 2013). Cependant, la SA basée sur la variance s'avère être la plus complète pour les modèles complexes non linéaires et non additifs (Delgarm et al., 2018). Cette méthode permet de mesurer la contribution de chaque paramètre à la variance totale des données de sortie et donc de prendre en compte les effets d'interactions entre les paramètres (Tian, 2013).

Tableau 1.8 Méthodes d'analyse de sensibilité dans les articles de calibration récents
Adapté de Chong et al. (2021, p. 111541)

Locale	Perturbation (One-At-a-Time (OAT))	23 %
Globale	Filtrage (Screening)	46 %
	Régression	13 %
	Méta-modèle	10 %
	Basé sur la variance	4 %
	SA régionale (RSA)	4 %

1.3.2.2 Périodes de calibration

Il est essentiel de bien choisir les périodes de calibration. Cette période doit couvrir la plupart des modes de fonctionnement. Les profils journaliers doivent être réguliers et les profils ne doivent pas être trop éloignés du profil médian de leur classe respective. Sansregret & Lavigne (2015) recommandent trois périodes d'une semaine non-consécutives. Ces périodes représentent trois modes de fonctionnement : une semaine par temps froid, une semaine pendant une saison de transition (automne ou printemps) et enfin, une semaine pendant l'été.

Le choix des périodes de calibration peut aussi être selon le concept de calibration en plusieurs étapes, une approche permettant de réduire le nombre de paramètres incertains (Chong et al., 2021). La première étape se fait généralement dans une période « libre de fluctuation » soit sans charges internes variables, ni de systèmes CVCA en opération. Par exemple, les paramètres de l'enveloppe sont calibrés lorsqu'aucun système CVCA n'est en fonctionnement et ensuite le plancher radiant est calibré durant la saison de chauffage (Cacabelos et al., 2017).

1.3.2.3 Méthodes de calibration

Selon Coakley et al. (2014), les méthodes de calibration peuvent être classées en deux catégories : manuelles ou automatisées. La calibration manuelle nécessite généralement un réglage itératif et pragmatique des paramètres individuels et prend beaucoup de temps de travail. Tandis que, la calibration automatisée nécessite des techniques mathématiques et statistiques informatisées pour ajuster automatiquement les paramètres du modèle, ce qui offre une meilleure reproductibilité et rapidité dû à la calibration simultanée de plusieurs paramètres. La Figure 1.6 compare les méthodes de calibration recensées par des articles de synthèse réalisés l'un en 2014 et l'autre en 2021. La Figure 1.6 illustre la tendance des études récentes à utiliser la calibration automatisée.

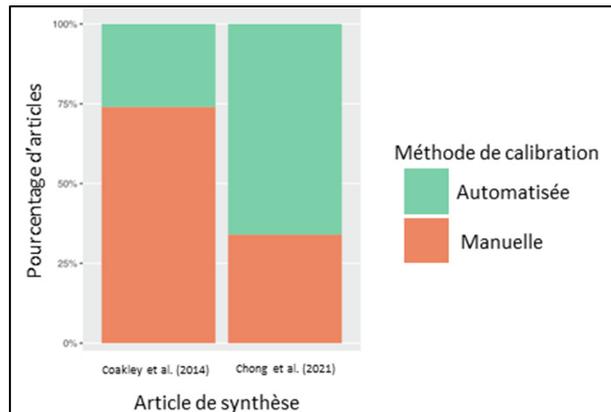


Figure 1.6 Évolution des méthodes de calibration
Adaptée de Chong et al. (2021, p. 111537)

Selon Chong et al. (2021), dans la majorité des cas, les calibrations automatisées utilisent l'optimisation mathématique (59 %) ou la calibration bayésienne (33 %). L'optimisation mathématique passe principalement par les algorithmes évolutionnaires (algorithme génétique (GA) et optimisation par essaims de particules (PSO), ainsi que par l'algorithme de Hooke-Jeeves (HJ). Ces algorithmes (GA, PSO et HJ) minimisent une fonction-objectif, c'est-à-dire l'erreur entre les valeurs simulées et celles mesurées, généralement des indicateurs statistiques (Section 1.3.1.2). Dans ces algorithmes, les valeurs initiales des paramètres sont distribuées de manière aléatoire afin de réduire le risque de convergence vers des solutions qui sont seulement optimales comparativement aux solutions à proximité, soit des minimums locaux.

1.3.2.4 Méthodologies de calibration des études récentes

Dans le recensement d'études effectué par Beaulac et al. (2023), dans la majorité des cas, la calibration des modèles énergétiques de serres se fait manuellement. Certaines études comparent l'influence du choix de différentes valeurs de paramètres pour leur modèle, mais leur méthodologie est peu détaillée. Parmi les études sur la modélisation énergétique de serres avec TRNSYS revues dans Beaulac et al. (2023), seulement cinq mentionnent effectuer une calibration (Adesanya et al., 2022; Baglivo et al., 2020; Ogunlowo et al., 2022; Rasheed et al., 2018; Yeo et al., 2022). Dans toutes ces études, la calibration est plutôt une étude paramétrique

évaluant l'impact de différentes approches de modélisation sur les variables de sortie du modèle. Il n'y a donc pas de processus de calibration des paramètres des modèles.

D'autres études récentes concernant la modélisation énergétique des serres (non développées avec TRNSYS) recourent à une méthode de calibration automatisée afin d'ajuster les paramètres du modèle. Un portrait de ces études est présenté dans le Tableau 1.9. La liste d'études du Tableau 1.9 n'est pas exhaustive, mais elle représente les tendances observées. Dans le cadre de ce projet de recherche, il est important de noter que les processus de calibration automatisée diffèrent d'une étude à l'autre, et qu'aucun consensus ne semble avoir émergé quant au processus optimal à adopter. Le développement et l'application de nouveaux processus permettent donc de faire avancer l'état de la recherche dans ce domaine.

Tableau 1.9 Méthodologies de calibration utilisées pour des modèles de serre

Référence	Analyse de sensibilité	Paramètres calibrés (avant SA)	Algorithme d'optimisation	Fonctions objectifs (Variables)	Durée de calibration
(Hasni et al., 2011)	NON	10	PSO; GA	MQE (Ti; Hi)	7 jours
(Guzmán-Cruz et al., 2009)	OAT	16 (N/A)	GA; ES; EP	R ² ; MRE (Ti; Hi)	7 jours
(Chen et al., 2016)	SOBOL	9 (12)	PSO; GA; PSO-GA	RMSE (Q _{chauffage})	5 jours
(Cruz-Valeriano et al., 2013)	NON	5	PSO	RMSE (Ti; Hi)	2 x 1 jour
(Herrero et al., 2007)	NON	15	MOGA	Third quartile of the error (Ti; Hi)	2 jours
(Lammari et al., 2020)	NON	12	GA	MBE (Ti; Hi)	14 jours
(Yang et al., 2019)	NON	7	PSO	MQE (Ti; Hi)	3 jours
(Pérez-González et al., 2018)	NON	17	PSO; DE	MSE (Ti; Hi)	1 jour

Analyse de sensibilité : OAT : Méthode One-at-the-time **Algorithme d'optimisation :** PSO : Particule Swarm optimization ; GA : Algorithme génétique ; ES : Stratégies évolutionnaire ; EP : Programmation évolutionnaire ; MOGA : Algorithme génétique multi-objectifs ; DE : Évolution différentiel **Variables :** Ti : Température intérieure ; Hi : Humidité relative intérieure ; Q_{chauffage} : Consommation en chauffage **Fonctions objectifs** MQE : Erreur moyenne ; RE : Erreur relative ; MSE : Écart quadratique moyen ; MRE : Erreur relative moyenne ; NSE: Coefficient de Nash-Sutcliffe (R²) ; RMSE : Écart-type

D'abord, une tendance se dégage au niveau des critères d'évaluation, sept études sur huit mesurent les résultats de calibration sur deux conditions intérieures de la serre, la température et l'humidité. Toutefois, les algorithmes de calibration utilisés minimisent une seule fonction-objectif, donc une seule variable, généralement la température. Seulement une étude prend en compte simultanément les deux variables, et ce avec un algorithme génétique multi-objectifs (Herrero et al., 2007).

Pour les paramètres à calibrer, la quantité varie entre cinq et dix-sept. Deux études ont mené une analyse de sensibilité pour sélectionner les paramètres à calibrer soit celles de Chen et al. (2016) et de Guzmán-Cruz et al. (2009), seulement celle de Chen et al. (2016) présente les résultats. Le nombre de paramètres calibrés ne semble donc pas être un inconvénient aux résultats de calibration, malgré qu'il allonge le temps de calcul des algorithmes d'optimisation. De plus, sans analyse de sensibilité, certains paramètres peuvent être fixés à des valeurs aléatoires puisqu'ils ont peu d'influence sur la fonction-objectif (Chong et al., 2021).

Les études avec plus d'un algorithme d'optimisation signifient qu'une comparaison entre les algorithmes est effectuée. Les conclusions des études varient entre les algorithmes et semblent être représentatives uniquement de leur contexte spécifique. Par exemple, Hasni et al. (2011) concluent que la PSO surclasse la GA, tandis que Pérez-González et al. (2018) obtiennent une erreur carrée moyenne (MSE) plus basse avec l'évolution différentielle (DE) qu'avec la PSO. Les périodes de calibration des modèles sont généralement de quelques jours, ce qui semble court. Certains justifient ce choix par la complexité de l'acquisition de données. Cruz-Valeriano et al. (2013) proposent une calibration par étape, où, la méthode proposée prévoit deux étapes d'optimisation. La première étape permet d'estimer les paramètres liés aux caractéristiques de la serre. Puis, avec ces premiers paramètres fixés, la deuxième étape estime les paramètres associés à la ventilation. Cette méthode semble intuitive, cependant elle est menée sur une courte période, ce qui rend difficile d'en prédire l'efficacité globale. En effet, la période de calibration est d'un jour et la période de validation n'est que de cinq jours. Cette conclusion revient souvent, le processus de validation est donc abordé dans la section 1.3.3.

1.3.3 Processus de validation

La validation des résultats de simulation d'un modèle par rapport aux données mesurées est un élément essentiel du développement de ce modèle. Cette validation renforce la confiance dans les prédictions futures d'un modèle (Ohlsson & Olofsson, 2021). Judkoff et al. (2008) présentent trois techniques de validation d'une quantité d'intérêt (QDI) soient la technique

analytique, la technique empirique et la technique comparative, voir la Figure 1.7. Pour les bâtiments, les QDI validés sont les conditions de l'environnement intérieur, les flux énergétiques et la consommation énergétique. Dans les études portant sur la modélisation énergétique de serre, la technique empirique est la plus utilisée. Toutefois, la technique empirique est la plus complexe, car elle implique de mener une campagne de mesurage sur site, ce qui s'accompagne inévitablement d'incertitudes. Pour l'étude des serres, elle demeure tout de même la méthode la plus fiable pour comparer la performance d'un modèle d'un système complexe à la réalité.

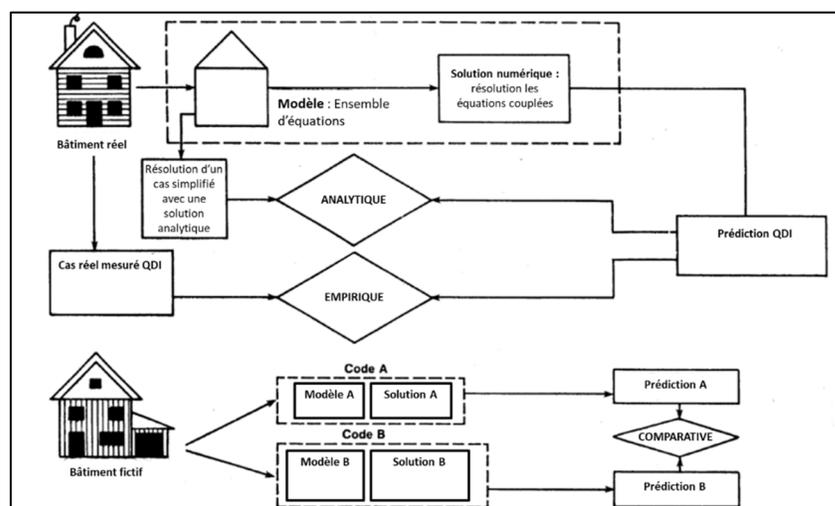


Figure 1.7 Approches analytique, empirique et comparative de validation d'un modèle énergétique de bâtiment
Adaptée de Judkoff et al. (2008, p. 25)

Selon le *US Department of Energy's Advanced Simulation and Computing*, une validation consiste : « ... à déterminer dans quelle mesure un modèle est une représentation de la réalité en perspective de son application future » [Traduction libre]. En examinant cette définition, trois éléments du processus de validation se dégagent. Tout d'abord, il est essentiel de disposer d'une représentation fidèle de la réalité, ce qui implique la nécessité de collecter des données expérimentales de qualité pour effectuer des comparaisons. L'acquisition de données constitue ainsi une étape préliminaire de la plus haute importance, et est abordé à la section 1.3.1.1. Ensuite, « déterminer dans quelle mesure » implique la quantification de l'écart entre les données simulées et les données réelles. Les indicateurs statistiques utilisés pour quantifier la précision des résultats de simulation du modèle sont présentés à la section 1.3.1.2. Enfin, la

« perspective d'application future » suggère que les critères de validation peuvent être adaptés en fonction des besoins spécifiques du modèle. Ces critères de validation sont discutés à la section 1.3.3.1.

1.3.3.1 Critères de validation

Pour déterminer si un modèle énergétique de serre est valide, il n'existe pas de critères de validation standardisés ou faisant consensus parmi les développeurs pour ce contexte particulier. Katzin et al. (2022) soulèvent qu'un CV-RMSE de moins de 10% semble s'établir comme standard, mais ils ne mentionnent pas pour quelles QDI, ni l'intervalle. Dans les études de modélisation énergétique de bâtiment, des recommandations spécifient les seuils d'erreur déterminant si un modèle est calibré de manière satisfaisante (ASHRAE, 2014; IPMVP, 2002; Webster et al., 2015). Ces recommandations sont présentées au Tableau 1.10.

Tableau 1.10 Recommandations de critères de validation des résultats de simulation

Recommandations	Mensuel (%)		Horaire (%)	
	CV-RMSE	NMBE	CV-RMSE	NMBE
ASHRAE Guideline 14 (ASHRAE, 2014)	15	± 5	30	± 10
IPMVP (IPMVP, 2002)	-	-	20	± 5
FEMP (Webster et al., 2015)	15	± 5	30	± 10

Les deux indicateurs principaux de ces recommandations sont le NMBE et le CV-RMSE. La principale différence entre ces deux indicateurs statistiques est que les écarts positifs et négatifs peuvent s'annuler entre eux dans le calcul du NMBE, alors qu'ils s'additionnent entre eux, en les élevant au carré, dans le calcul du CV-RMSE. Le NMBE indique si le modèle a tendance, en moyenne, à surestimer ou à sous-estimer la variable y . Le CV-RMSE indique quant à lui la précision du modèle. En élevant l'écart au carré, le CV-RMSE amplifie les grands écarts du modèle.

Ainsi, les indicateurs suggérés sont des indicateurs statistiques relatifs à la moyenne des données expérimentales de la QDI. Cependant pour une serre, la QDI est souvent la température (Section 1.3.3.2), et les indicateurs statistiques relatifs ne sont pas adaptés puisque

la température interne de consigne peut être très différente d'une serre à l'autre (Section 1.1.1.1) et présenter de grandes variations journalières. Le CV-RMSE est inadapté aux unités non absolues telles que les degrés Celsius. Par exemple, si la température moyenne est près de 0°C, le CV-RMSE tend vers infini. Ces indicateurs sont toutefois plus efficaces pour les données absolues comme la consommation énergétique et l'humidité relative. Le Kelvin pourrait être utilisé pour la température, mais ce n'est pas utilisé dans la littérature.

En plus du NMBE et du CV-RMSE, le coefficient de détermination (R^2) est évoqué par *ASHRAE Guideline 14* (2017) pour évaluer la précision d'un modèle. Le guide indique que le R^2 doit être d'au moins 75%. Cet indicateur statistique est équivalent au coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE). Cet indicateur capte la dispersion de la variable simulée par rapport à la variance de la variable mesurée.

La recension des écrits permet d'observer qu'il n'y a pas de consensus concernant le niveau de précision requis pour la validation d'un modèle. La précision d'un modèle doit être évaluée en fonction de l'objectif spécifique qu'il est destiné à atteindre. Les différences de précision peuvent être acceptables dans certaines situations, à condition que les résultats fassent l'objet d'une analyse et d'une discussion appropriées.

1.3.3.2 Méthodologies de validation des études récentes

Le Tableau 1.11 présente les paramètres des méthodologies de validation utilisés dans les études récentes. Par cette recension des études, on constate d'abord l'absence de méthodologies standardisées fiables pour la validation de modèles énergétiques de serres. Les méthodologies varient tant dans l'acquisition de données que dans l'analyse des données.

La collecte de données pour la validation est majoritairement effectuée dans des serres existantes expérimentales (11/16) ou commerciales (2/16), mais la collecte peut aussi se faire à partir d'autres modèles numériques validés antérieurement (3/16). Pour ce qui est de l'acquisition des données, la QDI la plus souvent mesurée et validée est la température

intérieure (12/16), suivie des besoins en chauffage (5/16), l'humidité (3/16), le rayonnement (1/16), et le taux de transpiration des cultures (1/16). Une constance au niveau des QDI validées est observée. La température est une condition interne primordiale pour la croissance des plantes, et elle est reliée au bilan énergétique. La consommation énergétique en chauffage l'est aussi, puisqu'elle est une QDI importante de la simulation des performances énergétiques.

Tableau 1.11 Méthodologies de validation des modèles de serre développés avec TRNSYS
Tiré de Beaulac et al. (2023, p. 6)

Référence	Lieu	Période	Contexte	QDI	Durée (Intervalle)	Indicateurs statistiques
(Vadiee & Martin, 2013)	Suède	Année	Commercial	$Q_{\text{chauffage}}$	1 an (Annuel)	ME
(Ha et al., 2015)	Corée du sud	Hiver ; Printemps	Expérimental	Ti; $Q_{\text{chauffage}}$	2 x 3 jours (1h)	maxE, MBE, RE
(Ward et al., 2015)	Royaume-Uni	Printemps, Été, Automne	Expérimental	Ti	9 mois (Mensuel)	MBE
(Semple et al., 2017)	Canada	Année	Commercial	$Q_{\text{chauffage}}$	6 ans (mois)	Déviaton
(Rasheed et al., 2018)	Corée du Sud	Été, Hiver	Expérimental	Ti	2 x 3 jours (1h)	NSE
(Rasheed et al., 2019)	Corée du Sud	Automne ; Hiver	Expérimental	Ti	5 et 14 jours (1h)	NSE
(Ahamed et al., 2020)	Canada	Année	Modèle numérique validé	$Q_{\text{chauffage}}$	1 mois (jour)	ME
(Baglivo et al., 2020)	Italie	Année	Modèle numérique validé	Ti	1 an (Annuel)	MRE
(Mohammadi et al., 2020)	Iran	Hiver	Expérimental	Ti	4 jours (2h)	NSE
(Rasheed et al., 2020)	Corée du Sud	Été, Hiver	Expérimental	Ti	2 x 10 jours (1h)	NSE; RMSE; CVRMSE
(Choab et al., 2021)	Canada	Année	Modèle numérique validé	$Q_{\text{chauffage}}$	1 an (Annuel)	MBE
(Lee et al., 2021)	Corée du sud	Printemps	Expérimental	Ti; ET	5 jours (1h)	NSE; <i>index of agreement</i>
(Adesanya et al., 2022)	Corée du sud	Hiver	Expérimental	Ti; $Q_{\text{chauffage}}$	6 jours (1h); Mois	NSE
(Lalonde, 2022)	Canada	Automne, Printemps	Expérimental	Ti; Hi; Rad	2 x 30 jours (1h)	NSE; RMSE
(Ogunlowo et al., 2022)	Corée du Sud	Automne	Expérimental	Ti; Hi	13 jours (10 min)	NSE ; RMSE; ANOVA
(Yeo et al., 2022)	Corée du sud	Été	Expérimental	Ti ; Hi	67 jours (1h)	MBE; NSE

Variables : Ti : Température intérieure ; H : Humidité relative intérieure ; Rad : Rayonnement solaire ; $Q_{\text{chauffage}}$: Consommation en chauffage ; ET : Taux d'évapotranspiration des cultures
Mesures statistiques MBE : Erreur moyenne ; RE : Erreur relative ; maxE : Erreur maximum ; MRE : Erreur relative moyenne ; NSE: Coefficient de Nash-Sutcliffe (R^2) ; RMSE : Écart-type ; ANOVA : Analyse de variance

Ces QDI sont comparées soit périodiquement (10/16) ou par des moyennes (6/16) journalières, mensuelles ou annuelles. La durée de l'acquisition de données varie de 4 jours à 67 jours pour les valeurs mesurées en continu et d'un mois à six ans pour les valeurs moyennes.

Pour ce qui est de l'analyse des données, les indicateurs statistiques utilisés sont le calcul de l'erreur (ME, MRE, maxE) (7/16), les coefficients statistiques comme la RMSE (3/16) ou le NSE (R^2) (9/16). Parmi les études consultées, deux d'entre elles évaluent aussi l'analyse de

variance (ANOVA) et l'indice de concordance (*Index of agreement*). Cinq modèles ont opté pour une validation avec plus d'un indicateur statistique.

La recension des méthodologies de validation des modèles dans les études consultées met en lumière le manque de standardisation des méthodologies. Les périodes de validation et les indicateurs statistiques utilisés sont différents d'une étude à l'autre, ce qui ne permet pas d'établir des comparaisons entre les modèles. Il est donc difficile de déterminer quel modèle est le plus précis pour notre application et sur les approches de modélisation à favoriser pour le développement d'un modèle.

Une question récurrente concerne la durée de la période de validation. Des dix modèles validés avec des données horaires ou à intervalle de temps plus court (10/16), la majorité est validée sur moins de deux semaines (6/10). Les courtes périodes de validation sont souvent expliquées dans les études par la difficulté de recueillir des données expérimentales de qualité. Ces études abordent rarement le manque de représentativité de leur validation. Pourtant de longues périodes de validation ont l'avantage de favoriser une meilleure confiance dans les prédictions des modèles, puisqu'elles couvrent un grand éventail de conditions météorologiques. En effet, la validation d'un modèle doit démontrer que ce modèle est apte à être utilisé pour une étude de simulation énergétique. Une étude énergétique est généralement une étude annuelle ou sur la saison de chauffage (Coakley et al., 2014).

1.4 Synthèse de la revue de littérature

La revue de la littérature sur la simulation des performances énergétiques de serres montre les nombreuses approches utilisées pour prédire les conditions de l'environnement intérieur et les besoins énergétiques d'une serre. Ces approches sont adaptées pour répondre aux besoins d'exploitation. La revue des approches de modélisation énergétique de serre a révélé que TRNSYS est un outil flexible capable de modéliser une grande variété de types de constructions et de systèmes actifs d'une serre, en plus de faciliter l'intégration de mesures de réduction énergétique préexistantes. Grâce aux approches de modélisation détaillées

disponibles dans TRNSYS pour plusieurs éléments du bilan thermique d'une serre, ainsi qu'au développement possible de nouveaux composants, la création d'un modèle détaillé est facilitée.

Plusieurs modèles énergétiques de serre ont été créés avec le logiciel TRNSYS dans les dernières années. Cependant, la reproductibilité des modèles est un défi en raison du manque d'information concernant la description des modèles. Le développement d'un nouveau modèle énergétique est requis pour permettre son exploitation par notre groupe de recherche et analyser des problématiques locales concernant l'efficacité énergétique des serres au Québec.

Par ailleurs, la paramétrisation des modèles représente un autre défi du développement d'un modèle. Les valeurs des paramètres disponibles dans la littérature ne sont pas toujours adaptées à la situation de l'étude de cas. La calibration automatisée est une méthode de plus en plus prisée en modélisation énergétique des bâtiments, et dans une certaine mesure, des serres, afin d'ajuster automatiquement les paramètres d'un modèle en vue de refléter les conditions locales. Aucun modèle énergétique développés avec TRNSYS n'effectue de calibration automatisée. Afin de transférer les meilleures pratiques de modélisation énergétique des bâtiments à la modélisation énergétique des serres, il est nécessaire développer une méthodologie de calibration.

Un autre enjeu majeur récurrent est le manque de validation approfondie des modèles de serres. Pour avoir confiance en les prédictions d'un modèle, il est pertinent de le comparer à des données mesurées dans diverses conditions météorologiques. De plus, considérant le manque de standardisation de la validation, la sélection des indicateurs statistiques et des quantités d'intérêt (QDI) d'une serre doit être adapté en fonction des besoins spécifiques du modèle. Par conséquent, il est pertinent de développer et d'appliquer une méthodologie de validation robuste.

Les objectifs de ce projet de recherche s'inscrivent donc dans la continuité des études précédentes en visant d'abord à créer un modèle énergétique détaillé d'une serre avec le logiciel TRNSYS, puis implémenter une méthodologie pour la calibration des paramètres incertains du modèle, et effectuer la validation du modèle pour démontrer son applicabilité.

CHAPITRE 2

DÉMARCHE DE TRAVAIL

2.1 Objectifs

L'objectif principal de recherche est le développement d'un modèle énergétique de serre de petite taille en contexte québécois à l'aide d'un outil STD, TRNSYS. Ce modèle énergétique basé sur les phénomènes physiques devra être en mesure de prédire avec précision les conditions de l'environnement intérieur d'une serre permettant d'en évaluer les performances énergétiques.

Pour ce faire, les sous-objectifs du mémoire sont les suivants :

1. Amélioration d'un modèle énergétique existant de serre, fondé sur la mise en équation de phénomènes physiques avec le logiciel TRNSYS;
2. Calibration des paramètres incertains du modèle énergétique d'une serre par une méthode automatisée;
3. Validation des performances de prédictions des conditions de l'environnement intérieur et énergétique d'une serre par le modèle énergétique calibré.

2.2 Aperçu de la méthodologie

La Figure 2.1 présente la méthodologie globale de développement d'un modèle énergétique de serre. Dans le schéma, la boîte bleue indique le résultat final attendu pour chaque étape.

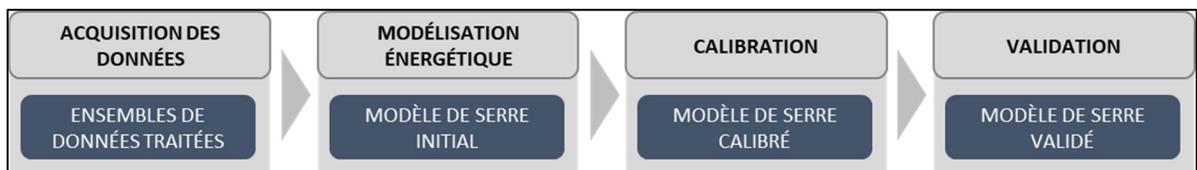


Figure 2.1 Schéma de l'aperçu de la méthodologie du projet de recherche

En première étape de la méthodologie, afin de recueillir les données expérimentales utiles au développement d'un modèle énergétique de serre, un site a été choisi pour l'étude de cas. Ce site est le *Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité* (CÉTAB+) situé à Victoriaville, dans la région administrative du Centre-du-Québec. Les partenaires du CÉTAB+ ont accepté de partager leurs données et de donner accès à leurs installations.

Le CÉTAB+ effectue des recherches expérimentales sur l'agriculture hivernale biologique dans deux serres construites en 2020. Les caractéristiques des serres du CÉTAB+ représentent un cas typique de serre de petite taille opéré par des producteurs maraîchers du Québec (Fortier & Sylvestre, 2021). Le fabricant de serres, *Les industries Harnois*, est un entrepreneur de grande envergure tant dans le marché québécois que nord-américain. Les serres du CÉTAB+ sont décrites par Coudret (2022), dans son rapport de projet réalisé au sein du même groupe de recherche de l'ÉTS que la présente étude.

Dans un premier temps, une visite sur site est effectuée afin de vérifier les informations figurant dans la documentation de construction de la serre, ainsi qu'effectuer des prises de mesures ponctuelles, telles qu'un test d'infiltrométrie. L'acquisition des données est une étape cruciale pour des processus de calibration et de validation d'un modèle. Cette collecte de données s'effectue en continu par un système d'instrumentation décrit par Coudret (2022). Les données recueillies ont été traitées et analysées pour vérifier leur qualité et pour définir les périodes de calibration et de validation du modèle. Ces données ont été recueillies par le CÉTAB+ durant trois saisons d'agriculture hivernale (de la saison 2020-2021 à 2022-2023). Une saison d'agriculture hivernale s'étend généralement de septembre à avril de l'année suivante.

Pour réaliser l'étape de la modélisation énergétique, les travaux de Lalonde (2022) du groupe de recherche ont permis d'orienter le choix du logiciel TRNSYS. Pour son étude, le modèle a été développé et calibré en utilisant des données provenant de la serre du CÉTAB+ pour l'année 2020-2021. À ce moment, il n'y avait qu'une seule serre non-chauffée au CÉTAB+. Il n'y avait pas de station météorologique locale, ni d'enregistrement des données des contrôleurs.

Pour la présente étude, l'amélioration du modèle consiste à analyser, vérifier et ajouter à ce modèle préexistant en utilisant une quantité accrue de données et d'informations relatives aux systèmes et aux opérations. Le processus d'amélioration du modèle est itératif et basé sur les données mesurées. Lorsqu'une modification est faite au modèle, les nouveaux résultats sont comparés de manière qualitative et quantitative aux données mesurées, ainsi qu'aux résultats préalables. Ce mémoire présente la version finale du modèle. Les approches de modélisation sélectionnées sont détaillées dans la section 3.9 de l'article « Energy modeling, calibration, and validation of a small-scale greenhouse using TRNSYS ». Certains choix d'approches de modélisation sont éclaircis dans la discussion.

À la troisième étape du projet de recherche, la calibration du modèle est effectuée pour fixer la valeur des paramètres incertains. La calibration proposée dans ce projet est inspirée par la méthodologie Baba et al. (2022). La méthodologie suivie est détaillée dans la section 3.3.2 de l'article.

La dernière étape du projet de recherche est la validation du modèle. Le modèle est validé en utilisant des données expérimentales distinctes de celles utilisées lors de la calibration. L'acquisition de données au CÉTAB+ sur deux serres jumelles lors de trois saisons de culture permet d'effectuer une validation approfondie. La méthodologie de validation adoptée est exposée dans la section 3.3.3 de l'article.

2.3 Présentation de l'article scientifique

Le CHAPITRE 3 présente l'article de revue scientifique rédigé dans le cadre de ce mémoire et soumis à la revue *Applied Thermal Engineering*. L'article répond aux objectifs spécifiques de ce projet. Il présente l'intégralité du travail de recherche de ce mémoire, soit :

- 1- le développement d'un modèle énergétique de serre de petite taille avec un outil STD TRNSYS;
- 2- la calibration d'un modèle énergétique de serre et;
- 3- la validation des résultats de simulation avec des données expérimentales.

CHAPITRE 3

ENERGY MODELING, CALIBRATION, AND VALIDATION OF A SMALL-SCALE GREENHOUSE USING TRNSYS

Arnaud Beaulac^a, Timothé Lalonde^b, Didier Haillot^c, Danielle Monfet^d

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

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

Article soumis pour publication, décembre 2023.

3.1 Abstract

Greenhouse energy modeling is a prevalent tool for optimizing greenhouse energy consumption. However, for a model to serve its intended use, it is imperative to have a high level of confidence in the precision of its predictions. In this paper, a validated greenhouse energy model for a typical small-scale greenhouse in a cold climate is developed. The model is created using TRNSYS, a building performance simulation tool, with detailed energy modeling components and a user-defined crop model. The model is calibrated to fix uncertain parameters. A sensitivity analysis is used first to identify sensible uncertain parameters, followed by a multi-stage automated calibration. The automated calibration method uses a multi-objective genetic algorithm to adjust the uncertain parameters, calibrating the model for the measured indoor air temperature and relative humidity. The model performed well during the free-floating and ventilated stages (56 days) with a combined root mean square error (RMSE) of 1.6°C for indoor air temperature and 8.3% for the air relative humidity. The validation process involved assessing the applicability of the calibrated model using two additional datasets. For all the cases, comparing the simulation results with indoor environment measurements resulted in an RMSE of less than 2°C for air temperature and less than 10% for air relative humidity; these values compare favorably to the literature. The model achieved a 3.7% mean relative error (MRE) in estimating monthly energy consumption for a minimally heated greenhouse. Given these results, the model is deemed sufficiently accurate and applicable for future investigations.

3.2 Introduction

Recently, a rising interest in year-round local food production solutions has emerged. Greenhouses effectively control indoor environment conditions to optimize crop growth. In cold climates, the economic viability of greenhouses is directly linked to the expenses associated with the energy required for cultivating crops under optimal conditions (Eaves & Eaves, 2018; Runkle & Both, 2011). Building performance simulation (BPS) can generate high-quality data to improve energy efficiency without the time and investments associated with conducting real-life experiments. Dynamic greenhouse energy models can assist in decision-making regarding indoor environment management, crop cultivation, greenhouse design, energy conservation measures (EMC), investments, and policymaking (Heyat Jilani et al., 2023; Talbot et al., 2022; Xiao et al., 2023; Zhou et al., 2023). Different modeling approaches have been proposed, such as using process-based greenhouse models. Process-based models explicitly simulate the phenomena and systems by underlying processes and mechanisms that drive the system's behavior, such as the crop's physiological processes and the energy balance within the greenhouse. Thus, process-based models are known for their high interpretability and often exhibit high accuracy (Katzin et al., 2022).

Many process-based greenhouse energy models are developed using BPS tools like TRNSYS (Klein et al., 2017). Between 2013 and 2023, at least thirty-two studies have used TRNSYS to create a greenhouse energy model (Beaulac et al., 2023). TRNSYS has been effectively used to consider design features accurately across multiple types of greenhouses. The models yield acceptable results when greenhouse-specific elements are added (Ahamed et al., 2020). Indeed, TRNSYS supports implementing simplified and detailed modeling approaches for thermal processes, such as 3D solar and thermal radiations, ground-coupling (Type 49/1244), and infiltration/ventilation (TRNFLOW). Additional components can be integrated into TRNSYS to address greenhouse-specific elements to model additional phenomena, such as crops' evapotranspiration and condensation on the greenhouse structure (Lavigne, 2022; Talbot & Monfet, 2020). Although these components have been integrated individually in published

TRNSYS models, none have combined all the detailed components simultaneously in one model (Beaulac et al., 2023).

Despite the numerous recent models, direct comparisons of model performance solely based on validation results have become challenging, given the wide range of evaluation techniques. As Katzin et al. (2022) and Beaulac et al. (2023) noted, there are no standardized procedures for validating greenhouse energy models. Validation processes vary in terms of both data acquisition characteristics (validated variables, duration of the validation periods, sampling frequency, etc.) and metrics used.

Validation is essential in developing the greenhouse energy model, as it instills confidence in its accuracy. However, greenhouse model validations are often limited. They frequently involve short-term assessments using hourly data or extended validation periods with a longer sampling frequency (e.g., monthly). This can result in an inadequate representation of all operating modes (Sansregret & Lavigne, 2015). Given the sensitivity of greenhouses' thermal behavior to outdoor weather conditions, comprehensive validation across diverse meteorological conditions is essential to enhance confidence in the model's ability to estimate the annual energy performance of the greenhouse.

Validation poses additional challenges when dealing with process-based models, as they involve many parameters that depend on the level of detail in describing physical interactions. Parametrization, which consists of assigning values to these model parameters, typically draws from similar studies in scientific literature, established norms, standards, or field surveys. The values assigned to parameters may not faithfully represent their real-world counterparts due to the specific conditions under which they were initially determined. As a consequence, these values are regarded as possessing inherent uncertainty. Uncertain parameters can be calibrated by fitting the model's estimated values with the measured data. Calibration helps fix uncertain parameters of a greenhouse energy model to better represent the as-built and actual operating conditions, thereby enhancing accuracy.

Calibration can be either manual or automated. Manual calibration typically requires iterative tuning of individual parameters and is time-consuming, whereas automated data-driven calibration supports tuning multiple parameters simultaneously (Coakley et al., 2014). In recent years, with the increased computational capabilities, automated calibration has gained popularity within the building energy simulation field due to its robustness, leading to a shift in calibration methods from manual to automated (Chong et al., 2021). The automated calibration uses an optimization algorithm to minimize the difference between measured and simulated data. Automated procedures often include sensitivity analysis to reduce the number of inputs before applying an optimization algorithm to reduce the computing time.

In greenhouse energy modeling, calibration is often manual, and the process is rarely described, thus replicable. Some of the reviewed TRNSYS models mentioned a calibration process (Adesanya et al., 2022; Baglivo et al., 2020; Ogunlowo et al., 2022; Rasheed et al., 2018; Yeo et al., 2022), but it usually compared modeling approaches. For example, Rasheed et al. (2018) assessed the impact of the tilted surface radiation models available in TRNSYS on validation metrics. Other greenhouse energy models used automated calibration, employing various optimization algorithms. Particle swarm optimization (PSO) has been used by (Chen et al., 2016; Cruz-Valeriano et al., 2013; Hasni et al., 2011; Pérez-González et al., 2018; Yang et al., 2019), genetic algorithms (GA) by (Chen et al., 2016; Herrero et al., 2008; Lammari et al., 2020), and differential evolution algorithm (DE) by (Pérez-González et al., 2018). Another hybrid approach combined optimization and machine learning algorithms (Zhou et al., 2023). Chen et al. (2016) compared GA and PSO with a novel hybrid approach combining adaptive PSO and GA (APSO-GA). The APSO-GA saved approximately 15% of the optimization time and improved power and energy demand prediction accuracy by ~3% compared to PSO and GA over a 3-day period. Guzmán-Cruz et al. (2009) compared three global evolutionary algorithms (GAs, Evolution Strategy (ES) and Evolution Programming (EP)) and two local search methods (Least Squares (LSQ) and Sequential Quadratic Programming (SQP)). Based on the information presented in (Guzmán-Cruz et al., 2009), the EP algorithm outperformed the others in predicting temperature and relative humidity over 7 days. The estimation of relative humidity by LSQ and SQP proved less accurate, possibly influenced by local minima.

While comparing the performance of different calibration methods is informative, it is essential to highlight that it is difficult to assess their reliability without standardized validation methods.

Despite the extensive body of research on greenhouse energy modeling, the above review highlights several key findings:

- 1- Only a limited number of TRNSYS models included detailed modeling approaches for each greenhouse component.
- 2- Using extensive validation processes, such as over extended periods with sub-hourly data, is not widely explored.
- 3- Most TRNSYS models relied on uncertain parameters either fixed according to the literature or adjusted using manual calibration methods: automated calibration for detailed greenhouse models has not been thoroughly studied.

This study aims to provide accurate predictions of the indoor environment conditions and energy consumption of a small-scale greenhouse in a cold climate. To attain this objective, a small-scale greenhouse energy model is developed using the BPS tool TRNSYS. This is completed according to the following three steps. First, the studied greenhouse is modeled in TRNSYS using detailed modeling approaches and user-defined components. Second, a multi-stage automated calibration is used to fix uncertain parameters of the initial model under different operating modes. Third, the calibrated model undergoes validation using two periods to demonstrate its applicability. A validated process-based model developed in TRNSYS offers maximum flexibility to support research across multiple disciplines, including agronomy, economics, energy, greenhouse design, etc.

This paper is organized as follows: Section 3.3 presents the methodology to create the greenhouse BPS model; Section 3.4 details the energy modeling approach used in TRNSYS; Section 3.5 presents the calibration process; and Section 3.6 shows the results of the calibration and validation. A discussion follows in Section 3.7.

3.3 Methods

This paper presents the creation process of a greenhouse energy model that is calibrated and validated using measured data. Measured data are monitored at two identical gothic arch greenhouses. Each greenhouse has a footprint of 250 m² (10.7 m x 23.2 m), is oriented 40° to the Northeast, and is located in Victoriaville, Canada (Figure 3.1).



Figure 3.1 Monitored gothic arch greenhouses

The main steps of model development are illustrated in Figure 3.2 and include: (1) creation of the greenhouse energy model using a BPS tool, (2) automated calibration of the model's uncertain parameters, and (3) validation of the calibrated model.

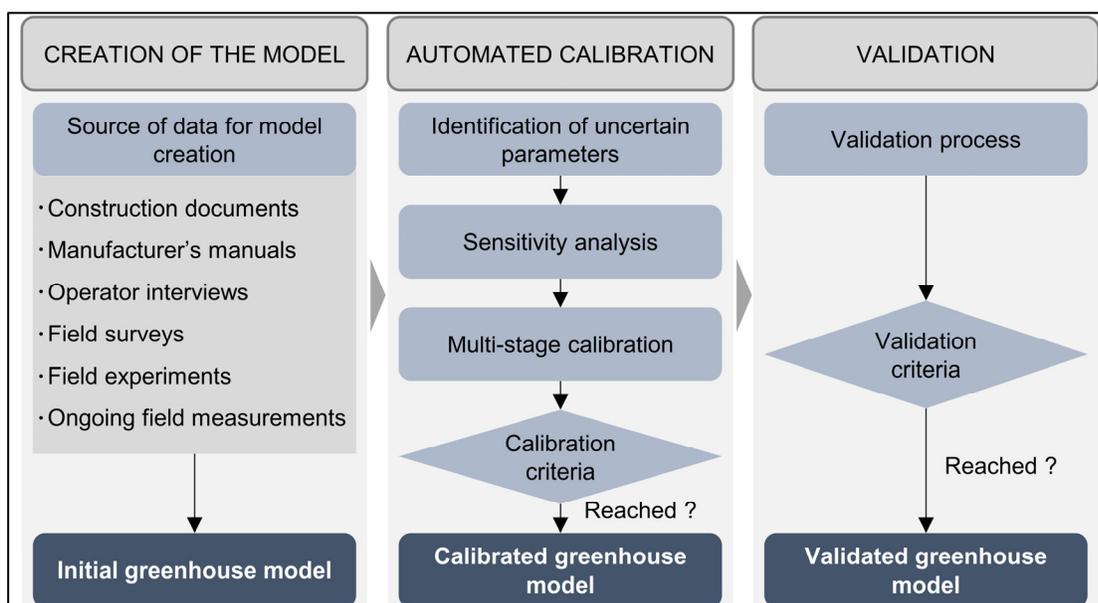


Figure 3.2 Flowchart of the greenhouse energy model creation process

3.3.1 Creation of the greenhouse energy model

The model is developed using TRNSYS18 (Klein et al., 2017). It is chosen based on (1) its ability to implement new models, such as a detailed crop model (Ward et al., 2015); (2) its ease in enabling the implementation of detailed modeling approaches for solar radiation, thermal radiation, infiltration, ventilation, and conduction in the ground and (3) its previous application to BPS of greenhouses by several authors (Beaulac et al., 2023). The modeling of solar radiation and thermal exchanges considers the 3D shape of the greenhouse. For the ground-coupling model, a 3D ground discretization model is available. For infiltration and ventilation, an air network model, TRNFLOW, is integrated into the 3D construction (Crawley et al., 2008). Detailed models are preferred since they enable a finer resolution analysis of building energy performance, requiring fewer assumptions (Raftery et al., 2011). The greenhouse model is created according to data sourced from construction documents, manufacturer's manuals, operator interviews, field surveys, field experiments, and ongoing field measurements, as detailed in section 3.4.

3.3.2 Automated calibration

The automated calibration of uncertain parameters follows the approach proposed by Baba et al. (2022). Although initially designed for assessing overheating in commercial buildings, it is particularly relevant to greenhouses since they are prone to significant deviations from temperature setpoint due to being highly weather-dependent. Such temperature volatility can result in crops fatally overheating or freezing (Hatfield & Prueger, 2015).

The calibration process includes: (1) identifying the uncertain parameters; (2) conducting a sensitivity analysis to reduce the number of uncertain parameters to be used in the multi-stage calibration by fixing insensitive parameters, i.e., parameters that do not significantly affect the indoor environment conditions of the greenhouse; (3) conducting a multi-stage calibration.

3.3.2.1 Identification of uncertain parameters

A detailed TRNSYS greenhouse model contains numerous parameters from mathematical expressions of thermal processes. To identify which parameters should be included in the calibration process and which should be fixed, a selection of uncertain parameters must be done. The first screening of parameters relies on expert knowledge since it is evidence-based. The screening process follows three steps to identify the uncertain parameters of the model.

First, all physicochemical properties of materials, heat transfer coefficient, and operating parameters used in the greenhouse model are listed. Modeling approaches and construction specifications are considered as modeling development elements rather than parameters. Also, the construction specifications are based on documentation and are confirmed with a field survey. Second, the parameters are categorized using an adapted version of the source hierarchy outlined by Raftery et al. (2011): (1) Common knowledge; (2) Data-logged measurements; (3) Spot measurements; (4) Benchmark studies, standards, guidelines, and design stage information. Categories 1 and 2 are regarded as having a lower level of uncertainty; thus, the parameters in these categories are fixed to documented values. On the other hand, the more uncertain parameters (categories 3 and 4) are proceeded to the next step. Third, the remaining parameters are clustered according to two conditions: (1) the parameters can be consolidated into a single parameter (e.g., $\alpha = \frac{\lambda}{\rho * C_p}$), and (2) the parameters are mathematically correlated (e.g., $\tau + \sigma + \rho = 1$). Finally, the remaining parameters are identified as the uncertain parameters of the greenhouse model.

3.3.2.2 Sensitivity analysis

Sensitivity analysis helps identify which input parameters significantly impact the output variables and which parameters are less sensitive. Less sensitive parameters can be fixed in the model without affecting the accuracy (Tian, 2013). The proposed approach aims to reduce the number of parameters adjusted during calibration. The identification of sensible uncertain parameters is completed using the global variance-based sensitivity method (SOBOL) (Sobol',

2001), which can estimate the interactions between the parameters and is widely used in building energy analysis (Chong et al., 2021). Calculated using the Monte Carlo method, it decomposes the variance of the model output into fractions attributable to individual inputs (Sobol', 2001). The global sensitivity index (S_{Ti}) of individual parameters calculates the contribution of each input parameter and its interactions with any of the other input parameters on the output for nonlinear and non-monotonic models, as shown in equation (3.1) (Tian, 2013).

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V_{X \sim i}}{V(Y)} \quad (3.1)$$

Where $V_{X \sim i}$ indicates the effect of all parameters except X_i on the model output, and $V(Y)$ is the total variance of the model output (variance of all parameters with all interactions).

Samples are generated using the Saltelli sampler from the Python library SALib (Saltelli et al., 2010). The sum of the global sensitivity indices will be equal to 1 when the model is purely additive, as there is no correlation among the inputs. The number of samples is considered sufficient if the sum of the global sensitivity indices is equal to 1, and if not, the number of samples needs to be increased. The parameter range influences the application of the SOBOL method. A uniform distribution is assumed for each parameter.

3.3.2.3 Multi-stage calibration

Calibration settings are crucial to identify the optimal solution. Three essential elements of the calibration process are described in this section: the optimization algorithm selected for altering model parameters, the objective functions and evaluation criteria, and the calibration periods.

3.3.2.3.1 Multi-objective genetic algorithm

One of the evolutionary algorithms commonly used to generate high-quality solutions to optimization problems is a Genetic Algorithm (GA), as discussed by Chong et al. (2021). GA emulates the process of natural selection to evolve and improve a population of potential solutions across successive generations. Among the GAs, the Multi-Objective Genetic Algorithm NSGA-II (MOGA) optimization method is used. Multi-objective evolutionary

algorithms are designed to find a set of solutions that represent the Pareto front. This front encompasses trade-off solutions that address multiple conflicting objectives simultaneously.

Calibrating greenhouses is challenging due to the interdependence of two main variables, air temperature and humidity, which influence indoor environment performance. Given this interdependence, simultaneous air temperature and humidity calibration are more appropriate than a single-objective approach. Hence, the MOGA calibration method is more suitable than the single-objective GA calibration. The Matlab function *gamultiobj* is used to apply the MOGA approach. A Matlab script is used to allocate the TRNSYS model code, specify the uncertain parameter ranges, and configure the MOGA settings to compute the objective functions. To configure the MOGA settings, Baba et al. (2022) suggested a population size of 10 individuals to ensure diversity in novel solutions, with a maximum limit of 200 generations. The optimal solution is deemed reached when there is no change in any Pareto solutions for five consecutive generations. The simulations are conducted on an AMD Ryzen 9 7950X 16-Core Processor 4.5 GHz with 128 GB RAM.

3.3.2.3.2 Objective functions and selection criteria

As Katzin et al. (2022) highlighted, there is no universally accepted statistical metric for evaluating greenhouse models. Each metric has its strengths and weaknesses. Therefore, using a combination of multiple metrics can offer a more comprehensive understanding of the performance of the model. Three metrics have been proposed as objective functions by Baba et al. (2022): Maximum Absolute Difference (MAD), Normalized mean Bias Error (NMBE), and Root Mean Square Error (RMSE) as defined by equations (3.2), (3.3) and (3.4). Each objective function will be computed separately for air temperature and humidity. Hourly metrics are used and calculated using the average of each timestep value over the last hour. This approach reduces the quantity of computed values while magnifying the impact of significant deviations. Normalized and relative metrics have been excluded from consideration due to their sensitivity to the average temperature, which exhibits substantial variability in an unheated greenhouse (Katzin et al., 2022). Furthermore, in an unheated greenhouse characterized by high daytime temperatures and cooler nights, the optimization of NMBE tends

not to match daily temperature extremes, with lower daytime temperatures and higher nighttime temperatures. Therefore, instead of NMBE, the Mean Absolute Error (MAE) is used (3.5).

$$MAD = \text{Max}(|\hat{y}_i - y_i|) \quad (3.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3.3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (3.4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (3.5)$$

Where \hat{y}_i is the measured value and y_i the simulation value for each hour i .

As stated in section 3.3.2.3.1, MOGA yields different Pareto front solutions, not necessarily converging a single solution that satisfies all objectives. Therefore, the 1°C Percentage Error criterion is used to identify the Final Optimum Solution (FOS). The 1°C Percentage Error criterion calculates the percentage of hours where the error between the simulated and measured indoor air temperature exceeds 1°C over the calibration period. It is worth noting that the indoor temperature is the variable used for the FOS selection. It is a key performance metric in greenhouse energy simulation because of its direct relationship to heating consumption. For informational purposes, a 2°C percentage error for indoor air temperature, a 5% percentage error, and a 10% percentage error for relative humidity are also evaluated.

Interior radiation measurements are omitted as calibration variables due to significant discrepancies in the measurements. The small shadows cast by opaque structural elements impact the measured radiation levels at different locations within the greenhouse. Indeed, relying solely on a single radiation meter inside the greenhouse does not provide a comprehensive understanding of the overall solar radiation transmission throughout the greenhouse.

3.3.2.3.3 Calibration periods

Analyzing measured datasets and establishing calibration periods are crucial to calibrating building models (Sansregret & Lavigne, 2015). Chong et al. (2021) reported that calibrating data from a building under free-floating conditions is a significant aspect of multi-stage approaches. This is because the number of uncertain parameters is reduced when there are minimal or no internal loads, such as occupancy, and when the HVAC system is not operating.

In the greenhouse, actual free-floating conditions are seldom present for extended periods due to positive pressure fans for morning dehumidification, heating, and thermal blankets to cover and protect the cultivated crops. However, the vents are kept closed for extended periods to prevent frost damage. As a result, the calibration is completed in three stages using data collected over three distinct periods (Tableau 3.1). Notably, no calibration is undertaken during the colder months because of the ongoing use of thermal blankets to cover and protect the cultivated crops. The three calibration stages are used to calibrate different sets of parameters.

Tableau 3.1 Detail of each of the calibration stages

Calibration stage	Description	Dates	Duration	Measured user-imposed inputs
1	Closed vents greenhouse	November 8 th to 15 th 2022 March 5 th to 12 th 2023	2 x 7 days	Fan actuators
2	Ventilated greenhouse	October 10 th to 31 th 2022	21 days	Fan actuators, Vents actuators
3	Ventilated greenhouse with modeled control	September 19 th to October 10 th 2022	21 days	

The first stage is used to calibrate sensible parameters, excluding the natural ventilation parameters. Natural ventilation plays a significant role in the energy balance. It is characterized by considerable uncertainty, primarily because it heavily depends on wind conditions, which vary considerably over the data acquisition interval (Li et al., 2020). Ideally, mechanical ventilation would also be turned off, but this is impossible due to ongoing greenhouse operations. Mechanical ventilation uses positive pressure fans, and their operating status is set

as an input to the model. Thus, this first phase of calibration is not influenced by errors in modeling the control sequence.

The second stage is used to calibrate the natural ventilation parameters, and all the other parameters are set to values obtained during the first calibration stage. The operating status of the vents and fans is imposed as inputs to the model for each timestep.

Finally, during the third stage of calibration, the control sequence is implemented in TRNSYS. This step confirms the calibration of the model, as the parameter values have already been calibrated.

3.3.3 Validation of the calibrated model

Once the greenhouse model is calibrated, the validation is carried out during a distinct period to ensure that the calibrated parameters perform effectively under different weather and operating conditions. Tableau 3.2 presents the validation periods.

Tableau 3.2 Validation periods of the calibrated model

Validation period	Description	Dates	Duration	Validated variables
1	Unheated greenhouse using the previous year's data	September 18 th to November 1 st 2021	43 days	Indoor air temperature and relative humidity
2	Heated twin greenhouse	October 1 st 2022 to March 1 st 2023	162 days	Indoor air temperature and relative humidity, Heating consumption

First, the calibrated model will be assessed using data from the previous year (September and October 2021) for the same greenhouse. This serves as a validation of the calibration results and quantifies the impact of structural degradation. Second, the calibrated model is tested using data from an adjacent twin greenhouse. The twin greenhouse is minimally heated during winter using a propane air heater with a capacity of 44 kW and an estimated efficiency of 58%. The heating is considered a ventilation heat gain to the greenhouse airnode, delayed by one timestep

(5 min) interval to account for air circulation and the location of the temperature sensor. The temperature, humidity, and heating consumption are validated using data gathered throughout an entire harvest period (October 2022 to March 2023).

Since heating consumption is an absolute scale unit, it can be evaluated against ASHRAE Guideline 14-2014 (ASHRAE, 2014) criteria, which recommends a monthly CV-RMSE (equation (3.6)) under 15% and NMBE (equation (3.7)) under 5% for accurate models prediction.

$$CV(RMSE)(\%) = \frac{100}{\bar{y}_i} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3.6)$$

$$NMBE(\%) = \frac{100}{\bar{y}_i} \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (3.7)$$

Where \bar{y}_i is the average measured value over the studied period.

3.4 Description of the greenhouse energy model

The greenhouse depicted in Figure 3.1 features an envelope composed of double-layer polyethylene inflated films with the end walls being made of 6 mm clear polycarbonate panels. The greenhouse structure is made of 5 cm steel braces, resulting in a disposition such that the glazed surface of the envelope is about 93% of the total surface. The greenhouse floor is covered with bare soil for cultivation.

The greenhouse is cooled by natural and forced ventilation using side vents, and two independently controlled $2.03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ positive pressure fans. The side vents are located 1 m above the ground and are 22 m long by 1 m high. They open gradually when the indoor temperature rises above the cooling set point. The first fan starts when the indoor temperature is above 15°C and the second one if the indoor temperature is above 20°C . The side vents are shut closed for temperatures below the freezing point. Additionally, four air circulation fans are used to continuously mix the air in the greenhouse, each having a flow rate of $0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and dissipating 30 W of heat. Figure 3.3 illustrates an overview of the greenhouse equipment.

Additionally, the heated greenhouse shown in Figure 3.1 is equipped with a propane air heater with a rated capacity of 44 kW.

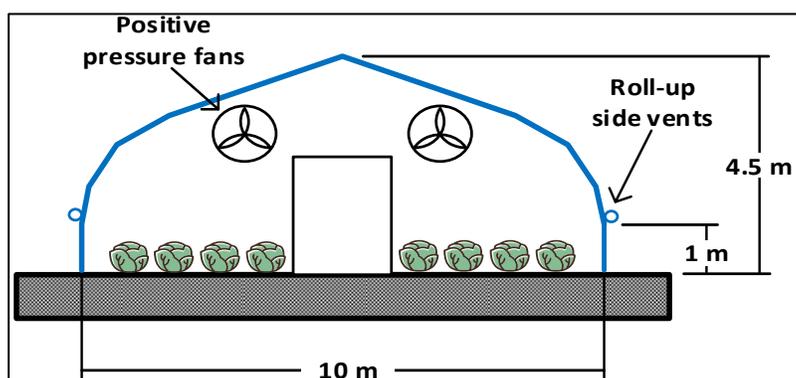


Figure 3.3 Overview of the gothic arch greenhouse systems

3.4.1 Measured data

The twin greenhouses are fully instrumented to monitor the on-site weather conditions and indoor environment conditions. A weather station is installed nearby, about 100 m away. Weather data listed in Tableau 3.3 are recorded and used as inputs to the greenhouse model. Additional information, such as cloud cover, is gathered from nearby meteorological station datasets.

Tableau 3.3 Monitored on-site weather data

Measures	Sampling interval	Instrument	Accuracy
Dry bulb temperature (°C)	5 min	Hobonet S-THB	± 0.2 °C
Relative humidity (%)	5 min	Hobonet S-THB	< ± 5 %
PAR (PPFD)	5 min	Hobonet S-LIA	± 5 %
Global horizontal radiation (W.m ⁻²)	1 h	Campbell Scientific ClimaVUE50	± 5 %
Wind direction (°)	1 h	Campbell Scientific ClimaVUE50	± 5°
Wind speed (m.s ⁻¹)	1 h	Campbell Scientific ClimaVUE50	± 3 %
Atmospheric pressure (kPa)	1 h	Campbell Scientific ClimaVUE50	± 0.05 kPa
Snow depth (cm)	1 h	Campbell Scientific SR50A	± 1 cm

Indoor environment conditions are monitored using a Hobonet Remote Monitoring Station at 5-minute intervals. Details regarding the sensors, including their types and locations, are provided in Tableau 3.4. This instrumentation setup remains consistent across all datasets.

Tableau 3.4 Monitored indoor environment conditions and operating variables of the greenhouse

Measures	Location	Instrument / Source	Accuracy	Used for calibration
Dry bulb temperature (°C)	Center, 1.5 m above the ground	Hobonet RXW-THC	± 0.2 °C	✓
Relative humidity (%)	Center, 1.5 m above the ground	Hobonet RXW-THC	< ± 5 %	✓
PAR (PPFD)	NW corner, 3 m above the ground	Hobonet RXW-LIA	± 5 %	
Ground temperature (°C)	Center, 0.1 m underneath the ground	Hobonet RXW-TMB	± 0.2 °C	
Vents actuators status		Local controller		✓
Fans actuators status		Local controller		✓
Fuel consumption (m ³)		Local controller		✓
Crop yield		Manually registered		

Data are recorded year-round, but in the greenhouses under study, which are dedicated to research, cultivation only occurs during the colder months, from September to March. The greenhouses are primarily used for harvesting leafy green vegetables. The crop growth stage and sizes are based on monitoring conducted by the greenhouse operators. During the summer months, the greenhouses undergo a green manure treatment, followed by covering the ground with a black tarp. This period does not represent the typical operating conditions of a greenhouse. Consequently, only data collected between September and March are used to complete the calibration of the model.

During that period, the outdoor air temperature fluctuated between -31°C and 25°C with an average value of 0.1°C, while the outdoor air relative humidity was, on average, 79%. In terms of PAR, it can reach a value of 1690 $\mu\text{mol}\cdot[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]^{-1}$. The maximum indoor PAR is slightly different between the unheated (716 $\mu\text{mol}\cdot[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]^{-1}$) and the heated (791 $\mu\text{mol}\cdot[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]^{-1}$) greenhouses. The difference between the two greenhouses' indoor temperatures is, on average, 1.4°C when there is no heating or thermal blanket.

3.4.2 Model creation

An overview of the TRNSYS greenhouse model and the information flow is illustrated in Figure 3.4

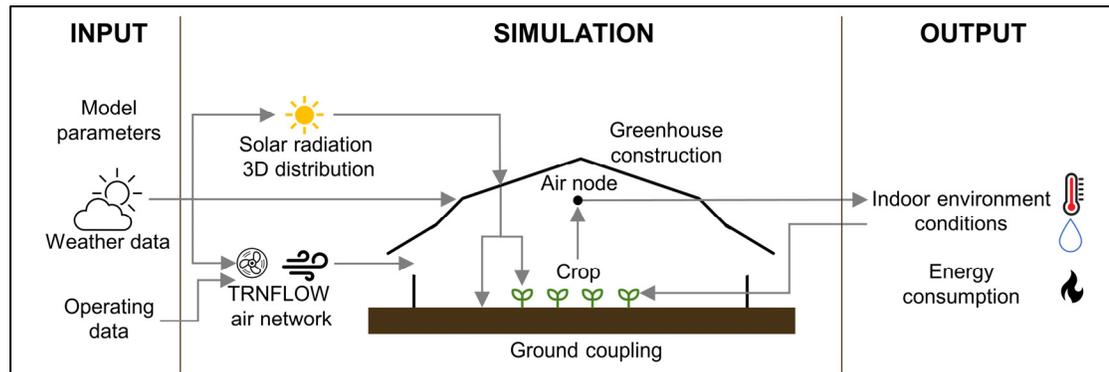


Figure 3.4 Simulation overview

The model includes six main components: (1) the weather & operating data; (2) the greenhouse construction; (3) the solar radiation (3D distribution); (4) the infiltration and ventilation (TRNFLOW air network); (5) the ground coupling; and (6) the crop. TRNSYS types or extensions used to simulate these components are listed in Tableau 3.5. The components of the TRNSYS model and the initial parameters are detailed in the section 3.9.

Tableau 3.5 TRNSYS components used in the greenhouse model

Model component	TRNSYS type or extension	Information specified
Weather & operating data	User specified for model calibration with measured data (Type 9)	5-minutes interval data
Greenhouse construction	<ul style="list-style-type: none"> · TRNS3d plugin for SketchUp for the geometry · Type 56 for construction materials and thermal characteristics 	<ul style="list-style-type: none"> · Orientation · Construction properties · Windows physical properties · Wall boundary conditions
Solar radiation	<ul style="list-style-type: none"> · Type 16 – Solar processor · Type 56 radiation distribution modes 	<ul style="list-style-type: none"> · Perez et al. (Perez et al., 1990) model for the tilted surface · Detailed beam radiation model · Detailed diffuse radiation model
Infiltration / Ventilation	<ul style="list-style-type: none"> · TRNFLOW air network · Type 971 for stages 1-2-3-4 (side vents / side vents + fans 1 & 2) for controls 	<ul style="list-style-type: none"> · Wall averaged wind pressure coefficients · Wind velocity profile around the greenhouse · Airflow network and link definition
Ground coupling	Type 1224 – Slab on grade	<ul style="list-style-type: none"> · Soil nodding map · Ground thermal properties · Far-field and deep-earth boundary conditions · Building underground perimeter insulation
Crop	User-defined model (Talbot & Monfet, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> · Geometrical parameters of the cultivated crops · Crop biological parameters

3.5 Model calibration

The calibration of the greenhouse energy model encompasses several different steps, including the identification of uncertain parameters, a sensitivity analysis to reduce the number of uncertain parameters, and the calibration of the remaining uncertain parameters using the Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) as described in sections 3.5.1 to 3.5.3.

3.5.1 Identification of the model uncertain parameters

Identifying uncertain parameters involves three steps, as described in section 3.3.2.1. After the first two steps, a total of 48 uncertain parameters remained. Subsequently, a clustering process is applied to a subset of these parameters, while others that cannot be effectively clustered are used individually. These include building capacitance, the fraction of transmitted solar radiation directly converted to sensible energy (FTSR), and the vents discharge coefficient. Details of the clustering procedures for each uncertain parameter are provided in the following paragraph, resulting in 16 parameters (Tableau 3.6) classified as uncertain.

Calibration period	Parameter	Units	Initial value	Bounds	Step size
Closed vents greenhouse	Building capacitance	kJ.K^{-1}	1100	[1100 - 1900]	100
	Ground diffusivity	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	3.5E-7	[1E-7 - 1E-6]	1E-7
	Cover external convection coefficient factor.	-	1	[0.5 - 2]	0.1
	Cover internal convection coefficient factor	-	1	[0.5 - 2]	0.1
	Floor convection coefficient factor	-	1	[0.5 - 2]	0.1
	Floor LWR coefficient	-	0.90	[0.5 - 0.96]	0.02
	PE LWR coefficient	-	0.60	[0.5 - 0.96]	0.02
	PC LWR coefficient	-	0.89	[0.5 - 0.96]	0.02
	Floor SWR coefficient	-	0.80	[0.6 - 0.96]	0.02
	PE SWR coefficient	-	0.80	[0.6 - 0.96]	0.02
	PC SWR coefficient	-	0.76	[0.6 - 0.96]	0.02
	FTSR	-	0	[0 - 0.15]	0.01
	Crop size (LAI)	$\text{m}^2_{\text{projected}}.\text{m}^2_{\text{cultivated}}$	2.1	[0 - 6]	0.1
Infiltration flow coefficient	$\text{kg}.\text{s}^{-1} @ 1\text{Pa}$	0.15	[0.05 - 0.25]	0.01	
Wind pressure coefficient	-	0.70	[0.5 - 1]	0.02	
Ventilated greenhouse	Vents discharge coefficient	-	0.2	[0.1 - 0.6]	0.01

Legend - PE: Polyethylene; PC: Polycarbonate; LWR: Longwave radiation; SWR: Shortwave radiation; FTSR: Fraction of transmitted solar radiation directly converted to sensible energy; LAI: Leaf area index

Tableau 3.6 Uncertain parameters and bounds

The thermo-chemical properties of the ground (thermal conductivity (λ), heat capacity (Cp), and density (ρ)) are consolidated under “ground diffusivity” (e.g., $\alpha = \frac{\lambda}{\rho * Cp}$). A multiplicative factor is applied as an alternative to modifying the empirical equations for the surface's convection coefficients. Hence, the empirical equations parameters are regrouped under the “convection coefficient factor”. For radiometric properties of the greenhouse surfaces, given that the sum of longwave transmissivity (τ), emissivity (ε), and absorptivity (σ) of surfaces equals 1, they are consolidated into a single parameter, “surface longwave radiation (LWR) coefficient”. The “surface LWR coefficient” bounds listed in Tableau 3.6 pertain to the emissivity of the surface. The values of the other parameters are adjusted proportionally based on their weights. For example, for the initial values $\varepsilon=0.3$, $\tau=0.6$ and $\sigma =0.1$, the weight of τ ($w_\tau = \frac{\tau}{\tau+\sigma}$) is 0.857. Then, for an emissivity of $\varepsilon=0.4$, $\tau = (1 - \varepsilon) * w_\tau = 0.514$ and $\sigma = (1 - \varepsilon - \tau) = 0.086$. This approach also applies to shortwave transmissivity, reflectivity (ρ), and absorptivity of the building surfaces (e.g., $\tau + \sigma + \rho = 1$), which are grouped under “surface shortwave radiation (SWR) coefficient”. The “SWR coefficient” bounds for polyethylene (PE) and polycarbonate (PC) covers are represented by the transmissivity coefficients. In contrast, the opaque floor surface is represented by the absorptivity coefficient. All relevant parameters used to model the interaction between crops and their environment are grouped under “Crop size” because the equations describing the “big leaf” model (Section 3.9.7) rely on the heat transfer surface area, the leaf area index (LAI). All air links' infiltration coefficients and power law exponents are grouped for infiltration flow. The modified parameter for this group is the overall infiltration coefficient, with its bound values shown in Tableau 3.6. This adjustment affects the values of all air links infiltration coefficients, as described in section 3.9.6, while the exponents remain fixed. Finally, for the wind pressure coefficients, all wind pressure coefficients of every wall for all four wind directions (N-S-E-W) are also grouped. For this group, only the values of the windward wind pressure coefficient of each wall are altered, with all others remaining constant.

3.5.2 Sensitivity analysis

The sensitivity analysis involves calculating global sensitivity indices, as defined by equation (3.1), to provide insight into the contribution and significance of each parameter to the simulated output values during the calibration period, as shown in Figure 3.5. A total of 2040 samples are used to compute the global sensitivity indices. This sample size has proven adequate to ensure the sum of the global sensitivity indices nearly equals 1.

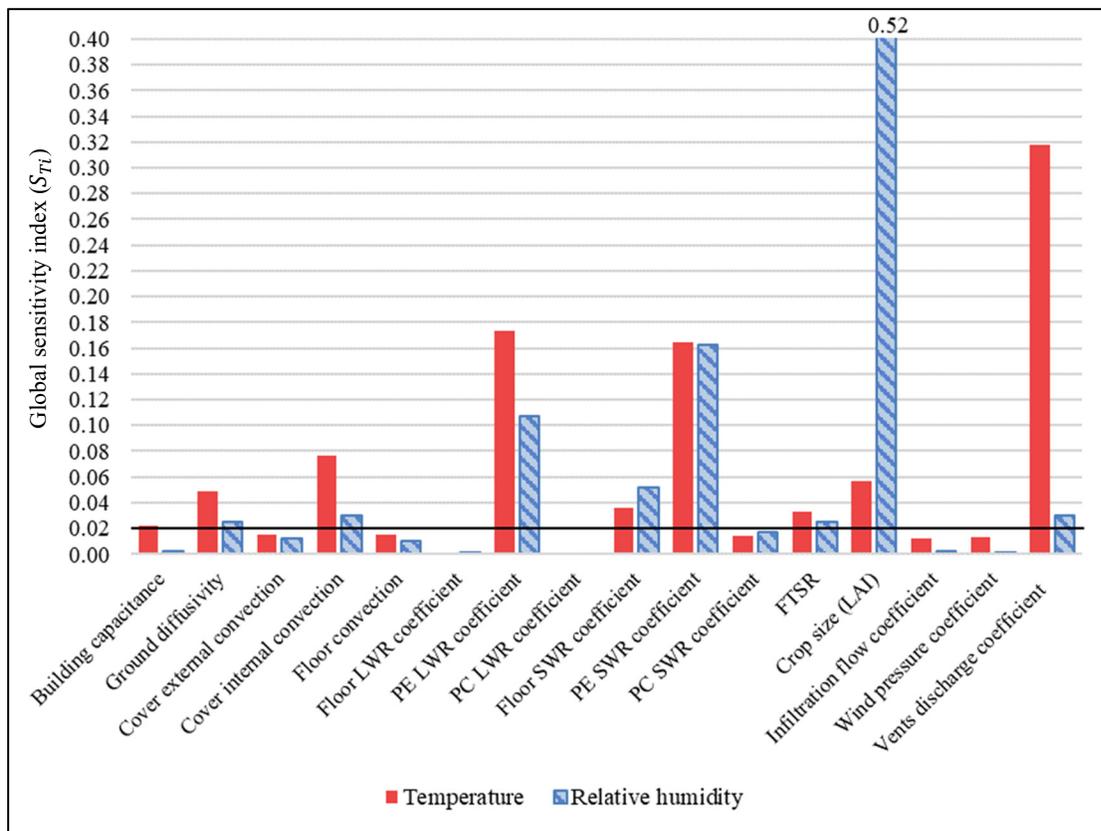


Figure 3.5 Global sensitivity indices of identified uncertain parameters

Parameters having a global sensitivity index higher than 0.02 for temperature and humidity are identified as sensitive. This choice deviates from the suggested 0.05 value (Baba et al., 2022) to ensure sufficient parameters for the calibration process. Nine parameters meet the criteria for the temperature sensitivity index and eight for the relative humidity sensitivity index. The eight humidity-sensitive parameters are also temperature-sensitive, as illustrated in Figure 3.5. These are building capacitance, ground diffusivity, cover internal convection coefficient, PE

LWR coefficient, floor SWR coefficient, PE SWR coefficient, FTSR, crop size (LAI), and vents discharge coefficient.

These parameters are assumed to be constant over time. However, the model uses an average LAI that is associated with the size of each crop. The average LAI varies over time in a greenhouse with irregular or non-uniform crop growth stages. LAI values are calibrated during each calibration stage to account for this variation. As a result, four different LAI values will be calibrated, considering that the first stage consists of two separate weeks.

Figure 3.5 shows that the vents discharge coefficient displays the highest sensitivity index for indoor air temperature. This reinforces the assumption of its significant impact and justifies conducting a multi-stage calibration process. The vents discharge coefficient will be calibrated independently in the second calibration stage.

3.5.3 Calibration of uncertain parameters

Based on the sensitivity analysis, nine parameters have been identified for the multi-stage calibration. The estimation of these parameter values is performed using three datasets. It involves the minimization of six objective functions, with three metrics (MAE, RMSE, and MAD) for each variable (T_i and RH_i).

In the first calibration stage, eight uncertain parameters are identified following the sensitivity analysis and are calibrated. However, since the calibration is conducted over two separate weeks where the greenhouse is only ventilated with positive pressure fans, the LAI is calibrated separately for each of the two weeks (November 8th to 15th, 2022 and March 5th to 12th, 2023), resulting in a total of nine parameters to be calibrated. In total, there are more than 8 000 000 000 possible solutions. The Pareto solutions are obtained after 94 generations with 940 simulations for this first calibration stage. From the Pareto solutions, the Final Optimum Solution (FOS) is for the lower percentage of hours where the error between the simulated and measured indoor air temperature exceeds 1°C over the calibration period.

Seven parameters are set to their previously calibrated values in the second calibration stage. Only the LAI and the vents discharge coefficient are calibrated during this stage. As explained in previous sections, a new LAI value is calibrated for each period. The model is calibrated from October 10th to 31st, 2022. The Pareto front solutions are obtained after 70 simulations for the second calibration stage since only two parameters are calibrated (1 650 solutions).

In the third calibration stage, the model includes the control sequence, replacing the previously used input data for the status of the actuators of the vents and fans. The modeling of the opening of the vents and fan operation is described in Section 3.9.6. The comparison covers the period from September 19th to October 10th, 2022. The only parameter calibrated during this period is the LAI. The calibration process extended over the minimal span of 50 simulations (60 solutions).

The calibrated model parameter values from the FOS in all three stages are presented in Tableau 3.7. These parameters remained constant throughout the simulation. The LAI values increased from 2.0 to 2.3 between September and October, with a slight decrease to 1.8 in November. According to the greenhouse yield data, this is plausible as most crops are transplanted in September, with a portion harvested in October.

Tableau 3.7 Values of the calibrated uncertain parameters.

Calibration stage	Parameter	Units	Lower bound	Upper bound	Value
1	Building capacitance	kJ.K^{-1}	1100	1900	1300
	Ground diffusivity	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	1E-7	1E-6	1 E-7
	Cover internal convection coefficient factor	-	0.5	2	1.5
	PE emissivity coefficient	-	0.5	0.96	0.94
	Floor solar absorptivity	-	0.6	0.96	0.72
	PE Solar Transmissivity	-	0.6	0.96	0.80
	Solar-to-air fraction	-	0	0.15	0.04
	LAI (November 2022)	$\text{m}^2_{\text{projected}}.\text{m}^2_{\text{cultivated}}$	0	6	1.8
	LAI (March 2023)	$\text{m}^2_{\text{projected}}.\text{m}^2_{\text{cultivated}}$	0	6	1.4
2	Vents discharge coefficient	-	0.1	0.6	0.14
	LAI (October 2022)	$\text{m}^2_{\text{projected}}.\text{m}^2_{\text{cultivated}}$	0	6	2.3
3	LAI (September 2022)	$\text{m}^2_{\text{projected}}.\text{m}^2_{\text{cultivated}}$	0	6	2.0

These values appear to be well-distributed within the range, avoiding too many extremes, which confirms the appropriateness of the selected bounds (Mai, 2023). The discharge coefficient of the vents is at the lower end of its range, suggesting that the insect-proof net mesh size is small and might be clogged.

3.6 Results

The results obtained following the calibration are first presented, followed by the model validation results.

3.6.1 Calibration results

The qualitative indoor temperature and relative humidity comparison between measurements and simulation over all three calibration stages are shown in Figure 3.6 and Figure 3.7, respectively.

3.6.1.1 Indoor air temperature

The indoor air temperature, measured and simulated throughout all calibration stages, displays a similar pattern in the data most of the time. During the November calibration period, the prevailing overcast conditions led to minimal diurnal temperature fluctuations (Figure 3.6(a)). On the contrary, the periods of September (Figure 3.6(d)), October (Figure 3.6(c)-Figure 3.6(d)), and March (Figure 3.6(b)) are characterized by sunnier conditions, facilitating the calibration of parameters related to solar radiation. The indoor temperature closely follows the fluctuation in outdoor temperature and global irradiance. There is a variation in overestimating and underestimating the daytime temperatures, indicating that the calibration process strives for equilibrium. The same behavior is observed during nighttime, with predicted temperatures sometimes overestimated and sometimes underestimated. This suggests that it is not just one phenomenon that is not well modeled or omitted but instead arising from various sources of uncertainty, including parameter, model form, and observation uncertainty (Chong et al., 2021).

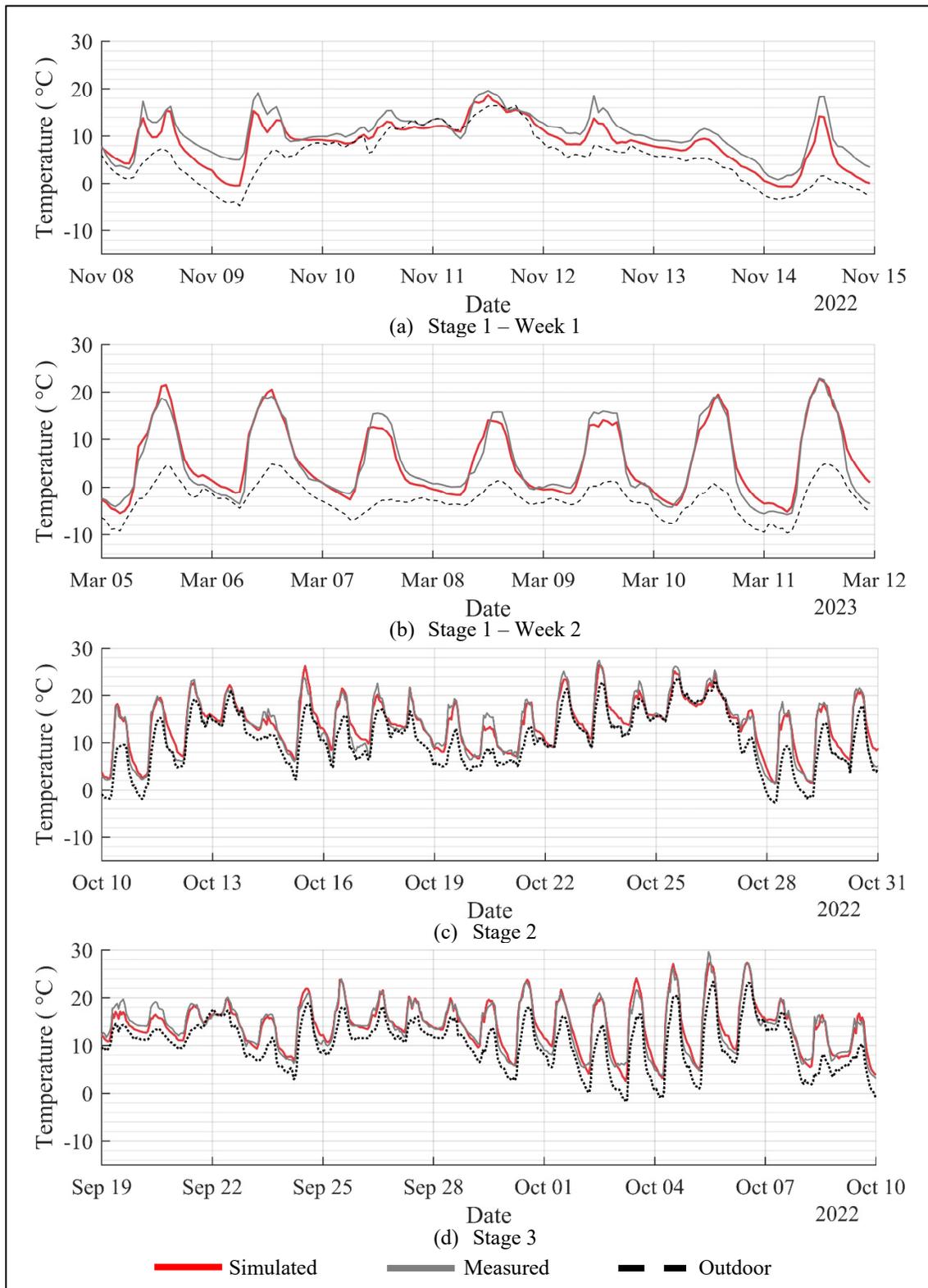


Figure 3.6 Comparison of indoor air temperature between measurements and simulation results from (a) calibration stage 1 – Week 1; (b) calibration stage 1 – Week 2; (c) calibration stage 2; and (d) calibration stage 3

3.6.1.2 Indoor air relative humidity

For the relative humidity, Figure 3.7 presents the measured and simulated indoor air relative humidity across all the calibration stages, including the range of measurement uncertainty (shaded area). A discernible pattern persists, albeit less evident than the one observed for the indoor air temperature. Figure 3.7(a) and Figure 3.7(b) reveal disparities, with instances of both overestimation and underestimation. In the operating context of a greenhouse with uncontrollable parameters, predicting the humidity level becomes challenging (Zhou et al., 2023). During hotter periods when vents are frequently open (September and October), the simulated relative humidity aligns with measured data, as shown in Figure 3.7(c)-Figure 3.7(d). This follows the pattern of high relative humidity at night, decreasing during the day as the temperatures rise. Also, in Figure 3.7(d), the simulated relative humidity is more accurate at the beginning of the period. Towards the end, there is an overestimation of relative humidity, which could be attributed to an overestimation of the LAI, which does not account for crop harvesting. The LAI value represents an average value over the entire period, which is a simplification, overlooking crop growth and harvesting processes. According to the greenhouse yield data, this is plausible as most crops are transplanted in September and harvested in October.

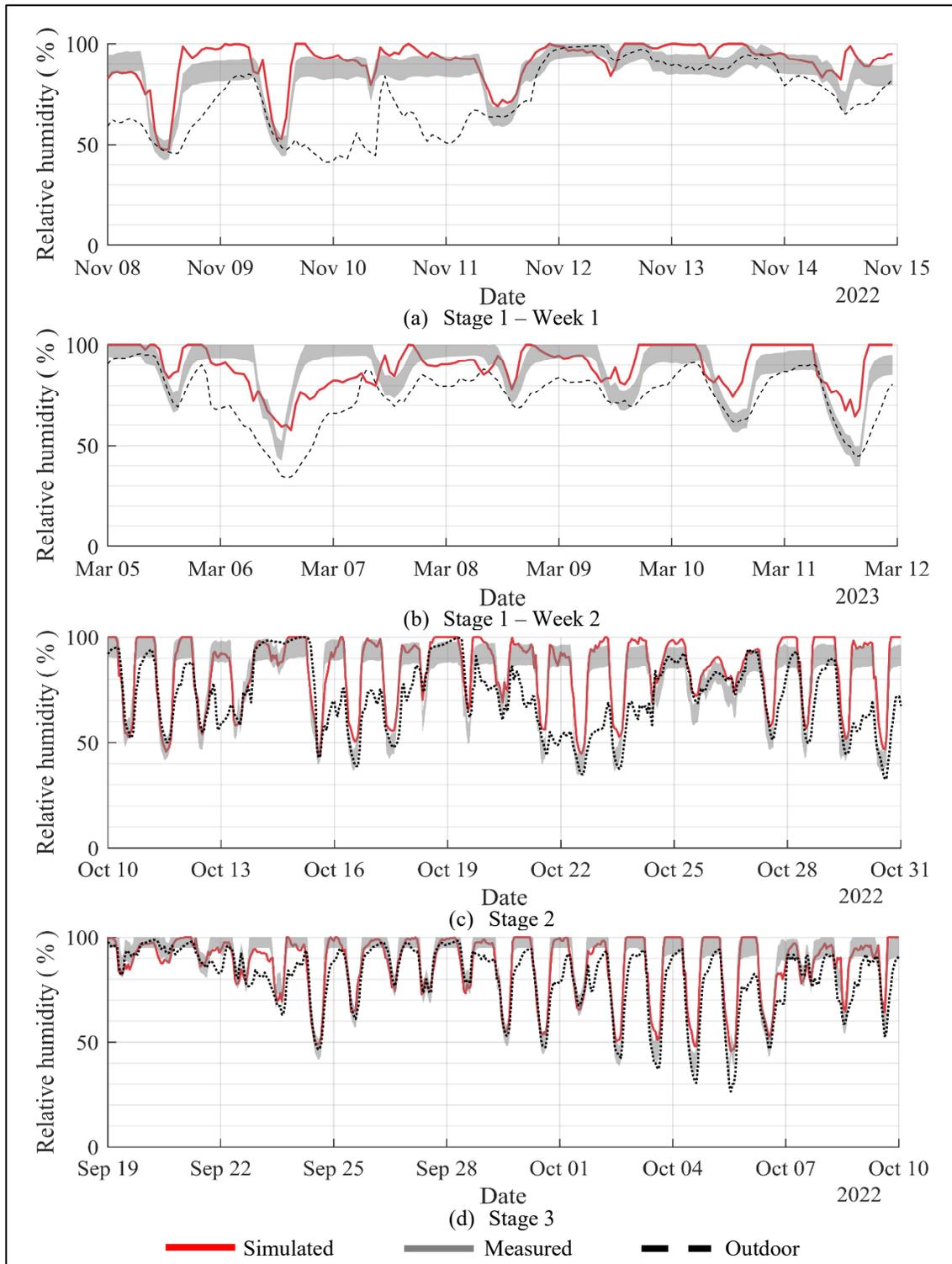


Figure 3.7 Comparison of indoor air relative humidity between measurements and simulation results from (a) calibration stage 1 – Week 1; (b) calibration stage 1 – Week 2; (c) calibration stage 2; and (d) calibration stage 3

3.6.1.3 Overview of the multi-stage calibration

The calibration criteria achieved with each stage FOS are presented in Tableau 3.8, providing a detailed breakdown of the performance in each calibration stage and the initial and calibrated model over all periods. The indoor air temperature and relative humidity simulations improved from the initial model. The hourly root mean square error (RMSE) over 56 days is reduced from 2.9°C to 1.6°C for the indoor temperature while slightly improving from 8.5% to 8.3% for the humidity. The predictions of the indoor environment conditions are more accurate in stages 2 and 3, even though most parameters are calibrated during the first stage under different weather conditions and operating modes. This supports effective calibration of the parameters selected in the first and second calibration stages.

Moreover, the increased accuracy of the predicted indoor temperature and relative humidity compared to when the measured status of the actuators is provided confirms the successful implementation of the control sequence. Simulation errors are more critical when the input data forces the vent openings before the simulated temperature reaches the set point.

Tableau 3.8 Hourly results for each of the calibration stages

Calibration stage	Indoor air temperature			Indoor air relative humidity			Selection criteria			
	RMSE (°C)	MBE (°C)	MAD (°C)	RMSE (%)	MBE (%)	MAD (%)	1°C Error (%)	2°C Error (%)	5% Error (%)	10% Error (%)
Initial model	2.9	1.3	9.8	8.5	-2.7	29.8	48	33	14	4
1	2.2	-0.8	5.4	9.7	3.3	30.2	19	9	44	20
2	1.5	0.4	4.5	7.2	4.4	27.7	29	15	50	9
3	1.3	0.2	3.8	5.1	-1.2	17.0	22	10	9	2
Complete	1.6	-0.01	6.8	8.3	-1.0	44.9	24	13	19	5

Additional metrics found in the literature, such as the Coefficient of determination (R^2) (equation (3.8)), the Coefficient of Variance of the Root Mean Square Error (CV-RMSE), and the Normalized Mean Bias Error (NMBE), are also tabulated (Tableau 3.9). Since there are no standardized validation criteria, using these additional metrics enables a comparison of the model's prediction with those of other models in the literature.

$$R^2(-) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2} \quad (3.8)$$

Tableau 3.9 Additional hourly statistical metrics for each of the calibration stages

Calibration stage	Indoor air temperature (°C)				Indoor air relative humidity (%)			
	Stage average	CV-RMSE (%)	NMBE (%)	R ² (-)	Stage average	CV-RMSE (%)	NMBE (%)	R ² (-)
Initial model	12.3 °C	23.9	11.0	0.64	85.7 %	9.9	-3.2	0.68
1	7.8 °C	28.1	-10.7	0.88	86.8 %	11.2	3.8	0.24
2	13.5 °C	11.4	2.7	0.92	80.3 %	8.9	5.5	0.81
3	14.1 °C	9.0	1.1	0.94	88.1 %	5.7	-1.4	0.88
Complete	12.3 °C	13.2	-0.01	0.92	85.7 %	9.7	-1.2	0.76

The calibration results meet the recommendation in ASHRAE Guideline 14-2014 (ASHRAE, 2014) for hourly calibration ($R^2 > 0.75$; $CV-RMSE < 30\%$; $NMBE < 10\%$), except the R^2 for the indoor air relative humidity during the first stage. Even the normalized metrics for the first calibration stage, where the average temperature of 7.8°C does not capture the significant temperature variability over the period (min: -5.7°C and max: 22.9°C), are within the recommended criteria.

Globally, the results presented in Figure 3.6 & Figure 3.7 and Tableau 3.8 & Tableau 3.9 collectively demonstrate that the multi-stage calibration yielded satisfactory results across all periods for indoor air temperature and relative humidity. These results instill confidence that the calibrated parameters closely reflect real-world conditions and that the model accurately replicates observed thermal behavior. This level of accuracy and confidence justifies advancing to the validation stage.

3.6.2 Validation results

Following the multi-stage calibration, the calibrated model is validated over two periods: (1) data from the preceding year (2021) for the unheated greenhouse, and (2) data, including the heating consumption, recorded over the whole operating season (October 2022 to March 2023) for the minimally heated greenhouse.

The validation period for the unheated greenhouse spanned 43 days in Autumn 2021, starting at the beginning of the harvest season in September and ending in the final days of October, as the use of thermal blankets typically begins after this period. The crop growth stages are assumed to be similar to those of 2022; hence, the previously calibrated LAI values are used.

Figure 3.8 compares the measured and calibrated model prediction of indoor air temperature (a) and the relative humidity (b) for the unheated greenhouse. The results show that the calibrated model has an overall high accuracy. However, discrepancies are observed during specific daytime periods since solar radiation gains influence daytime temperatures. One potential explanation for these discrepancies is that the double polyethylene cover had a higher solar transmissivity coefficient in 2021, which degraded over time, as previously observed in harsh weather conditions for polyethylene covers (Al-Helal et al., 2022) and can annually decline by 2-4% (Nijskens et al., 1990).

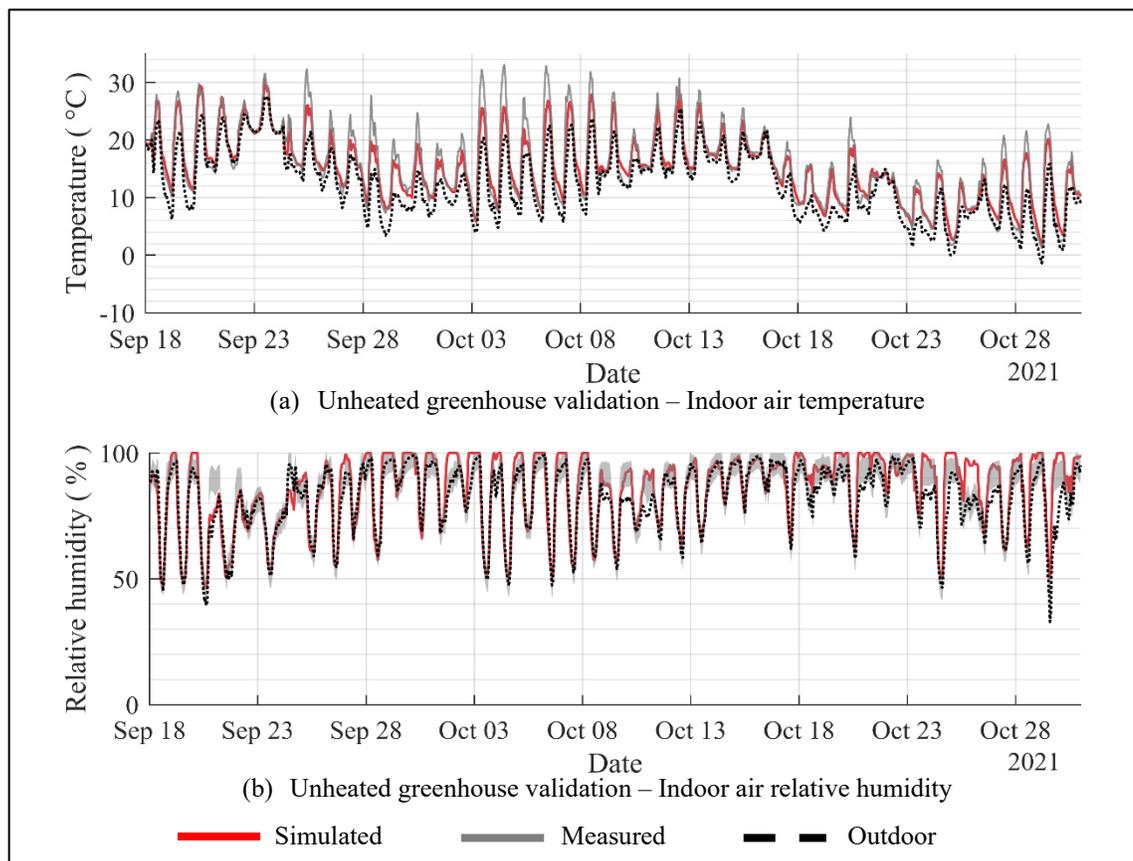


Figure 3.8 Comparison of indoor air (a) temperature and (b) relative humidity between measurements and simulation results of the unheated greenhouse in 2021

For the second validation, using data from the minimally heated twin greenhouse, a 44-kW air heater is added to maintain the indoor air temperature above the setpoints presented in Tableau 3.10. Section 3.9.8 details the air heater implementation.

Tableau 3.10 Heating setpoints during the heated greenhouse validation period

Sequence	Heating period	Setpoint
1	October 1 st to November 21 st	6 °C
2	November 21 st to February 28th	2 °C

The validation period extended across 162 days of operation (October 2022 to March 2023). The crop growth stages, specified using the LAI, are assumed to be similar to those of the unheated greenhouse. Hence, the previously calibrated LAI values are used. For the periods not included as part of the calibration process, the LAI is fixed at 1.6, the average value over the November and March calibration periods.

Figure 3.9 compares the measured and calibrated model prediction of (a) the indoor air temperature and (b) the relative humidity (b) for the heated greenhouse for the week where there was a change in the heating set point from 6°C to 2°C. As illustrated in Figure 3.9(a), the indoor air temperature closely follows the heating set point during nighttime. Figure 3.9(b) shows that the model overestimates the indoor relative humidity during daytime periods. This discrepancy might be explained by the fixed LAI value used.

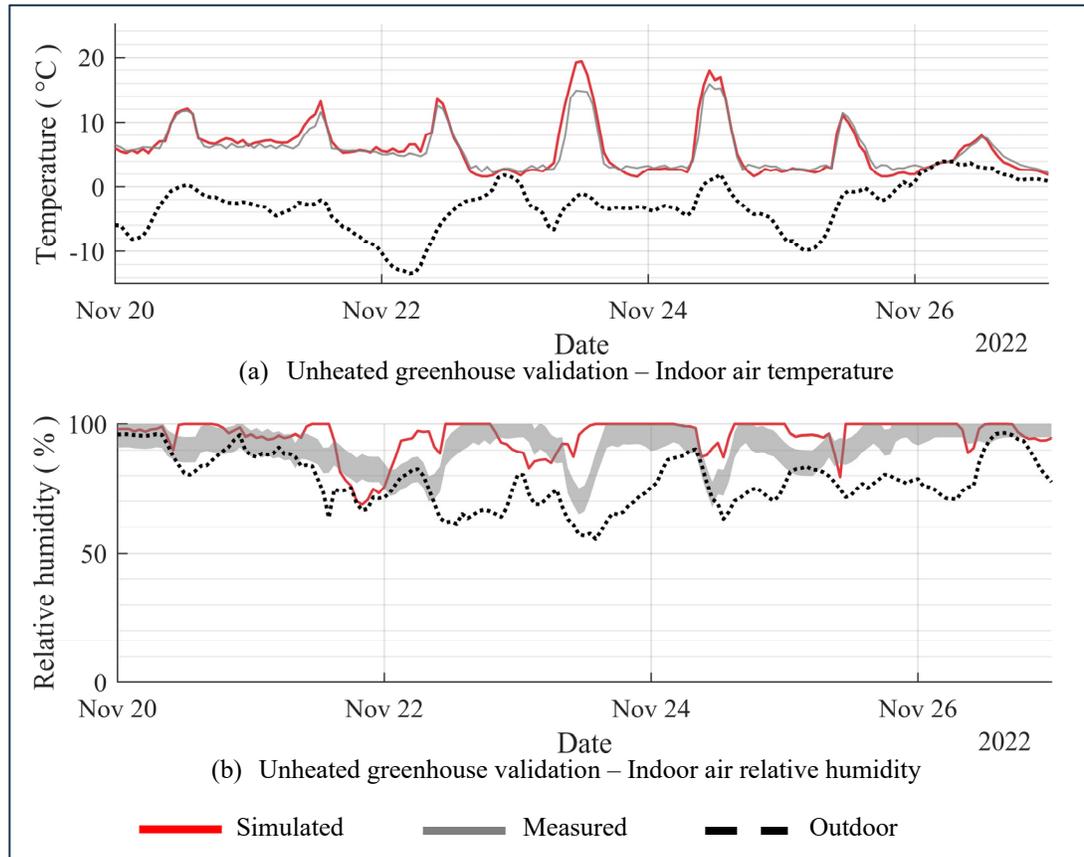


Figure 3.9 Comparison of indoor air (a) temperature and (b) relative humidity between measurements and simulation results of the heated greenhouse for the week of 20 to 27 November 2022

Tableau 3.11 presents the statistical metrics for the calibrated greenhouse model, calculated using the complete calibration dataset, and for both validation periods, including the heating consumption for the second validation. The values for the initial models are those for the heated greenhouse from October 1st, 2022, to March 1st, 2023. Monthly heating consumption data are aggregated using a weather normalization technique and manually recorded measurements taken over irregular periods (Eto, 1985). The heating consumption represents the amount of energy the air unit heater provides to maintain the required temperature in the greenhouse.

Tableau 3.11 Results of the validation of the greenhouse model

Validation data	Indoor air temperature			Indoor air relative humidity			Heating consumption	
	RMSE (°C)	MBE (°C)	1°C Error (%)	RMSE (%)	MBE (%)	5% Error (%)	NMBE (%)	CV-RMSE (%)
Initial model	2.4	1.5	48	7.3	2.2	30	-18.6	20.0
Calibrated	1.6	-0.01	24	8.3	-1.0	19	-	-
Unheated	1.8	-0.5	18	5.3	1.5	18	-	-
Heated	1.9	0.5	29	8.4	3.4	32	3.7	9.3

The calibration improved the simulated indoor air temperatures while ensuring the indoor relative humidity remained acceptable. For both validation periods, the RMSE over the indoor air temperature and relative humidity closely match reported data in the literature (Katzin et al., 2022). The results show a RMSE below 2°C for temperature and below 10% for relative humidity. However, a direct comparison may not be representative due to disparities in validation periods and metrics. The metrics of calibrated value are similar to those obtained for the unheated and heated greenhouses, demonstrating the validity of the model. The indoor air relative humidity remains at the same acceptable accuracy level, close to the measurement accuracy of the sensor of 5%; natural ventilation in the greenhouse results in the indoor humidity mirroring the outdoor levels.

When comparing monthly heating consumption, the results are under the recommended range by ASHRAE Guideline 14-2014 (ASHRAE, 2014). The yearly measured and simulated heating consumption are 37.6 GJ and 38.9 GJ, respectively, which implies a relative error of +3.7%. Figure 3.10 shows the monthly heating consumption of the initial and calibrated model compared with the measured data. The calibrated model leads to good results in November and December, but the heating consumption is underestimated by 23% in October and overestimated by 10% in January and February. Ideally, the relative errors in monthly heating consumption should remain below 10%. However, the simulation results effectively capture the subtle distinctions in monthly heating consumption between January and February (a 3% gap), thereby reinforcing confidence in the trends observed in the obtained results. Furthermore, the observed variation in October is likely attributed to low heating demands,

with the system operating only 10 days throughout the month. A slight temperature overestimation during this period can potentially prevent the heating system from turning on.

The calibration improved the predictions for the heating consumption. However, the initial model, which used parameters from the literature, appeared to underestimate the greenhouse's heat loss, resulting in lower heating consumption throughout all months, particularly in October, November, and December.

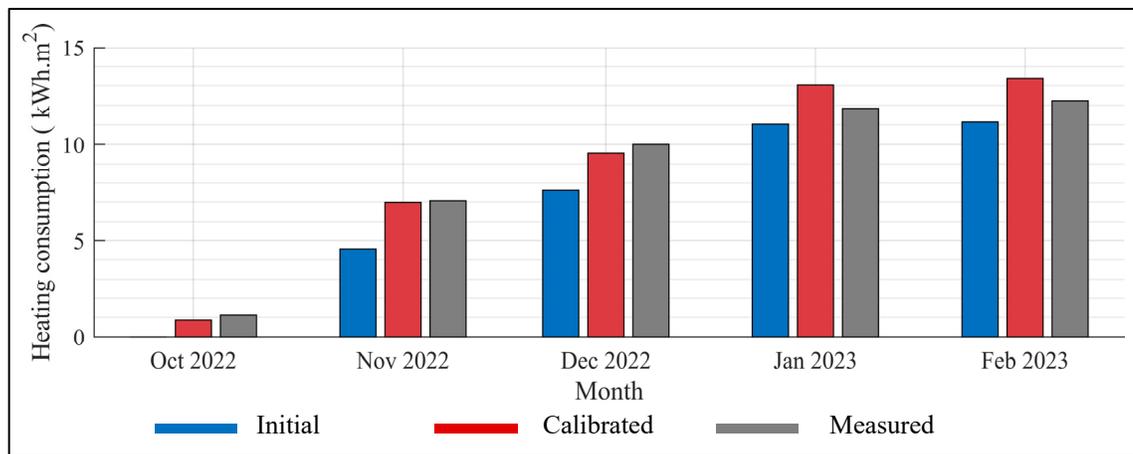


Figure 3.10 Comparison of heating consumption between measurements and simulation results of the minimally heated greenhouse

Ultimately, the statistical metrics and the trend comparison bolster confidence in the model's applicability for future years under weather conditions like those prevailing during the validation process.

3.7 Discussion

This study aims to develop a small-scale greenhouse energy model using TRNSYS to provide reliable predictions for greenhouse indoor environment conditions and energy consumption to support future analysis. The model closely predicts the unheated and heated indoor environment conditions of the greenhouse. The RMSE of air temperature is lower than 2°C, and the RMSE of relative humidity is lower than 10%. These values are within the range of

most greenhouse models (Katzin et al., 2022). Regarding heating consumption for the heated greenhouse, the monthly NMBE in model predictions (+3.7%) is small, demonstrating that the model captures the heating profile, even in a minimally heated greenhouse. The monthly heating consumption accuracy is below the recommended levels in building performance simulation (ASHRAE, 2014).

The predictions of heating consumption could be further improved. The validation results are inconsistent compared to the calibration results. There appears to be a misrepresentation of thermal interaction within the greenhouse during January and February. The presence of snow could explain this difference as it acts as an insulator for the bottom of the greenhouse, decreasing heat loss and infiltration. The conditions during the first calibration stage resemble those of the heating season, with lower temperatures and closed ventilation vents. However, extremely cold temperatures, limited sunlight hours, and substantial snowfall, characteristic of the winter in this area, are not accounted for. It suggests that the model might need to be calibrated over a typical winter period to identify more representative constant parameter values for all seasons. The lack of data during free-floating winter periods contributed to the observed overestimation. Maintaining constant parameters throughout all seasons may not accurately reflect the dynamic nature of the system. It may be necessary to incorporate weather-dependent equations to adjust model parameters for improved representation.

The model also exhibits a systematic error in simulating relative humidity. The observed discrepancy in simulated relative humidity compared to measured values could be attributed to the crop modeling approach. The crop model was initially developed for lettuce crops using data from factory conditions (Graamans et al., 2017). Therefore, its application under cold conditions, such as during nights with temperatures below 0°C (March 6th to 7th), might not be appropriate, as it is used outside the conditions for which it was initially designed. It is worth noting that chilling injury from cold temperatures tends to affect the biological activity of crops (Morris, 1982). Furthermore, the model parameter values are based on the lettuce experiments, potentially not accurately representing the diverse varieties of leafy greens cultivated in the greenhouse. The crop model should be validated over a broader range of indoor environment

conditions and crop variety. Despite accounting for the limitations inherent to the model development, the crop model performs effectively when combined with a calibration process. Compared to other greenhouse validation studies, the datasets used in this study are relatively long, lasting 43 days and 162 days. Ideally, validating a greenhouse energy model for annual energy analysis requires a complete year of data. However, Katzin et al. (2022) and Beaulac et al. (2023) reviews revealed that greenhouse model validations often use considerably smaller datasets. Through extensive validation, various discrepancies in the model were identified, highlighting the importance of an extended validation period that may uncover issues not apparent in a shorter timeframe. This suggests that short validation periods can show that the model is valid, even with discrepancies. It emphasizes that the model performances may vary across weather conditions and operation modes. The observed differences in simulated and measured heating consumption show the importance of having precise knowledge of the operations occurring within a greenhouse.

One of the strengths of the study lies in the data used, which are sourced from a typical small-scale greenhouse in commercial operation. Katzin et al. (2022) and Beaulac et al. (2023) reviews also indicated that greenhouse model validations frequently rely on experimental greenhouse and research compartments data instead of commercially operated greenhouses. The validation based on non-commercially operated greenhouses does not guarantee that the model will be applicable for assessing the performance of commercial greenhouses, including the associated operation uncertainties. In an operating greenhouse, in contrast to an experimental one where all operations are closely monitored, having a comprehensive understanding of ongoing operations is crucial.

Nevertheless, despite the extensive validation conducted in this paper compared to existing literature, it relies on data measured at a single site and with numerous parameters that had to be estimated and could not be directly measured. Using data from multiple greenhouses in different weather conditions and conducting a validation over an entire year could be used to evaluate further and improve the TRNSYS model. Extensive validation assures that the calibration does not merely compensate for modeling errors.

The proposed calibration method attained satisfactory model predictions, as reported results showed. The approach is time-consuming but proves worthwhile when applied to a typical greenhouse format that can be replicated and used for further analyses. In terms of computational power requirements, the sensitivity analysis demonstrated its effectiveness in reducing the number of parameters that needed adjustment, resulting in a smaller optimization domain, with the potential for the 8 000 000 000 possibilities to be even higher. Nevertheless, the calibration time could be optimized by selecting a higher sensitivity index criterion to include fewer sensitive parameters without affecting the results.

The current calibration processes are typically ad-hoc, involving multiple manual iterations with user intervention based on expert judgment, lacking a well-defined, data-driven procedure. However, some literature studies have proposed methods for addressing calibration issues. The proposed calibration method is well-detailed in this paper and replicable in other studies. While obtaining data for multi-stage calibration is not always feasible, single-stage MOGA is still recommended.

Finally, key attributes of the model are its replicability and that it is developed in TRNSYS, where an important library of components is available, enabling the integration of various HVAC and renewable energy systems. Including all the detailed modeling approaches available in TRNSYS and a crop hygrothermal interactions model, the model presents the current state-of-the-art practices in greenhouse energy modeling.

3.8 Conclusion

Considering the lack of extensively validated greenhouse energy models, this paper attempts to develop a detailed model using TRNSYS. The model included detailed energy modeling components available in TRNSYS and integrated a hygrothermal crop model. The TRNFLOW infiltration sub-model introduced a novel approach based on an on-site air leakage test. A sensitivity analysis was conducted to identify sensible parameters, followed by a multi-stage automated calibration method to calibrate the model's uncertain parameters. The validation

process was then conducted using two additional datasets to assess the applicability of the calibrated model.

The case study was a typical small-scale ventilated greenhouse in Victoriaville, Canada. The comparison between the simulated and measured data during the multi-stage calibration process indicated that the model accurately replicated measured experimental conditions when the model parameters were adjusted to fit those indoor environment conditions. Using the calibrated parameters, the greenhouse energy model provided the same insight into the greenhouse environment conditions for the previous year in the same weather conditions. When assessing the model with data from a minimally heated twin greenhouse, the yearly heating consumption resulted in a relative error of 3.7 %.

With this multi-purpose model, whose predictive capacity has been validated, numerous opportunities exist, such as analyzing various scenarios for energy efficiency measures, renewable energy technologies, control algorithms, seeding schedules, subsidy applications, environmental policies, and regulations. The model can also study various performance metrics, including indoor environment conditions, energy consumption, carbon footprint, crop production, and operating costs. In a way, this project is a springboard to various possibilities aimed at developing greenhouse farming. In future studies, a plant growth model will be integrated to measure the productivity of the greenhouse and the influence of plant growth on energy consumption.

3.9 Appendix A Greenhouse energy model development

The appendix thoroughly presents the elements of the TRNSYS18 greenhouse energy model and initial parameters.

3.9.1 Weather data and user-provided inputs

On-site monitored weather data, as listed in Tableau 3.3, are used as inputs using the TRNSYS data reader (Type 9). For data collected at a 5-minute interval (T_o , RH_o , PAR_o), instantaneous

measured values are used at each timestep. As such, there is no need for interpolation, which not only simplifies the calculations but also the uncertainty. This is why PAR measurements are chosen as the global horizontal radiation input. PAR (PPFD) values are converted to global radiation ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) using a conversion factor of $2.02 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ (Reis & Ribeiro, 2020). This conversion factor is confirmed by calculating the average ratio of locally measured PAR to locally measured global horizontal radiation.

Data collected hourly (wind speed, wind direction, atmospheric pressure, snow cover) are interpolated linearly to 5-minute interval data using the Matlab function *retime*. The model also incorporates cloud cover as a weather input. Cloud cover data are obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project using the greenhouses geographical coordinates. User-provided inputs for the control system (fan and vent actuators status) are recorded at 5-minute intervals.

The timestep to use for greenhouse energy simulations has not often been addressed in previous studies. Greenhouse indoor environment conditions are significantly influenced by solar radiation, which can vary considerably even within an hour on cloudy days. Thus, there can be challenges related to data precision when relying on hourly weather data. Even though the sub-hourly solar radiation estimation has improved (McDowell et al., 2018), using 5-minute interval data, when available, could enhance the accuracy of the simulation by better capturing the variations in weather conditions.

3.9.2 Greenhouse construction

The greenhouse geometry is created in the TRNSYS3D Google SketchUp plugin (Figure 3.11) according to the technical drawings and imported into TRNBuild. In TRNBuild, construction properties are assigned to the greenhouse surfaces. The steel structure is modeled as a steel layer, considering a thermal conductivity of $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, a specific heat capacity of $500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, and a density of $7880 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. The properties of the cover materials are based on data compiled for polyethylene films and polycarbonate reported by the manufacturers. The

cover materials are created using the WINDOW 7.8 software (Mitchell et al., 2019) for its use in the TRNSYS greenhouse model (Type 56).

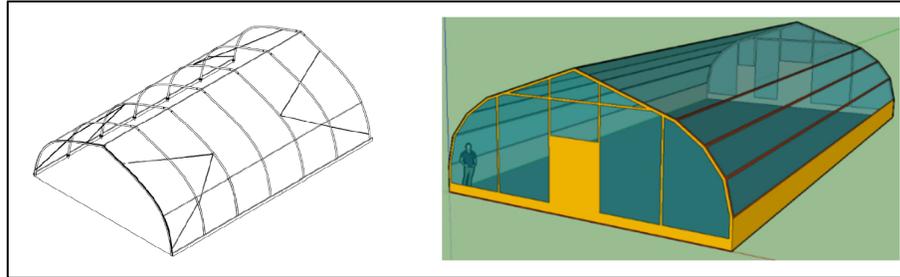


Figure 3.11 Representation of the modeled greenhouse geometry

Tableau 3.12 presents the thermal and optical properties of the glazing materials, while Tableau 3.13 details the convective heat transfer coefficients (equations (3.9) to (3.13)) used for the different surfaces in the model.

Tableau 3.12 Initial properties of the glazing materials

Material	U-value [W m ⁻² K ⁻¹]	Visible transmittance [-]	Solar heat gain coefficient (SHGC) [-]
Double layer polyethylene	4.00	0.80	0.80
Triple wall polycarbonate	3.40	0.76	0.80

Tableau 3.13 Convective heat transfer coefficients in W.m⁻².K⁻¹

Type	Equation	Reference
Indoor cover	$h_i = 1,95 \cdot (T_{env_i} - T_{a_i})^{0,3}$ if $(T_{env_i} - T_{a_i}) > 0^\circ C$	(3.9) Papadakis et al.
	$h_i = 2,21 \cdot (T_{a_i} - T_{env_i})^{0,33}$ if $(T_{env_i} - T_{a_i}) < 0^\circ C$	(3.10) (1992)
Outdoor cover	$h_o = 7.2 + 3.84 \cdot V$	(3.11) Garzoli, & Blackwell (1987)
Indoor ground surface	$h_g = 2,11 \cdot (T_g - T_{a_i})^{0,31}$ if $(T_g - T_{a_i}) > 0^\circ C$	(3.12) Klein et al. (2018)
	$h_g = 1,87 \cdot (T_g - T_{a_i})^{0,25}$ if $(T_g - T_{a_i}) < 0^\circ C$	(3.13)

The greenhouse indoor air has one airnode, which is assumed to be a “perfectly stirred tank” since circulation fans are used (Roy et al., 2002). Thus, the indoor air conditions are considered

to be uniform. This assumption is often used in greenhouse modeling (Katzin et al., 2022), achieving good accuracy in previously published models.

The default thermal capacitance of a building in TRNSYS is the capacitance of the airnode air mass. Besides the walls, other objects can be included in the building capacitance, such as structural elements, tools, and equipments.

3.9.3 Solar radiation

The solar radiation incident on the exterior surfaces of the greenhouse can be transmitted, absorbed, or reflected. A ray transmitted in the greenhouse can be specular (direct) or diffuse. The rays transmitted inside the greenhouse can then strike other internal surfaces of the greenhouse and then be absorbed again, reflected towards the interior, or even transmitted towards the exterior of the greenhouse. TRNSYS provides standard and detailed methods for the 3D distribution of solar radiation between building surfaces. The detailed distribution method is used for beam and diffuse radiation, as recommended for highly glazed spaces (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2017, p. 18).

TRNSYS solar processor (Type 16) calculates the direct and diffuse fraction of the global radiation relying on weather data: dry bulb temperature, humidity, and surrounding ground reflectivity. In the model, the ground reflectivity is dynamically determined based on the measured snow cover: 0.3 without snow, 0.5 with <5 cm, and 0.7 with >5 cm of snow (Thevenard & Haddad, 2006).

TRNSYS multizone building (Type 56) allows a fraction of the transmitted solar radiation energy to be directly transferred to the greenhouse air, the FTSR. This fraction accounts for internal items with low thermal capacity (Klein et al., 2017).

3.9.4 Longwave radiation

Longwave radiation exchange for external surfaces is calculated using a view factor to sky defined by TRNBuild. The longwave radiation exchange within the greenhouse relies on view factors (Gebhart factors), which are calculated using the auxiliary program TRNVFM.

The effective sky temperature is calculated with Type 69a using weather data: dry bulb temperature, humidity, direct and diffuse radiation, and cloud cover factor.

3.9.5 Ground coupling

The TRNSYS Soil Noding model (Type 1244), which divides the soil beneath the greenhouse into three-dimensional nodes, is used to model the coupling with the ground. The discretized volume of soil surrounding the greenhouse floor in the x, y, and z directions extends until the soil is unaffected by the floor heat transfer. A parametric study demonstrated no noticeable effect on the greenhouse indoor environment conditions beyond a distance of 5 m on each side (X-Y) and to a depth of 5 m (Z). Using the finite volume element numerical method, the ground contact model calculates the heat conduction within the ground nodes and outputs the average temperature of the ground surface in contact with the greenhouse floor.

The ground thermal properties vary according to the soil composition, granulometry, water content, and temperature (Dalla Santa et al., 2020). This study initially assumes the soil thermal conductivity, specific heat capacity, and bulk density for a dry silt soil with values of $0.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $800 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ and $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The initial solar absorptivity of the soil layer in the greenhouse is set to 0.80, which corresponds to the solar absorptivity of dry soil; however, this value can reach 0.90 for wet soil (Castilla, 2013). The emissivity of bare soil in the greenhouse also depends on its water content: emissivity between 0.88 and 0.96 was reported for many soil samples (Mira et al., 2007). Its initial value is set to 0.92.

The simulation is run for one year before conducting the calibration/validation to initialize the ground thermal mass. Over 5 years of simulation, it is observed that the yearly variation in heat flux exchange between the ground and the air is negligible after the second year.

3.9.6 Infiltration / Ventilation

The natural and forced ventilation airflows are modeled using TRNFLOW, which allows using the multizone airflow solver COMIS in TRNSYS (Feustel, 1999). TRNFLOW models the mass flow based on two driving forces: wind pressure and buoyancy. The wind pressure (Δp_w) is defined as the difference between the local pressure on the surface and the static pressure in the undisturbed wind W_h at the same height (equation (3.14)).

$$\Delta p_w = C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W_h^2 \quad (3.14)$$

Where C_p is the wind pressure coefficient.

The wind power law (equation (3.15)) is used to adjust the measured wind speed at a nearby weather station to the greenhouse's heave height.

$$W_h = W_m \cdot \left(\frac{H_b}{h_m}\right)^{\alpha_m} \cdot \left(\frac{h}{H_b}\right)^{\alpha} \quad (3.15)$$

Where W_h is the adjusted wind speed at the greenhouse's heave height, W_m is the measured wind speed, h_m is the height of wind speed measurements, and h is the greenhouse's heave height (1 m). The greenhouse is built in an open terrain with isolated obstacles, which results in a wind profile exponent α of 0.15 (Manwell et al., 2009). The height of the measurements (H_b) at the weather station (10 m) is assumed to be in a similar terrain to the greenhouse, resulting in a wind profile exponent α_m of 0.15 for the weather station measurement.

Wall-averaged wind pressure coefficients are required to estimate the wind pressure on each surface based on the wind direction. The coefficients for the greenhouse's side vents are based on the results obtained for single-span plastic greenhouses, as presented in Tableau 3.14 (Maraveas, 2020).

Tableau 3.14 Wall averaged wind pressure coefficients
for the studied greenhouse surfaces

Surface azimuth	Wind direction			
	NW	NE	WE	SW
SE	0.7	-1.0	-0.3	-1.0
SW	-1.0	0.7	-1.0	-0.3
NW	-0.3	-1.0	0.7	-1.0
NE	-1.0	-0.3	-1.0	0.7

The buoyancy is a result of the differences in temperature and air composition as defined by equations (3.16) to (3.18).

$$\Delta p_b = p_{L1} - p_{L2} \quad (3.16)$$

$$p_{L1} = p_{ref} - \rho_1 g h_{L1} \quad (3.17)$$

$$p_{L2} = p_2 - \rho_2 g h_{L2} \quad (3.18)$$

Where p_{L1} and p_{L2} are the air pressures of the adjacent nodes, p_{ref} is the reference atmospheric pressure and set to a value of 0Pa, ρ_1 and ρ_2 , and h_{L1} and h_{L2} are the densities and heights of the centre of gravity of the areas, and g is the gravitational constant.

Airflows through the external surface of the greenhouse are modeled by airlinks. Each airlink is defined using a specific mass flow equation, a function of the pressure difference. An airflow network is developed with TRNFLOW according to the greenhouse structures and ventilation equipment, as illustrated in Figure 3.12. The air flows of the positive pressure fans (FAN_P+) are set based on the manufacturer's fan curve (CANARM).

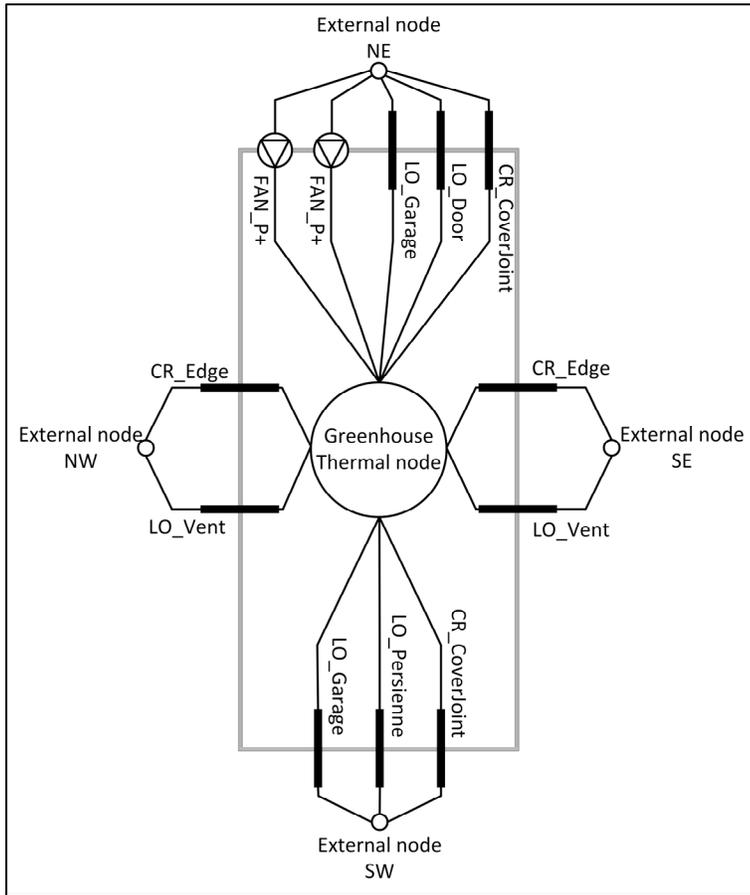


Figure 3.12 TRNFLOW network scheme of the greenhouse

The large vertical opening airlink (LO_) models the behaviour of open windows subjected to wind pressure and buoyancy driven ventilation assuming near horizontal airflow. This is modeled as an air flow through a rectangular opening according to equation (3.19).

$$\dot{m} = C_d \cdot W \int_0^H \sqrt{2\rho(z)f(z)} dz \quad (3.19)$$

Where C_d is the discharge coefficient, W is the width of the opening, H is the height of the opening, $\rho(z)$ is the air density at the height z , and $f(z)$ is the pressure drop $\Delta p(z)$ or $-\Delta p(z)$ depending on the node considered.

For an open window, the discharge coefficients of the side vent openings, C_d , is set to 0.61 to represent the buoyancy and wind-induced airflow through a rectangular vertical opening

(Zhang et al., 1989). The two greenhouse vents are equipped with insect-proof screens, which reduce the C_d by 16% to 77% depending on screen porosities (López et al., 2016).

The infiltration mass flow is modeled using the crack airtightness (CR_) according to equation (3.20). Fans and large openings also behave according to equation (3.20) when turned off or closed.

$$\dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] = C_s \left[\frac{kg}{s} @ 1Pa \right] \cdot (\Delta P [Pa])^n \quad (3.20)$$

Where C_s is the air mass flow coefficient and n is the airflow exponent.

Following an air leakage test on the greenhouse, the values for C_s and n are set to $0.15 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ and 0.73, respectively. The test was done with a portable Minnesota Blower Door. The flow coefficient is distributed across all openings, including doors, side vents, and interstices between the cover panels of the greenhouse. Since the distribution is unknown, equivalent weights are assigned to all these openings according to their respective lengths, i.e., $0.00065 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$. Tableau 3.15 lists all airflow links of the greenhouse.

Tableau 3.15 Infiltration airflow links of the greenhouse

No.	Type of link	From node	To node	Length [m]	Fraction	Wall %	C_s [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
1	FAN_P+_1			1.8	0.008		0.0012
2	FAN_P+_2			1.8	0.008		0.0012
3	CR_CoverPanels	EN_North	TN_Serre	26.8	0.117	20 %	0.0175
4	LO_Garage			8.7	0.038		0.0057
5	LO_Door			5.9	0.026		0.0039
6	CR_CoverPanels			26.8	0.117		0.0175
7	LO_Garage	EN_South	TN_Serre	8.7	0.038	17 %	0.0057
8	LO_Louver			2.4	0.011		0.0016
9	CR_Edge			23.2	0.101		0.0152
10	LO_Vent	EN_East	TN_Serre	49.8	0.218	32 %	0.0327
11	CR_Edge			23.2	0.101		0.0152
12	LO_Vent	EN_West	TN_Serre	49.8	0.218	32 %	0.0327
Total				228.9	1		0.15

The infiltration model is verified by simulating the airflow model using a typical year weather file. The average infiltration rate was 0.55 ACH, which falls just outside the values reported by (Bartok, 2001; NGMA, 2010) for a greenhouse covered with plastic film and less than 3 years old of 0.6 ACH to 1 ACH.

Ventilation control is realized using four cooling stages. The first three involve the use of the two side vents and a positive pressure fans. Afterward, the last entail turning on the second positive pressure fans if the indoor temperature continues to rise. This control uses four N-stage differential controllers with time delays and multiple deadbands (Type 971). Tableau 3.16 provides a comprehensive breakdown of how the different ventilation stages are modeled in TRNSYS.

Tableau 3.16 Cooling stages modeled in TRNSYS

Cooling stage	Ventilation strategy	Setpoint	TRNSYS type	Control signal
1	SE side vent	15°C	Type 971	5 Stages, deadband $\pm 1^\circ\text{C}$
2	Positive pressure fan 1	15°C	Type 971	On/off, deadband $\pm 1^\circ\text{C}$
3	NW side vent	16°C	Type 971	5 Stages, deadband $\pm 1^\circ\text{C}$
4	Positive pressure fan 2	20°C	Type 971	On/off, deadband $\pm 1^\circ\text{C}$

Side vents open gradually when the indoor temperature rises above the cooling set point. The positive pressure fans operate at a single-speed. In the winter, when cooling is not required, the fans are turned on half the time for an hour in the morning to reduce the humidity in the greenhouse. This is set in TRNSYS using a schedule.

3.9.7 Crops

It is essential to estimate the interaction between the crops and their environment to evaluate the indoor conditions of the greenhouse. The proposed model addresses this using a modified version of an existing crop model (Talbot & Monfet, 2020) based on a single energy balance between the crops and their environment, either at the leaf or canopy scale (equation (3.21)). This model assumes that the crops are perfectly irrigated.

$$q''_{sol} + q''_{SW} + q''_{LWX} + q''_{st} + q''_{morph} + q''_{conv} + q''_{latent} = 0 \quad (3.21)$$

Where q''_{sol} is the transmitted solar radiation flux absorbed by crops, q''_{SW} is the short-wave radiation flux absorbed by the crops from electric lighting in $W.m^{-2}_{cultivated}$; q''_{LWX} is the net long-wave radiation flux exchange between surfaces in $W.m^{-2}_{cultivated}$; q''_{st} and q''_{morph} represent the fluxes stored within the leaves, stems and fruits or used for the photosynthesis, respectively; q''_{conv} is the sensible heat exchange between the surrounding air and the canopy in $W.m^{-2}_{cultivated}$; and q''_{latent} is the evapotranspiration rate of the canopy multiplied by the latent heat of vaporisation of water in $W.m^{-2}_{cultivated}$, which corresponds to the latent exchange flux with indoor air, mainly by transpiration from the leaves.

The heat storage within the leaves stems, and fruits is minimal, which means that q''_{st} and q''_{morph} can be neglected (Stanghellini, 1987). The longwave radiation exchange (q''_{LWX}) between the crop canopy and the surrounding surfaces should be considered in a greenhouse environment (Stanghellini, 1987); however, it has been reported to have relatively small impact compared to the shortwave radiation (Lambers et al., 1998). Thus, it is suggested that it can be neglected in simplified models (Katsoulas & Stanghellini, 2019).

The radiation flux absorbed by crops is modeled as a turbid medium according to equation (3.22) for the solar radiation and by equation (3.23) for the short-wave radiation from lights (q''_{SW}) absorbed by the canopy. This represents the radiation absorbed while traversing a turbid medium defined by the crop extinction coefficient and the crop leaf area index (LAI) (Stanghellini, 1987). The LAI indicates the density of canopy leaves, which is defined as the total leaf area over the cultivated floor area of the greenhouse, both in m^2 . The shortwave extinction coefficient k_s depends on the leaves' inclinations, their disposition inside the canopy, and on the spectrum of the radiation source. The mean k_s for lettuce is reported to be 0.58 for solar radiation and 0.66 for radiation coming from artificial lighting (TEI et al., 1996).

$$q''_{sol} = I_{sol} \cdot (1 - e^{-k_{s,sol} \cdot LAI}) \quad (3.22)$$

$$q''_{SW} = f_{SW} \cdot P_{el} \cdot (1 - e^{-k_{s,el} \cdot LAI}) \quad (3.23)$$

Where I_{sol} is the solar radiation available at the crop canopy in $W.m^{-2}_{cultivated}$, P_{el} is the installed artificial electric lighting electrical power density in $W.m^{-2}_{cultivated}$, f_{SW} is the shortwave radiation heat fraction of the artificial electric lighting.

The convective heat flux from the canopy to the surrounding air is calculated from equation (3.24).

$$q''_{conv} = LAI * \rho_a * C_p * \left(\frac{T_{pl} - T_i}{r_a} \right) \quad (3.24)$$

Where ρ_a is the density of the air in $kg.m^{-3}$, C_p is the specific heat capacity of the air in $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$, T_{pl} and T_i are the temperature of the canopy and the indoor air in $^{\circ}C$, respectively.

The latent heat flux from the canopy to the surrounding air due to the evapotranspiration process is a function of the stomatal resistance (r_s) and of the aerodynamical resistance (r_a) in $s.m^{-1}$ and is calculated using equation (3.25).

$$q''_{latent} = LAI * \lambda * \left(\frac{X_s - X_a}{r_s + r_a} \right) \quad (3.25)$$

Where λ is the latent heat of vaporisation of water, X_s is the vapour concentration at the leaf surface, and X_a is the vapour concentration in the surrounding indoor air.

The aerodynamic resistance of the canopy, r_a , is considered constant at $100 s.m^{-1}$ as recommended by Graamans et al. (2017) to represent the presence of mechanical air circulation inside the greenhouse. Since the influence of the aerodynamic resistance on the evapotranspiration process is small compared to the stomatal resistance, using a constant value for simplified crop models is also considered acceptable (Katsoulas & Stanghellini, 2019). The stomatal resistance of lettuce is estimated as a function of the photosynthetic photon flux density ($PPFD$) received by the canopy (equation (3.26)), considering different conversion factors for irradiance to $PPFD$ depending on the light source (Graamans et al., 2017).

$$r_s = 60 * \frac{1500 + PPFD}{200 + PPFD} \quad (3.26)$$

The *PPFD* is calculated as the sum of the *PPFD* from solar radiation and *PPFD* from artificial lighting according to equation (3.27).

$$PPFD = \eta_{PPFD.sol} * I_{sol} + \eta_{PPFD.el} * P_{el} \quad (3.27)$$

In TRNSYS, the *PPFD* intercepted by the crops inside the greenhouse is estimated using the output *QSLAB* (absorbed solar radiation by the floor surface) divided by the floor absorptivity coefficient. With crops being near the ground, this assumption is plausible. The studied greenhouse does not have artificial lighting for now. Hence, no lights were implemented in the model.

The crop operational parameters, such as cover area and crop density, are determined based on operation data and serve as inputs to the crop model. It is estimated that crops cover 60% of the greenhouse floor area, considering space for equipment storage and walking paths and that average crop density is 20 lettuces.m⁻²_{cultivated}.

3.9.8 Heating system

The control parameters of the heating system are presented in Tableau 3.17.

Tableau 3.17 Control parameters of the heating system

Sequence	Heating period	Setpoint	TRNSYS type	Control signal
1	October 1 st to November 21 st	6 °C	Type 970	Deadband ± 0.5 °C
2	November 21 st to February 28th	2 °C	Type 970	Deadband ± 0.5 °C

Indoor air of the greenhouse is heated with a propane air heater. TRNSYS unit air heater (Type 663) is used. The outlet air properties are added to the greenhouse airnode heat balance as a ventilation heat gain, delayed by one-timestep (5 min.) interval to account for air circulation and the temperature sensor position. The heater efficiency is adjusted to account for the startup periods. The rated gas consumption is 1.70 m³_{propane}.h⁻¹, while the actual gas consumption during operation is 0.99 m³_{propane}.h⁻¹, representing a efficiency of 58%. The fan rated flow rate is 4 500 kg.h⁻¹, and the fan power is 1492 W, with motor efficiency of 80%.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Les principaux résultats du projet de recherche ont été discutés dans l'article présenté au CHAPITRE 3. Dans cette section, certains aspects sont approfondis. D'abord, les principaux résultats et contributions du projet de recherche sont discutés. Ensuite, les limites du projet sont abordées. Finalement, les perspectives d'utilisation du modèle développé dans ce projet de recherche sont présentées.

4.1 Principaux résultats et contributions

L'objectif principal de ce projet de recherche est le développement d'un modèle énergétique de serre de petite taille en contexte québécois à l'aide d'un outil STD, TRNSYS. Le modèle doit être capable de capturer le comportement dynamique des variations de température et d'humidité de la serre, et ainsi prédire la consommation énergétique. Pour répondre à une panoplie de possibilités d'analyses, le modèle doit être basé sur la mise en équation des phénomènes d'échange de masse et de chaleur dans la serre, en plus d'être versatile.

Pour ce faire, un modèle énergétique basé sur les phénomènes physiques développé à l'aide de l'outil STD TRNSYS a été étudié et amélioré. Les approches de modélisation détaillées ont été sélectionnées pour obtenir un modèle hautement descriptif. La majorité des paramètres du modèle ont été fixés à partir de la documentation technique, de la littérature scientifique et de mesures sur site. Les paramètres incertains ont ensuite été identifiés par une méthode séquentielle principalement basée sur les connaissances et expertises de l'équipe de recherche. Seize paramètres ont été définis comme incertains, un nombre relativement élevé par rapport aux études, performant une calibration, présentées dans le Tableau 1.9 de la revue de littérature. De ces seize paramètres, une analyse de sensibilité globale a permis d'identifier les paramètres les plus sensibles. L'analyse de sensibilité permet de réduire le nombre de paramètre à ajuster à neuf, se situant désormais en dessous de la moyenne de onze paramètres des huit études comparables du Tableau 1.9. Ces paramètres incertains sensibles ont, ensuite, été fixés par une

calibration automatisée à trois étapes. Pour la période de calibration complète soit 56 jours, la RMSE de la température de l'air interne de la serre est de 1,6°C et la RMSE de l'humidité relative est de 8,3%. De plus, les résultats dynamiques (par pas de temps) montrent que les schémas journaliers ont été capturés de manière satisfaisante par le modèle. Pour juger de la précision des prédictions de conditions environnementales internes d'une serre ainsi que la consommation énergétique, les résultats de simulation du modèle sont validés avec des données mesurées lors de périodes distinctes. Les principaux résultats obtenus sont des RMSE de 1,8°C et 1,9°C pour la prédiction horaire de la température intérieure, des RMSE de 5,3% et 8,4% pour la prédiction horaire de l'humidité relative intérieure, et une erreur moyenne normalisée (NMBE) de 3,7% pour la prédiction mensuelle de la consommation énergétique en chauffage. Ces résultats de comparaison donnent confiance en les prédictions du modèle énergétique.

Cette section interprète d'abord les résultats de validation en les comparant avec des études récentes comparables. Ensuite, les approches de modélisation choisies sont discutées. Finalement, la méthodologie de calibration développée est analysée.

4.1.1 Comparaison des résultats de validation

Dans la section de discussion de l'article, il est mentionné que les résultats sont comparables à ceux d'autres modèles recensés par Katzin et al. (2022) pour les prédictions de la température de l'air intérieur et l'humidité relative, et à ceux des recommandations de ASHRAE *Guideline 14-2014* (ASHRAE, 2014) pour la consommation d'énergie pour le chauffage. Il s'agit d'une comparaison générale pour alléger l'article. Comme mentionné dans la revue de littérature, la variété de méthodologies de validation utilisées rend ardue la comparaison entre les modèles énergétiques de serre. Des comparaisons peuvent être effectuées, mais il est important d'identifier correctement les caractéristiques du modèle, ainsi que les paramètres de la méthodologie de validation. Pour la comparaison, certains modèles de serre «boite-blanche», évalués par les articles de revue de Beulac et al. (2023) et Katzin et al. (2022), sont sélectionnés. Les résultats de validation des modèles de ces études sont présentés dans le

Tableau 4.1. Les validations comparatives ont été écartées, privilégiant ainsi les validations empiriques, en cohérence avec la méthodologie de validation adoptée dans ce projet.

Tableau 4.1 Résultats de validation empirique d'études comparables

	Référence	Température		Humidité relative		Consommation énergétique		
		RMSE (°C)	R ² (-)	RMSE (%)	R ² (-)	NMBE (%)	RE (%)	CV-RMSE
VALID.	Serre froide	1,8		5,3		-	-	-
	Serre chauffée	1,9		8,4		3,7	3,7	9,3
TRNSYS	(Ogunlowo et al., 2022)	2,6	0,95	19,7	0,93	-	-	-
	(Yeo et al., 2022)	1,6	0,87	7,7	0,80	-	-	-
AUTRE	(Ahamed et al., 2018)	1,8	-	-	-	4,6	-	11,5
	(Katzin et al., 2020)	1,7 - 2,0	-	5,5-8,5	-	-	-0,9 -11,5	-

Ogunlowo et al. (2022) modélisent une serre passive de petite taille en arche gothique. Les caractéristiques de cette serre sont similaires à celle du CÉTAB+, bien que ce soit une serre expérimentale et vide. Les résultats de simulation d'Ogunlowo et al. (2022) sont validés durant 13 jours à un intervalle de 10 minutes. Dans cette étude, la discrétisation du volume d'air de la serre est étudiée. Les résultats présentés dans le Tableau 4.1 sont ceux des meilleurs scénarios. On constate que les valeurs de R² sont satisfaisantes, mais que les RMSE sont plus importantes, en comparaison avec les résultats de notre étude. Ces écarts notables s'expliquent par l'omission de la masse thermique du sol dans le modèle, ainsi que l'utilisation d'un débit d'infiltration constant. Ces résultats suggèrent également que la division du volume d'air n'est pas nécessaire, bien qu'il soit difficile de tirer des conclusions définitives en raison de la modélisation simplifiée de certains éléments.

Yeo et al. (2022) modélisent une serre de grande taille produisant des tomates. Bien que la serre soit différente de celle du CÉTAB+, la comparaison des résultats est pertinente puisque leur modèle est validé sur une période consécutive de 67 jours en été, où le seul système actif est la ventilation naturelle. Sur cette période, ils obtiennent des résultats similaires à ceux de notre modèle. Ce modèle inclut un calcul de l'infiltration et de la ventilation naturelle par CFD,

ce qui améliore les résultats, mais alourdit le temps de calcul et diminue la versatilité du modèle. Ces résultats similaires aux nôtres, renforcent la confiance en l'approche de modélisation de l'infiltration et de la ventilation naturelle. Considérant que la serre contient des laitues, des plants au sol, la circulation de l'air intérieur est simplifiée comparativement à une serre où des plants de tomate occupent l'espace, ce qui peut justifier l'utilisation de la CFD pour modéliser l'écoulement de l'air dans leur étude.

Pour les modèles développés avec d'autres outils numériques que TRNSYS, deux études ont été identifiées. D'une part, Ahamed et al. (2018) modélisent une serre individuelle de 1000 m² en polyéthylène double située en Saskatchewan au Canada. La serre est chauffée et éclairée pour y cultiver des tomates. Ces chercheurs valident leurs résultats de simulation de la consommation énergétique sur huit mois (mars à octobre). D'autre part, un des seuls modèles partagés et disponibles est le modèle *Greenlight* de Katzin et al. (2020). Ce modèle se base sur le modèle de Vanthoor et al. (2011), un des plus cités dans la littérature. Ce modèle est validé avec deux compartiments expérimentaux d'une serre de type Venlo où des tomates sont cultivées et où il y a donc du chauffage et de l'éclairage. La validation est menée sur 112 jours à cinq minutes d'intervalle pour la température et l'humidité relative. La comparaison de la consommation de chauffage se fait sur la totalité de la période pour le chauffage. Il y a deux valeurs dans le Tableau 4.1 pour chacun des compartiments, un avec des DEL et un des SHP.

Les résultats de ces deux études pour la température sont comparables aux nôtres. Dans un modèle où la température est régulée par un système actif (p. ex., chauffage), il est naturel que l'écart de prédiction soit réduit, étant donné que les températures simulées et mesurées sont souvent proches du point de consigne. Pour l'humidité relative, ils obtiennent également des résultats similaires aux nôtres. Cela renforce les difficultés de prédiction de l'humidité. Pour la consommation énergétique en chauffage, les indicateurs sont aussi similaires. Cependant, les comparaisons restent imparfaites. Ahamed et al. (2018) ne valident pas leur modèle lors de l'hiver, où nous avons eu les plus grands écarts de prédictions. Katzin et al. (2020) présente les résultats de la totalité de la période de validation. Ces résultats renforcent évidemment le besoin

d'une validation standardisé à partir d'un même ensemble de données, pour mieux comparer les modèles.

Dans l'étude de Ahamed et al. (2018), l'énergie de chauffage ajoutée est théorique. C'est-à-dire qu'elle vient combler exactement les pertes thermiques simulées pour maintenir la température de consigne. Tandis que dans Katzin et al. (2020), le chauffage est modélisé par un système de chauffage à tuyaux chauffants. Dans notre étude, la modélisation du système de chauffage a permis d'améliorer les résultats comparativement à l'option de chauffage théorique de TRNSYS, qui surestimait le chauffage. La séquence de chauffage utilisée permet de mieux représenter la consommation de chauffage attendue en prenant en compte les délais de démarrage et de fermeture de l'équipement qui entraînent des écarts avec la température de consigne. Ce constat appuie la nécessité d'analyser puis modéliser la séquence de contrôle et les caractéristiques de l'appareil de chauffage pour ajouter de la précision aux prédictions.

Ces comparaisons favorables envers les résultats de validation du modèle sont améliorées par la calibration. Dans un modèle calibré, les paramètres sont spécifiquement ajustés afin de mieux correspondre aux mesures. Des études présentées, seulement celle de Katzin et al. (2020) mentionne avoir ajusté les paramètres par une calibration manuelle. Il est donc pertinent de comparer avec un autre modèle procédant à une calibration automatique. Zhou et al. (2023) proposent une méthode de calibration automatisée du modèle *Greenlight* de Katzin et al. (2020). Ils utilisent comme indicateurs les CV-RMSE pour la température et la pression de vapeur. Leur période de validation correspond aux conditions météorologiques du mois de septembre à Victoriaville, Canada. Zhou et al. (2023) valident leur modèle sur 15 jours et obtiennent un CV-RMSE horaire pour la température intérieure de 7.6% ce qui est près de la valeur de 9,0% que nous avons obtenue pour une période de 21 jours lors de la troisième étape de calibration.

Les comparaisons statistiques avec la littérature renforcent que la précision des prédictions du modèle développé dans ce projet se compare à celle des modèles existants. Sans être largement supérieur en termes de précision, le modèle se positionne favorablement par rapport aux autres

modèles de la littérature. Ces résultats sont satisfaisants, car les principaux objectifs de développement ne sont pas de créer un modèle supérieur à tous les autres ni de les remplacer. Ce modèle est d'abord créé pour nous permettre de disposer d'un modèle répondant à nos objectifs, nos besoins, nos défis et notre climat, étant donné le manque de modèles partagés. De plus, le modèle présente plusieurs avantages et contributions au niveau des approches de modélisation choisies, ainsi que dans la méthodologie de calibration, comme détaillé dans les sections suivantes.

4.1.2 Approches de modélisation

L'approche de modélisation choisie se base sur une revue de littérature des études récentes proposant des modèles développés avec TRNSYS. En général, les approches choisies sont les plus détaillées, requérant le plus de paramètres. En incluant toutes les approches de modélisation détaillées disponibles sur TRNSYS, ce modèle sert en quelque sorte de test pour évaluer la possibilité de modéliser efficacement une serre avec ce logiciel. Ce modèle utilise des approches de modélisation accessibles à tous, incluant le modèle de laitue (<https://github.com/ltsb-etsmtl/crop-model>). L'originalité de ce travail réside dans l'inclusion simultanée de toutes ces approches, et leur adaptation pour modéliser une serre individuelle de petite taille en contexte québécois. Les résultats de la calibration et de la validation suggèrent que les approches de modélisation utilisées décrivent de manière satisfaisante les phénomènes d'échanges thermique et massique interagissant dans la serre. Les approches de modélisation se démarquant sont approfondies dans les sections 4.1.2.1 à 4.1.2.4.

4.1.2.1 Infiltration et ventilation naturelle

Pour estimer le débit d'infiltration et de ventilation naturelle, le modèle développé lors de ce projet de recherche intègre une nouvelle approche, utilisant l'extension TRNFLOW. Le modèle décrit chacune des ouvertures et interstice de l'enveloppe de la serre. Un modèle aussi descriptif requiert une bonne connaissance de la serre modélisée ainsi qu'un test d'infiltrométrie, mais il ouvre la voie à diverses possibilités d'utilisation. Effectivement, le débit d'air d'infiltration totale étant réparti sur les interstices propices à l'infiltration, cela offre

la possibilité de tester différentes conceptions de serres et positions d'ouvertures. De plus, le modèle intègre également l'influence de l'environnement extérieur sur la serre, en considérant les profils de vitesse du vent. Dans le cadre d'une future modélisation d'une serre en milieu urbain, le modèle peut aussi tenir compte de la proximité des bâtiments voisins.

Il est difficile de confirmer avec certitude l'exactitude de la modélisation du débit d'infiltration. Les résultats de validation du modèle, ainsi qu'une correspondance avec les valeurs de changement d'air à l'heure (CAH) moyen annuel de la littérature pour une serre en polyéthylène double soufflé (Bartok, 2001; NGMA, 2010), renforcent sa validité. Toutefois, plusieurs modèles empiriques existent pour modéliser l'infiltration (Cimmino & Bernier, 2022). La Figure 4.1 présente une comparaison dynamique des CAH modélisés par différents modèles d'infiltration utilisant les résultats d'un test d'infiltrométrie, soit le ratio Kronvall-Persily ($ACH_{50}/20$) et le modèle Sherman-Grimsrud (Type 75) (Sherman & Grimsrud, 1980).

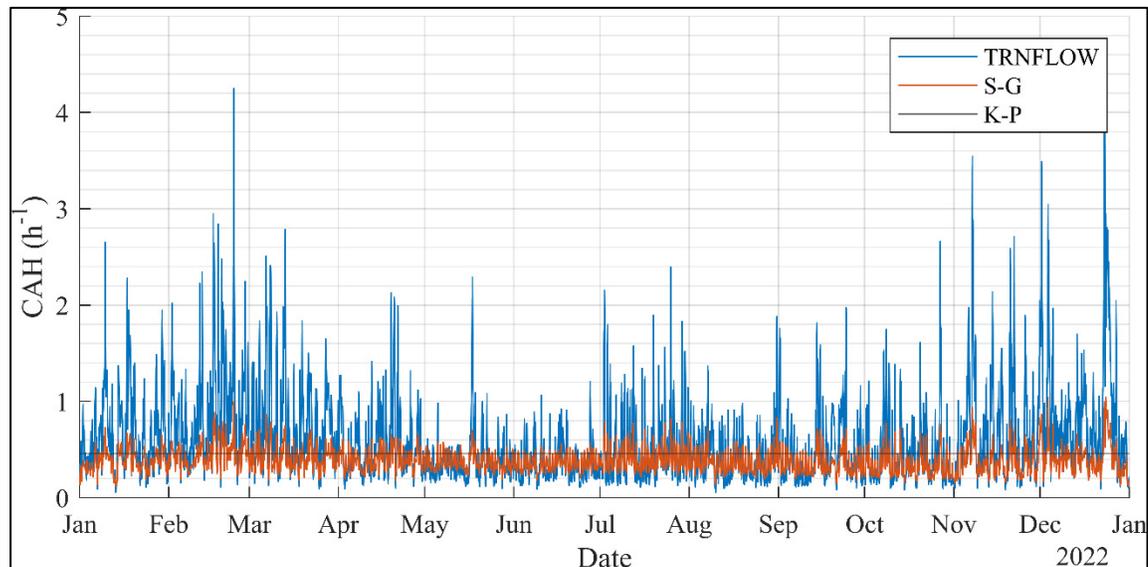


Figure 4.1 Comparaison de modèles d'infiltration pour l'année 2022

Des oscillations significatives du CAH sont observées pour le modèle TRNFLOW, car il est plus sensible au vent et au gradient de température entre l'intérieur et l'extérieur. Étant donné cette dépendance au vent, la mesure du vent est d'une importance cruciale pour le modèle. La

vitesse et la direction du vent sont des paramètres météorologiques très variables en fonction de la position géographique. La disponibilité de mesures sur site renforce la confiance dans les résultats, bien que des mesures à intervalles de cinq minutes seraient idéales. Les autres modèles sont plus simples et conçus principalement pour les bâtiments. Bien que les CAH moyens modélisés sont plus bas, l'ordre de grandeur reste similaire. Il est possible que des résultats satisfaisants soient obtenus avec une calibration utilisant un modèle plus simple, mais l'approche de modélisation serait moins descriptive, donc moins adaptable.

4.1.2.2 Capacitance thermique

La capacitance thermique du nœud d'air de la serre est ressortie comme un paramètre sensible du modèle. La capacitance thermique d'une serre est un sujet peu abordé dans la littérature. Dans le forum de discussion des utilisateurs de TRNSYS, les développeurs du logiciel conseillent de multiplier la capacitance de l'air d'une pièce d'un bâtiment par cinq pour prendre en compte les meubles et autres objets présents dans l'espace (Bradley, 2011). En général, les modèles de serre définissent la capacitance thermique comme seulement celle du volume d'air. Dans notre cas, la calibration a confirmé cette tendance en augmentant légèrement la capacitance de la serre de 1100 à 1300 kJ.K⁻¹.

4.1.2.3 Conduction du sol

Au cours du projet, une attention particulière a été portée pour étudier l'impact de capacitance thermique du sol. Une donnée intéressante pour évaluer ces échanges est la présence d'un capteur de température du sol est installé dans le sol à une profondeur variable (entre 2 cm et 10 cm). Cette variabilité fait que la variable n'a pas été incluse dans la calibration ou la validation. Toutefois, il est intéressant de comparer ces mesures avec les résultats de simulation à titre indicatif. Le sous-modèle de sol (Type 1224) ne transmet pas la température de chaque nœud du sol à chaque pas de temps. Pour obtenir les températures du sol au centre de la serre à chaque profondeur durant la simulation, le code et le *proforma* ont été modifiés dans TRNSYS.

La discrétisation du sol entraîne une augmentation du temps de simulation, compte tenu de l'initialisation sur une période d'un an avant le début de la simulation. Les températures initiales du sol ne peuvent pas être définies avec le Type 1224. Pour accélérer la simulation, le maillage peut être réduit jusqu'à obtenir un nœud par couche de profondeur et en négligeant les échanges latérales de la chaleur avec le sol hors du périmètre de la serre, comme c'est le cas dans plusieurs études qui n'utilisent pas TRNSYS (Vanthoor et al., 2011; Zhang et al., 2020).

4.1.2.4 Fichier météorologique

Le modèle a été développé avec un fichier météorologique donnant des données instantanées aux intervalles de cinq minutes. Généralement, des données météorologiques horaires sont fournies à un modèle, puis sont interpolées pour chaque pas de temps de la simulation. Cependant, une serre est très sensible aux gains par rayonnement solaire. Les données instantanées horaires, telles que celles fournies par les fichiers météorologiques EPW, ne capturent pas pleinement les premiers gains solaires. L'interpolation peut entraîner un décalage entre la température simulée et mesurée, tout comme c'est le cas avec un fichier horaire instantané où aucune interpolation n'est effectuée.

La Figure 4.2 présente les données du rayonnement solaire mesuré sur site et celle d'un fichier EPW d'une station locale pour la journée du 2 octobre 2021. Les données aux 5 minutes sont celles du capteur de PAR Hobonet directement sur la serre et les données horaire sont celle du pyranomètre de la station météorologique du site. Les données du fichier EPW proviennent de la station météorologique de Lemieux, QC et sont extraites du site SIMEB (SIMEB, 2023).

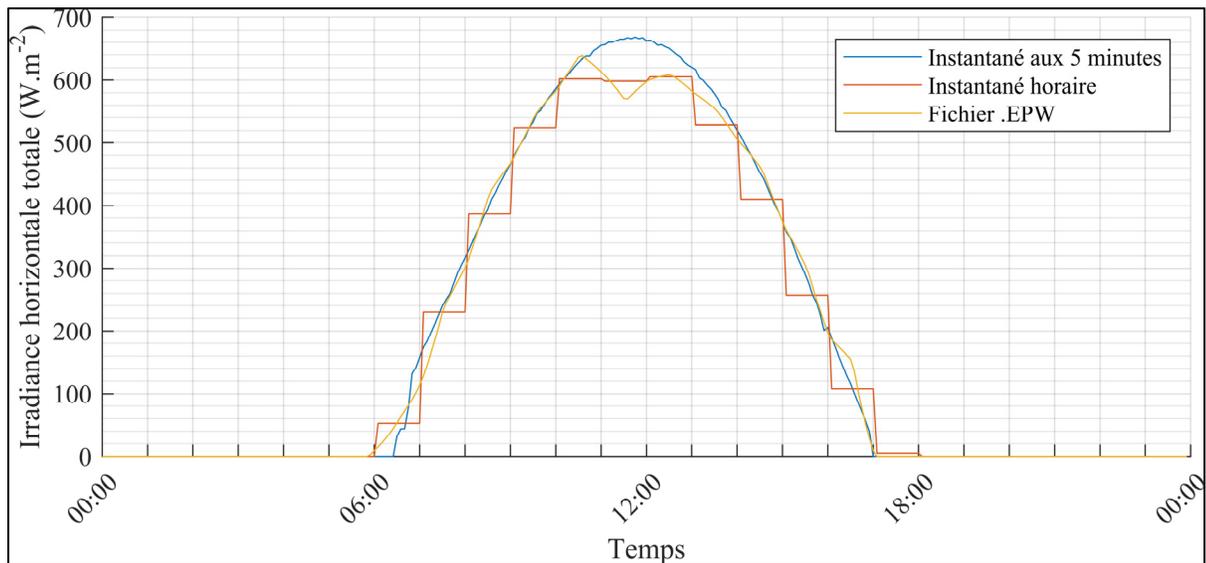


Figure 4.2 Données d'entrée d'irradiance horizontale totale à un pas de temps de 5 minutes, le 2 octobre 2021

Il est observé que les deux fichiers horaires ne reproduisent pas pleinement le comportement du rayonnement solaire au cours de la première heure d'ensoleillement. En utilisant des données à intervalles de cinq minutes, l'incertitude de l'interpolation des données d'entrée est réduite, ce qui constitue une manipulation visant à obtenir des résultats plus précis. Maintenant que le modèle est validé, l'utilisation d'un fichier météo horaire classique est possible, mais il est important de noter qu'il peut y avoir des décalages au niveau de la température, en particulier pendant la période du lever du Soleil.

4.1.3 Calibration

La calibration reste peu utilisée dans la modélisation énergétique de serre comparativement aux bâtiments. La méthodologie de calibration développée dans ce projet de recherche a été inspirée d'une méthodologie de calibration pour l'analyse de la surchauffe dans les bâtiments (Baba et al., 2022), puis ajustée pour son application pour une serre. Par exemple, l'utilisation de la fonction-objectif avec l'erreur moyenne (MBE) pour la température était minimisée à 0 en sous-estimant le jour et en surestimant la nuit, cela a conduit à la modification de la fonction-objectif pour inclure l'erreur absolue moyenne (MAE). Cette méthodologie permet d'obtenir

des résultats de qualité, et qui se comparent favorablement à la littérature comme discuté à la section 4.1.1. Certains aspects de la méthodologie développée sont discutés dans les sections 4.1.3.1 à 4.1.3.3.

4.1.3.1 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité globale réalisée est bénéfique pour optimiser la calibration du modèle, mais elle s'est également révélée être une contribution significative pour une meilleure compréhension du modèle. En effet, lors de la phase d'exploitation d'un modèle, l'analyse de sensibilité permet d'identifier les paramètres auxquels accorder davantage d'importance. En cas d'écarts, les paramètres sensibles seront les premiers à ajuster et étudier. Les bénéfices d'une telle analyse de sensibilité d'un modèle énergétique de serre sont prônées, bien qu'elle soit souvent manquante dans les études probablement dû aux manipulations additionnelles et au temps de calcul nécessaire (López-Cruz et al., 2018).

4.1.3.2 Reproductibilité

La méthodologie de calibration a été élaborée spécifiquement pour l'étude de cas en question. Ainsi, toutes les informations disponibles ont été prises en compte dans la sélection des étapes de calibration. Ici, l'objectif de la calibration était de déterminer les valeurs appropriées des paramètres incertains. Cependant, il s'agit également de présenter une méthodologie pouvant être réutilisée, étant donné que la calibration des modèles de serre est peu développée. La description détaillée du processus favorise sa reproductibilité, ce qui constitue un avantage de la calibration automatique. La séquence d'identification des paramètres incertains est également exposée en détail, un aspect souvent négligé dans la littérature. Toutefois, notre méthodologie de calibration présente certaines limites en termes d'utilisation et de reproductibilité.

D'abord, pour les serres, la collecte de données n'est pas toujours facile. Il arrive que le système de contrôle ne soit pas connecté à un système d'acquisition de données. Bien que les résultats de l'étude appuient une calibration à plusieurs étapes, il est cependant nécessaire de

disposer de données appropriées à sa réalisation. Avec une serre expérimentale, il est possible de laisser la serre en mode passif, puis d'ajouter les séquences de contrôle une à une par la suite. Avec une serre commerciale, il est plus difficile d'obtenir des données avec peu ou pas de systèmes actifs en action. Il peut parfois y avoir des temps d'arrêt de la production qui permettent de recueillir des données. Une analyse approfondie des données disponibles et des modes d'opération est donc cruciale pour définir les périodes de calibration possibles.

Ensuite, le temps de simulation d'un modèle détaillé développé sur TRNSYS entraîne des longueurs dans le processus de calibration. Pour effectuer une analyse de scénarios annuels, il est peu contraignant d'attendre. Cependant, une calibration (tout comme une analyse de sensibilité) nécessite des centaines, voire des milliers de simulations.

4.1.3.3 Comparaison avec le modèle initial

Afin de maintenir le caractère boîte blanche du modèle (plutôt que boîte grise, nécessitant des données mesurées), celui-ci ne devrait pas nécessairement dépendre d'une calibration pour être utilisable. Avant d'être calibré, le modèle initial a été évalué. La Figure 4.3 montre la performance du modèle initial comparativement à celle du modèle calibré pour la période de validation de la serre froide en septembre et octobre 2021. La RMSE de la température horaire sur la période est de 2,8°C pour le modèle initial et de 1,8°C pour modèle calibré.

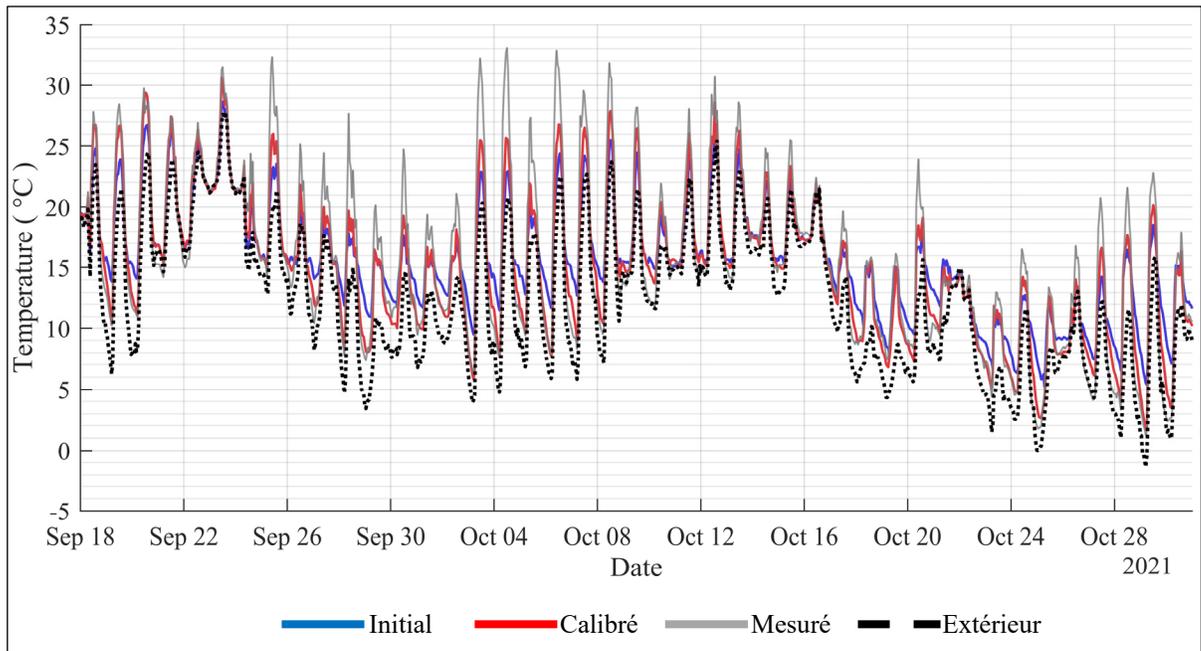


Figure 4.3 Comparaison de la température de l'air entre les résultats de simulation des modèles initiaux et calibrés pour la serre froide en 2021

Ces résultats confirment la validité du modèle en démontrant que, en choisissant rigoureusement les paramètres du modèle, la calibration n'est pas essentielle, car le modèle initial présente des performances satisfaisantes comparativement à Ogunlowo et al. (2022) (Section 4.1.1). De plus, les résultats dynamiques (horaire) montrent que les schémas journaliers ont été capturés de manière satisfaisante par le modèle initial ce qui suggère que la calibration ne compense pas des erreurs de modélisation des phénomènes physiques. Toutefois, la calibration vient définitivement ajouter un niveau de confiance en les prédictions du modèle.

4.2 Limites et suggestions d'améliorations

Les résultats dynamiques et les indicateurs statistiques montrent que les schémas journaliers des conditions environnementales de la serre ont été captés de manière satisfaisante par le modèle, mais présentent encore des écarts dans certaines conditions météorologiques et d'opération. Cette section présente les limites de l'étude, donc du modèle, et suggère des pistes d'amélioration.

Premièrement, le développement du modèle énergétique repose largement sur les données mesurées par un système d'acquisition, surtout parce qu'il est calibré pour correspondre à ces données mesurées. La précision d'un modèle ne peut pas dépasser l'incertitude des mesures (Bontsema et al., 2011). Il existe bien sûr une incertitude intrinsèque à l'appareil de mesure, ainsi qu'à sa représentativité de la valeur réelle. En effet, les résultats de calibration sont calibrés et validés avec les données mesurées par une seule sonde de température située au centre de la serre. Dans un modèle avec un seul nœud d'air, la température simulée représente une température moyenne de la serre. On suppose que l'air est parfaitement homogénéisé par les quatre ventilateurs de circulation, mais des différences peuvent survenir, atteignant jusqu'à 2°C (Van Beveren et al., 2015). Dans une étude future, plusieurs points de mesure de la température et de l'humidité relative permettraient de quantifier si une stratification réelle est présente, tout en fournissant une température plus représentative de la moyenne de la serre.

En plus de la température et l'humidité, les données sur la consommation énergétique ont été relevées manuellement à partir d'un compteur local, à des intervalles irréguliers. Des mesures horaires de la consommation énergétique auraient permis une évaluation plus précise du comportement du modèle lors des périodes de chauffage.

Le test d'infiltrométrie, sur lequel repose le modèle d'infiltration, a été réalisé de manière ponctuelle en été. Il serait bénéfique de refaire cette mesure à plusieurs moments de l'année afin de déterminer sa constance dans le temps. Un test en hiver serait nécessaire pour vérifier si l'hypothèse de la diminution de l'infiltration en présence de neige est valide. Toutefois, un accord avec les opérateurs doit être trouvé étant donné que la serre est en fonctionnement pendant l'hiver.

Deuxièmement, la validité des résultats est limitée à un seul site, même si on y retrouve deux serres. La validation sur un seul bâtiment est couramment réalisée dans la littérature, mais cela suscite toujours des doutes quant à la représentativité du modèle. Étant donné que la serre modélisée intègre peu de systèmes actifs et passifs, une incertitude subsiste quant à l'incorporation d'équipements couramment utilisés dans les serres, tels que les écrans

thermiques et l'éclairage artificiel. Avec l'ajout de systèmes fonctionnant à l'électricité, il serait pertinent d'ajouter des compteurs pour valider la consommation énergétique totale et pas seulement en chauffage, une démarche qui n'a pas été entreprise dans l'étude.

La serre froide n'a pas été calibrée durant la saison hivernale puisqu'une couverture flottante est installée la nuit lorsque la température extérieure passe sous -2°C . Cette opération modifie les phénomènes de transfert thermique dans la serre. Étant donné la popularité croissante de l'utilisation de ce système pour réduire la nécessité du chauffage, il serait pertinent de le modéliser dans le cadre d'une étude. En effet, les données sont disponibles pour effectuer le même processus de calibration et validation que celui présenté dans cette étude.

Troisièmement, lorsque la serre est fermée (sans ventilation), il y a des écarts dans la prédiction de l'humidité relative de l'air. La faiblesse au niveau de la simulation de l'humidité semble généralisée dans la littérature (Zhou et al., 2023). Tel que discuté dans l'article, les échanges hygrothermiques avec les plantes peuvent être amélioré par leur étude en conditions météorologiques froides, ainsi que le suivi précis de leur taille. Ceci entraînera l'amélioration les prédictions de l'humidité dans l'air.

Ce modèle n'inclut délibérément pas la condensation sur les parois. Ce choix a été fait à la suite des résultats obtenus dans l'étude. Bien qu'il y ait de la condensation, il serait difficile de tirer une conclusion compte tenu des autres imprécisions des prédictions de l'humidité relative du modèle actuel. Avant de ce faire, il serait pertinent de valider le bilan massique de l'eau de la serre. Étant donné que le débit d'air extérieure est supposé bien quantifié dans le modèle, à partir de la quantification de la quantité d'eau introduit dans la serre par irrigation, le bilan massique de l'eau de la serre pourrait être robuste. Cela entraînerait une meilleure validation du débit d'évapotranspiration et ainsi l'estimation de la condensation pourrait être faite. Ensuite, un modèle de condensation récemment développé pourrait être intégré (Lavigueur, 2022). Compte tenu de l'incertitude sur plusieurs paramètres de ce modèle récent, lors de son intégration, ses paramètres devront être ajoutés au processus de calibration.

Quatrièmement, le PAR n'est pas validé, bien qu'il soit une variable primordiale pour la vitalité des cultures, ainsi que pour le bilan énergétique. Puisque la température de l'air d'une serre est très dépendante du rayonnement solaire, on tient pour acquis que si la température est bien modélisée, le rayonnement solaire aussi, donc le PAR. Ce choix a été fait puisque le capteur dans la serre est positionné dans un coin, et n'est pas représentatif des conditions globales dans la serre. L'ajout d'un capteur plus central permettrait d'obtenir une meilleure représentativité de la mesure réelle.

Cette validation pourrait soulever les limites du modèle quant au rayonnement solaire, qui ne semble toutefois par avoir beaucoup d'influence dans l'étude de cas. La modélisation du rayonnement solaire avec TRNSYS ne permet pas d'avoir une fraction du rayonnement direct qui, par dispersion, se propage dans la serre comme du rayonnement diffus, bien qu'une modification manuelle pourrait être faite. De plus, dans TRNSYS, il est possible d'ajouter de l'ombrage, ce qui n'a pas été fait pour ce modèle malgré la présence d'une serre jumelle voisine et d'un brise-vent aux alentours de la serre.

Cinquièmement, la période de calibration, en novembre, n'était pas idéale. Cette période a été choisie puisqu'il n'y avait pas de ventilation naturelle ni couverture flottante à ce moment de l'année, ce qui est en partie dû à la combinaison d'un redoux et d'une période nuageuse. Ces conditions météorologiques ne sont pas nécessairement représentatives de la météo hivernale du Québec. Une période où la serre est passive, avec des journées ensoleillées, nuageuses, et aussi plus froides viendrait améliorer la représentativité de la période de calibration.

Finalement, un défaut de TRNSYS est qu'il n'est pas disponible à tout le monde, une licence doit être achetée, ce qui limite les utilisateurs. Le logiciel gratuit, EnergyPlus, semble ressortir comme un outil fiable et populaire. Cet outil utilise une méthode de résolution de bilans similaire à TRNSYS, mais devra être évalué pour déterminer son efficacité, puisque sa structure est tout de même différente. La gratuité de ce logiciel est un avantage considérable qui faciliterait le déploiement du modèle à plus grande échelle.

4.3 Perspective d'utilisation du modèle

Le modèle n'a pas été développé avec un objectif d'utilisation définis. L'objectif du projet de recherche s'écrit plutôt dans un cadre exploratoire pour évaluer la précision avec laquelle un modèle TRNSYS de serre de petite taille peut décrire la réalité, et surtout comment le modèle peut être ensuite utilisé pour fournir des informations. Selon les forces et les faiblesses du modèle, il sera utile dans différents contextes.

Dans la section 4.3.1, la versatilité et l'adaptabilité du modèle aux divers contextes sont discutées. Ensuite, dans la section 4.3.2, les quantités d'intérêt possibles à simuler avec le modèle sont présentées. Finalement, la section 4.3.3 aborde différents buts et objectifs pouvant être atteints.

4.3.1 Polyvalence et adaptation

Le modèle développé lors de ce projet de recherche est basé sur une serre relativement simple, avec peu de systèmes. Il s'agit d'un cas de base intéressant auquel peut être ajouté des modèles de systèmes actifs ou passifs. L'avantage de TRNSYS est que des sous-modèles validés de la librairie peuvent s'y implémentent simplement. Par ailleurs, l'ajout d'éclairage artificiel et d'un contrôle adapté est possible, et a été fait pour le rapport CommunoSerre (Gailloux et al., 2023), ainsi qu'un article présenté à la conférence eSim2022 (Talbot et al., 2022).

Au niveau de la construction de la serre modélisée, le modèle a été validé sur une serre individuelle en arche gothique de 250 m². La littérature suggère que tant qu'il y a une bonne circulation d'air, la superficie et la forme de la serre peuvent varier, car l'hypothèse d'une cuve parfaitement brassée s'applique aux serres de plus de 1000 m² (Adesanya et al., 2022; Choab et al., 2021; Semple et al., 2017).

En général, l'ajout de différentes variétés de cultures, de nouveaux systèmes ou phénomènes physiques peut être réalisé dans TRNSYS en créant un nouveau *Type* codé en Fortran ou en utilisant des langages de programmation plus courants tels que Matlab et Python.

4.3.2 Indicateurs de performance

Plusieurs indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer les performances énergétiques d'une serre. Bien sûr, dans ce contexte, les variables validées incluent la température et l'humidité relative de l'air interne, ainsi que la consommation énergétique en chauffage. D'autres variables d'intérêt peuvent également être considérées.

Premièrement, le PAR disponible aux plantes est une quantité importante pour les serres. À partir du bilan énergétique, la PPFD peut être estimée à partir du rayonnement solaire interceptée par le sol divisé par l'aire de la surface. Cette quantité doit être convertie, le multiple $2,02 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ prend en compte la distribution théorique du spectre solaire pour calculer la quantité de photon provenant du rayonnement entre les longueurs d'onde 380 et 730 nm par unité d'énergie du rayonnement solaire totale (Reis & Ribeiro, 2020).

Deuxièmement, les dérivés de l'humidité, comme le DPV, peuvent être calculés à partir de la température et l'humidité relative. Pour estimer les besoins en eau pour l'arrosage, le débit d'évapotranspiration pourrait être utilisé comme une mesure indicative.

Troisièmement, la croissance de plantes peut être calculée à partir des conditions environnementales internes de la serre. Il est possible d'ajouter un modèle dynamique de croissance des plantes, comme dans l'article présenté à la conférence eSim2022 (Talbot et al., 2022). Concernant les données d'entrée, la concentration en CO_2 dans l'air est actuellement manquante. Elle pourrait être fixée à la concentration extérieure, ou un bilan spécifique pourrait être ajouté, mais une validation ultérieure serait nécessaire à partir de données mesurées.

Finalement, pour calculer la consommation énergétique totale, la somme de tous les systèmes actifs intégrés au modèle doit être calculée.

4.3.3 Objectifs et fonctions

La précision des prédictions d'un modèle détermine l'objectif qu'il peut remplir. Les principales catégories d'objectifs sont la comparaison et la prédiction. Pour la comparaison, la précision attendue du modèle est moins critique tant que l'ordre de grandeur des prédictions est correct et que les tendances journalières sont cohérentes avec les conditions météorologiques, permettant ainsi une analyse de scénarios, de mesures de réduction énergétique et même de dimensionnement d'équipements à haut niveau (Cimmino & Bernier, 2022). Pour les prédictions, une précision accrue est essentielle, surtout pour le contrôle, les scénarios de consommation future et la vérification des performances, permettant ainsi une utilisation précise du modèle pour le dimensionnement des équipements et la gestion de scénarios où la pointe énergétique est un défi majeur dans la transition énergétique au Québec.

Les résultats de validation du modèle développé dans ce projet indiquent qu'il peut produire des prédictions précises pour la température intérieure horaire, l'humidité relative intérieure horaire, ainsi que la consommation mensuelle d'énergie de chauffage. Ces résultats facilitent la réalisation de la majorité des types d'analyses. Cependant, concernant l'humidité, en fonction de la rigueur de la modélisation et du fonctionnement en mode fermé de la serre, les résultats doivent être interprétés avec prudence. Bien que le modèle demeure suffisamment précis pour comparer des scénarios, de potentiels problèmes au niveau de l'évaluation de séquences de contrôle de l'humidité peuvent survenir.

En conclusion, il est crucial de se rappeler qu'un modèle demeure une représentation théorique et que sa précision sera toujours sujette à l'incertitude induite par l'exploitation réelle. Il est essentiel de savoir identifier les compromis nécessaires et de gérer les attentes associées à un modèle. Un modèle énergétique exigera toujours une analyse minutieuse du cas d'étude et des ajustements appropriés pour une nouvelle étude ou un scénario spécifique. Une serre se rapproche d'un procédé industriel, comparativement à un bâtiment. Un degré de complexité supplémentaire est introduit, par l'incertitude du contrôle parfois prédictif ou ajustable par les opérateurs, ainsi que la forte influence des conditions météorologiques.

CONCLUSION

Les serres offrent une solution intéressante pour les régions au climat froid, comme le Québec, afin d'augmenter leur production alimentaire. Le maintien des conditions optimales de croissance des cultures toute l'année requiert inévitablement une augmentation de la consommation d'énergie. La rentabilité des serres est dépendante de leur efficacité énergétique. Afin d'optimiser la conception et le fonctionnement des serres, et de pouvoir, éventuellement, y intégrer à des systèmes énergétiques, idéalement décarbonisés, les analyses des performances énergétiques sont nécessaires. L'objectif de ce mémoire est de développer un modèle énergétique de serre de petite taille avec l'aide du logiciel TRNSYS permettant d'évaluer avec précision les performances énergétiques d'une serre.

Partant d'un modèle de serre préalablement créé par l'équipe de recherche des co-directeurs de ce mémoire, le modèle a été exploité et évalué, puis amélioré en s'appuyant sur une revue de la littérature et des approches de modélisation du logiciel TRNSYS. Les choix d'approches de modélisation qui sont ressortis de cette évaluation sont décrits dans les sections 3.4 et 3.9 de ce mémoire, puis certains de ces choix sont discutés dans la section 4.1.2. Afin d'obtenir un modèle hautement descriptif, les approches de modélisation détaillées sont favorisées, un réseau d'écoulement de l'air (TRNFLOW) pour l'infiltration et la ventilation, une distribution en trois dimensions des échanges thermiques entre les surfaces, un modèle dynamique des échanges hygrothermiques des plants de laitue, et la conduction dans le sol discrétisé en trois dimensions en sont des exemples.

Le modèle a ensuite été calibré avec une méthodologie de calibration automatisée à plusieurs étapes présentée dans la section 3.3. Les paramètres incertains à calibrer sont identifiés par une analyse de sensibilité dont les résultats sont présentés dans la section 3.5. La méthodologie et les résultats de calibration sont discutés à la section 4.1.3.

Le modèle calibré est finalement validé à partir de données provenant de deux serres différentes, une froide et une chauffée (Section 3.6). Les résultats de validation sont

satisfaisants en comparaison avec la littérature, comme détaillé dans la section 4.1.1. Le modèle est donc considéré comme suffisamment précis et exploitable pour des études futures.

Les limites de ce projet de recherche sont présentées dans la section 4.2 de la discussion. Elles touchent autant les données collectées que la méthodologie utilisée. Le modèle développé sur TRNSYS est reproductible et flexible, deux atouts majeurs en termes de perspective d'exploitation d'un modèle. Bien entendu, l'utilisation de TRNSYS nécessite une familiarité avec le logiciel, ce qui peut constituer un obstacle à son déploiement à grande échelle. Quel que soit l'outil utilisé pour le développement, un modèle détaillé de serre exige inévitablement des compétences et des manipulations en raison de la diversité des possibilités de constructions, des systèmes intégrés et de modes d'opération.

L'objectif fondamental d'un modèle est d'étudier les performances énergétiques d'une serre pour guider les producteurs, les législateurs et les entrepreneurs de l'industrie serricole et énergétique du Québec. Un exemple d'utilisation a été réalisé dans le cadre du projet interdisciplinaire CommunoSerre (Gailloux et al., 2023). Le modèle a été utilisé pour comparer l'impact de choix technologiques de matériaux de l'enveloppe et de stratégies d'exploitation sur la consommation énergétique, ainsi que sur la durée de saison de croissance pour une serre communautaire située à Montréal, Québec. Pour ce faire, les données météo de Montréal ont remplacé les locales, les propriétés ont été adaptées pour les quatre recouvrements, et des systèmes actifs ont été ajoutés (chauffage, éclairage). Comme le modèle a été utilisé avant sa calibration finale, les résultats sont essentiellement comparatifs, fournissant une vue d'ensemble du positionnement des scénarios entre eux. Avec le modèle validé, l'étude pourrait produire des résultats précis permettant une comparaison économique des scénarios, améliorant ainsi la communication des recommandations aux décideurs.

L'exemple du projet CommunoSerre illustre la diversité d'analyses pouvant être réalisée avec le modèle énergétique de serre, et démontre pourquoi l'amélioration, la calibration et la validation d'un modèle ont fait l'objet d'un projet de recherche.

RECOMMANDATIONS

Avec des données expérimentales supplémentaires, la validation des approches de modélisation de ce modèle pourrait être approfondie pour les éléments suivants :

1. Valider la modélisation de l'évapotranspiration à l'aide d'un bilan d'humidité en serre fermée. En mesurant la quantité d'eau d'arrosage (intrant) et en considérant que le débit d'infiltration (extrant) est validé par les résultats de cette étude, l'inconnu du bilan massique de l'humidité dans l'air est l'évapotranspiration.
2. Valider la modélisation du PAR disponibles pour les plantes à partir de plusieurs points de mesures afin d'éliminer l'influence des éléments structurels.
3. Valider la modélisation de la température du sol avec un suivi plus précis de la température du sol et à différentes profondeurs. Cela permettrait d'isoler de calibrer les propriétés du sol à partir du bilan conductif dans le sol.
4. Installer plusieurs sondes de température pour effectuer une moyenne et évaluer si la discrétisation du volume d'air de la serre dans le modèle améliore les résultats.

À la lumière de ce projet de recherche, il est recommandé de :

1. Évaluer l'applicabilité du modèle avec différentes serres. Une validation dans différents contextes permet de circonscrire le champ d'application du modèle.
2. Effectuer une calibration sur une période de chaque saison, ainsi qu'une validation sur l'année entière. La calibration avec des données mesurées sur une période où la serre est passive (*free-floating*) est idéale.
3. Optimiser la méthodologie de calibration pour améliorer le temps de calcul est recommandé, n'étant pas une contrainte lors de notre projet de recherche. De plus, établir une procédure claire avec un arbre décisionnel basé sur les caractéristiques des données disponibles faciliterait la reproduction de la méthodologie de calibration.
4. Intégrer la modélisation des échanges thermiques des couvertures flottantes utilisées pour protéger les plantes pendant les nuits d'hiver, au lieu d'éviter cette période lors de la validation du modèle. Les données étant déjà disponibles grâce à une sonde de température sous la couverture, la validation de l'intégration des couvertures au modèle peut être réalisée. Cette pratique en culture froide offre des opportunités de gains concrets pour les producteurs québécois, et la recherche scientifique est limitée dans ce domaine.

ANNEXE I

VOLUME DE CONTRÔLE DES BILANS ÉNERGÉTIQUES ET MASSIQUES DANS UNE SERRE

Les bilans énergétique et massique d'une serre peuvent s'effectuer sur différents volumes de contrôle de l'air intérieur. Premièrement, l'étude numérique de la dynamique des fluides (CFD), discrétise le volume d'air dans la serre en plusieurs éléments (selon le maillage). Puis, des bilans thermiques et massiques entre chacun de ces volumes discrétisés sont résolus avec des outils d'analyse de la mécanique des fluides numériques. La CFD est considérablement complexe et exigeante en temps de calcul. Son avantage est de décrire les conditions intérieures de l'air de la serre et leur changement dans l'espace et le temps, comme la stratification. Néanmoins, la lourdeur de calcul des modèles utilisant la CFD limite encore son applicabilité pour des simulations saisonnières ou annuelles (Piscia et al., 2015).

L'hypothèse de la cuve parfaitement brassée fait consensus dans la littérature pour répondre aux besoins de la simulation des performances énergétiques d'une serre (Katzin et al., 2022; Roy et al., 2002; Vanthoor et al., 2011). Cette hypothèse permet de poser le volume d'air intérieur de la serre comme étant homogène, ainsi, un seul volume de contrôle est nécessaire dans les bilans thermique et massique.

Dans certains cas, l'air est divisé en zones, comme l'air au-dessus et au-dessous d'un écran thermique ou d'autres divisions, mais on suppose toujours que chaque zone est parfaitement agitée (Baglivo et al., 2020; Ha et al., 2015; Ogunlowo et al., 2022). Parmi les articles recensés à ce sujet, deux, ceux de Baglivo et al. (2020) et Ha et al. (2015) comparent l'impact de diviser l'air de la serre en plusieurs zones, tandis que Ogunlowo et al. (2022) s'appuient sur les résultats de Baglivo et al. (2020).

Ha et al. (2015) ont divisé le volume d'air d'une serre de petite taille à la verticale et à l'horizontale (sur la largeur), Figure-A I-1(a). En utilisant la division horizontale du volume d'air, leurs résultats de simulation se rapprochent de 8% à 5% d'erreurs des mesures

expérimentales de consommation énergétique, comparativement avec un volume d'air unique. Tandis qu'avec la division verticale, les résultats de simulation s'éloignent des mesures expérimentales. Toutefois, ces résultats sont validés sur seulement deux périodes de deux jours, ce qui peut laisser un doute sur leur représentativité.

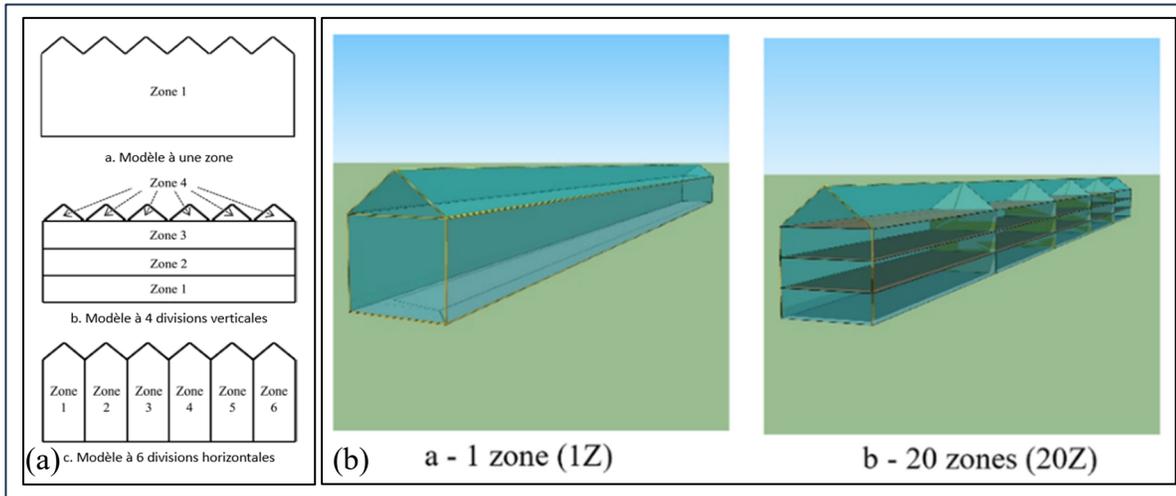


Figure-A I-1 Division du volume d'air des modèles de serres par (a) Ha et al. (2015) et (b) Baglivo et al. (2020)

(a) Adaptée de Ha et al. (2015, p. 6) et (b) tirée de Baglivo et al. (2020, p. 7)

De leur côté, Baglivo et al. (2020) ont divisé une serre de grande taille en vingt volumes (4 à la verticale x 5 à l'horizontale), Figure-A I-1(b). Les résultats de simulation avec le volume d'air divisé en plusieurs zones montrent une stratification verticale de l'air, ce qui met en lumière l'utilité de diviser le volume d'air en plusieurs zones. Toutefois, il est ardu de savoir si cela améliore l'exactitude du modèle puisqu'ils valident les résultats de simulation avec ceux d'un modèle EnergyPlus au lieu de mesures expérimentales.

ANNEXE II

DESCRIPTION DES BILANS THERMIQUES ET MASSIQUE D'UNE SERRE

Cette section présente les bilans énergétiques et massiques pour chacun des nœuds d'une serre. Les bilans présentés sont ceux modélisés par le Type 56 dans TRNSYS (Klein et al., 2017; TRNSYS 18, 2017b). TRNSYS s'appuie sensiblement sur la méthode des bilans thermiques (*Heat balance method*, HBM) de *ASHRAE Load Calculations Applications Manual* (ASHRAE, 2013). D'abord, les bilans thermiques sont détaillés, suivis du bilan massique de la vapeur d'eau.

Bilans thermiques

La méthode des bilans thermiques (*Heat balance method*, HBM) applique un bilan thermique à trois endroits : surfaces externes, surfaces internes et l'air.

Le bilan du nœud d'air de la serre est décrit par l'équation (A II-1). Pour une serre, les gains internes convectifs inclus, par exemple, la chaleur des moteurs des ventilateurs de circulation, ainsi que l'échange convectif des plantes avec l'air.

$$\begin{aligned} \rho_{air} c_{p,air} V_{air} \frac{dT_{air}}{dt} & \quad (A II-1) \\ & = Q_{Surf,air} + Q_{Inf,air} + Q_{Vent,air} + Q_{G,c,air} + Q_{Solair,air} \\ & + Q_{HVAC,air} \end{aligned}$$

Où T_{air} est la température de l'air (°C), $\rho_{air} c_{p,air} V_{air}$ est la capacité thermique des masses de la serre, $Q_{Surf,air}$ est les gains convectifs avec les surfaces, $Q_{Inf,air}$ est les gains par infiltration, $Q_{Vent,air}$ est les gains par ventilation, $Q_{G,c,air}$ est les gains internes convectifs par les équipements, les occupants, etc., $Q_{Solair,air}$ est la fraction du rayonnement solaire entrant qui est immédiatement transféré en gain convectif à l'air, et $Q_{HVAC,air}$ est les gains par le système CVCA de chauffage ou de refroidissement.

Le bilan d'une surface externe est décrit par l'équation (A II-2).

$$Q_{s,o} = S_{s,o} + Q_{c,s,o} + Q_{r,s,o} \quad (\text{A II-2})$$

Où $Q_{s,o}$ est le flux conductif de la surface externe vers le mur, $S_{s,o}$ est le rayonnement solaire absorbé par la surface externe, $Q_{c,s,o}$ est le flux convectif échangé entre la surface externe et l'air extérieur, et $Q_{r,s,o}$ est le transfert de chaleur radiative net vers les surfaces extérieures

Le bilan d'une surface interne est décrit par l'équation (A II-3).

$$Q_{s,i} = S_{s,i} + Q_{c,s,i} + Q_{r,s,i} \quad (\text{A II-3})$$

Où $Q_{s,i}$ est le flux conductif du mur vers la surface interne, $S_{s,i}$ est le rayonnement solaire absorbé par la surface interne, $Q_{c,s,i}$ est le flux convectif échangé entre la surface interne et l'air intérieur, et $Q_{r,s,i}$ est le transfert de chaleur radiative net vers les surfaces internes

Le flux conductif entre la surface externe et la surface interne est calculé par la méthode des fonctions de transfert (*Transfer Function Method, TFM*) de Mitalas (1973).

Le bilan de transfert de chaleur radiative net est décrit à l'équation (A II-4).

$$Q_{r,s} = Q_{g,r,i,s} + Q_{lwr,s} + Q_{wall-gain} \quad (\text{A II-4})$$

$Q_{g,r,i,s}$ est les gains internes radiatifs par les équipements et/ou les occupants

$Q_{lwr,w}$ est les gains radiatifs de grandes longueurs d'onde par les autres surfaces de la zone

$Q_{wall-gain}$ est un flux supplémentaire défini par l'utilisateur.

Dans une serre, les bilans thermiques s'effectuent généralement aux nœuds suivants (Mohammadi et al., 2020; Righini et al., 2020; Vanthoor et al., 2011; Zhang et al., 2020) :

1. Surface extérieure de l'enveloppe, multiplié par le nombre de parois de l'enveloppe;
2. Surface intérieure de l'enveloppe, multiplié par le nombre de parois de l'enveloppe;
3. Air intérieur de la serre;
4. Cultures;
5. Plancher de la serre;
6. Sol de la serre, multiplié par le nombre de couches n .

Bilan massique de la vapeur d'eau

Le bilan massique de la vapeur d'eau du nœud d'air de la serre est défini par l'équation (A II-5).

$$M_{eff} \frac{d\chi_w}{dt} = \dot{m}_{Inf} + \dot{m}_{Vent} + \dot{m}_{g,Air} \quad (\text{A II-5})$$

Où M_{eff} est la capacitance effective d'humidité de l'air, $(\frac{d\chi_w}{dt})$ est le changement net de la concentration de vapeur d'eau dans la serre, \dot{m}_{Inf} est l'échange de vapeur par infiltration, \dot{m}_{Vent} est l'échange de vapeur par ventilation et $\dot{m}_{g,Air}$ est le gain interne d'humidité.

Les gains internes d'humidité typiques d'une serre sont la transpiration des cultures, l'évaporation de l'eau du sol ou d'autres surfaces, ainsi que la condensation sur les parois. L'humidification $+\dot{m}_{Hum}$ et la déshumidification $-\dot{m}_{Dehum}$ peuvent aussi s'intégrer au bilan.

ANNEXE III

MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE DANS TRNSYS

Cette annexe résume les approches de modélisation dans TRNSYS pour modéliser les gains solaires d'un bâtiment en trois dimensions. Les informations proviennent de la documentation de TRNSYS (TRNSYS 18, 2017b, 2017a). Le rayonnement solaire est une variable d'entrée du modèle. L'annexe est divisée selon les étapes du processus de modélisation du rayonnement solaire dans TRNSYS à partir de cette variable.

Détermination de l'angle d'incidence aux surfaces externes de la serre

Les propriétés radiométriques des surfaces de la serre dépendent de l'angle d'incidence. La première étape est donc de calculer l'angle d'incidence du rayonnement solaire à chaque surface. L'angle d'incidence dépend de l'orientation de la surface et de l'angle du rayonnement solaire. L'orientation de la surface est fixe, tandis que l'angle du rayonnement solaire varie en fonction de sa nature, qu'il soit direct ou diffus.

Dans le cas classique où un fichier météorologique standard provenant d'une station météo est fourni en entrée à un modèle, le rayonnement solaire horizontal global est fourni, ainsi que les proportions de rayonnement direct ou diffus. Dans le cas où seulement le rayonnement solaire horizontal global est fourni en entrée au modèle, les proportions de rayonnement direct et diffus sont calculées par un modèle empirique. Un processeur de rayonnement solaire (Type 16) est disponible dans TRNSYS. Le Type 16 offre deux méthodes pour obtenir le rayonnement direct et diffus sur une surface horizontale à partir des données de rayonnement total sur une surface horizontale. Chaque méthode requiert différentes variables supplémentaires à fournir (température, humidité relative).

Rayonnement incident aux surfaces

Une fois la nature du rayonnement solaire horizontale divisée, le rayonnement incident sur chacune des surfaces inclinées est calculé. Le Type 16 propose cinq sous-modèles de

rayonnement sur une surface inclinée. Les mêmes équations sont utilisées pour projeter le rayonnement direct et le rayonnement réfléchi par le sol sur une surface inclinée. Toutefois, ces sous-modèles diffèrent lors de l'estimation du rayonnement diffus sur une surface inclinée. Rasheed et al. (2018) présentent ces sous-modèles et évaluent leur impact sur la température intérieure de la serre. Ils ont obtenu des NSE allant de 0.761 à 0.972. (p.10, Rasheed et al., 2018). Cette même étude paramétrique fut menée lors du développement du modèle présenté dans ce mémoire et les écarts entre les sous-modèles étaient négligeables.

Ombre sur les surfaces externes

À chaque intervalle de temps, les valeurs du rayonnement direct et diffus incidents sur chaque surface externe de l'enveloppe sont calculées et transmises au modèle de bâtiment 3D (Type 56). Ces valeurs de rayonnement sont susceptibles d'être altérées par l'ombrage extérieur. La fraction d'ensoleillement, déterminée par la position du Soleil, dicte si le rayonnement solaire atteindra les surfaces externes du bâtiment ou sera obstrué. Avant la simulation, les fractions d'ensoleillement de chaque surface sont préalablement calculées. Une discrétisation du ciel en 2305 carreaux est effectuée, représentant des positions solaires spécifiques. Pour chacun de ces carreaux, équivalant à une position précise du Soleil, la fraction du rayonnement solaire interceptée par l'ombrage est calculée à l'aide de la méthode de projection et de découpage de polygones 2D (*2D polygon clipping*).

Interaction du rayonnement solaire avec les surfaces du Type 56

Après ces étapes, le flux de rayonnement solaire direct et diffus intercepté par les surfaces du bâtiment est connu. Il peut atteindre deux types de surface: un mur ou une fenêtre.

Le mur, en tant qu'élément opaque, réagit au rayonnement solaire en le réfléchissant ou en l'absorbant en fonction de ses propriétés physiques. Le rayonnement réfléchi est dissipé dans l'air extérieur, tandis que le rayonnement absorbé est transféré à la paroi ou échangé avec l'air environnant.

Une fenêtre est un matériau translucide permettant la pénétration du rayonnement extérieur. La surface de la fenêtre peut ainsi réfléchir, absorber ou transmettre le rayonnement solaire. TRNSYS fait appel au programme WINDOW développé par le laboratoire Lawrence Berkeley pour déterminer les propriétés radiométriques et thermiques de fenestrations complexes. WINDOW permet de calculer la réflexion, l'absorption et la transmission du rayonnement solaire dans un système à parois multiples avec divers remplissages, tel que présenté à la Figure-A III-1. Le modèle intègre les réflexions multiples, la dépendance angulaire et la dépendance spectrale. À chaque angle d'incidence (par intervalles de 10°), WINDOW calcule l'absorption, la réflectivité et la transmissivité du rayonnement solaire global, ainsi que la réflectivité et la transmissivité du spectre visible. Les caractéristiques des fenêtres sont générées à l'aide de WINDOW avant d'être attribuées à une fenêtre dans le modèle TRNSYS.

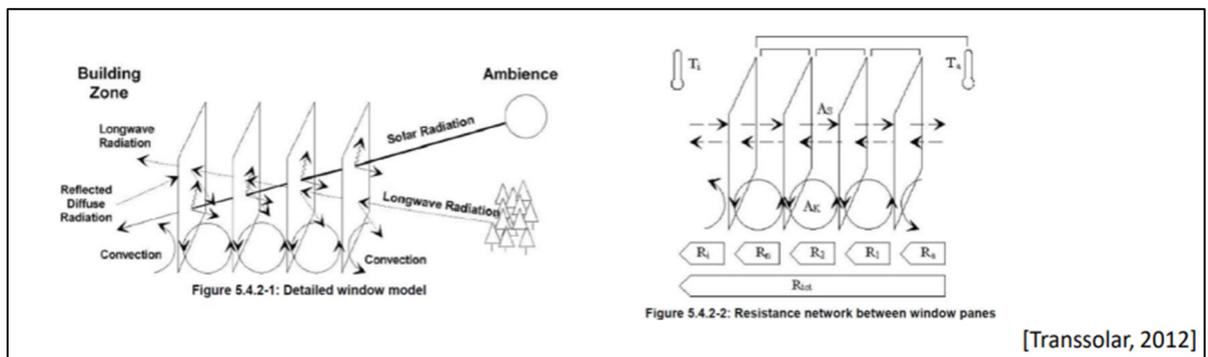


Figure-A III-1 Modélisation du transfert thermique d'une fenêtre

Tirée de TRNSYS 18 (2017b)

Pour modéliser les transferts thermiques dans les fenêtres, le Type 56 utilise le *2-Band-Solar-Radiation-Window-Model* qui divise le rayonnement solaire en deux parties : visible et non-visible. Il considère la fraction du spectre solaire étant visible à 46,6%, soit la fraction du rayonnement entre 380-780 nm émis par un corps noir à 5800K. Pour chaque surface, quatre calculs de propriétés radiométriques sont déterminés : direct visible, direct non-visible, diffus visible, et diffus non-visible. Les paramètres du rayonnement direct sont interpolés selon la position du Soleil, puis ceux du rayonnement diffus de manière hémisphérique. Pour chaque surface, il y aura alors un flux de rayonnement réfléchi, absorbé et transmis.

Distribution du rayonnement courtes longueurs d'onde

Le rayonnement transmis par les fenêtres est ensuite distribué sur les surfaces intérieures du bâtiment. La distribution se fait encore selon le type de rayonnement, mais ne dépend plus du spectre.

Comme le rayonnement solaire réfléchi par les surfaces ne peut être calculé par le Type 56 que si la quantité de rayonnement solaire transmise par toutes les fenêtres externes et internes est connue, une boucle itérative pour toutes les fenêtres d'une zone est exécutée jusqu'à ce que tout le rayonnement solaire direct et diffus entrant soit absorbé par une surface de mur ou d'une fenêtre, ou transmis à l'extérieur par une fenêtre. Après la distribution complète du rayonnement solaire entrant sur tous les surfaces du bâtiment, y compris les réflexions multiples, les calculs des températures de surface et des températures des fenêtres sont effectués.

Distribution interne du rayonnement du faisceau

Les modes standard et détaillé sont disponibles pour la distribution du rayonnement direct. Le mode standard utilise un facteur défini par l'utilisateur, appelé GEOSURF, pour répartir le rayonnement direct sur les surfaces d'une zone. GEOSURF représente la fraction du rayonnement direct atteignant les surfaces individuelles, avec une valeur maximale de 1 par zone.

Le mode détaillé de distribution du rayonnement utilise un programme externe, TRNSHD, pour générer une matrice d'insolation. Le ciel est discrétisé en 2305 carreaux, représentant des positions solaires spécifiques, tel que présenté à la Figure-A III-2. Ensuite, pour chaque carreau et chaque surface externe, une fraction d'insolation est attribuée à chacune des surfaces internes du bâtiment.

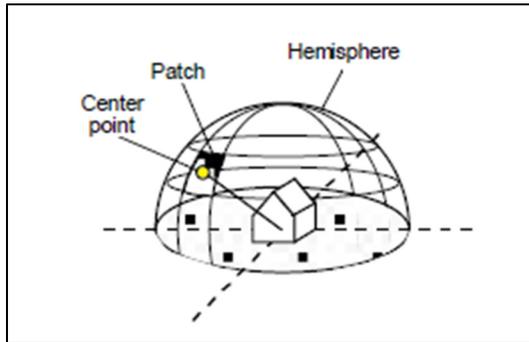


Figure-A III-2 Discrétisation du ciel en carreaux

Tirée de TRNSYS 18 (2017b)

Bien que le rayonnement direct puisse être traité dans son ensemble de la même manière que le rayonnement diffus, il n'est pas possible, dans les options TRNSYS, de convertir uniquement une fraction du rayonnement direct en rayonnement diffus, comme c'est le cas pour certains matériaux (Al-Helal et al., 2020).

Distribution du rayonnement diffus

Deux modes de distribution du rayonnement diffus, standard et détaillé, reposent sur des principes différents. Le mode standard se fonde sur les rapports de surface pondérés absorption-transmission pour toutes les surfaces, tandis que le mode détaillé utilise le facteur de Gebhart pour le rayonnement diffus à ondes courtes. Un programme auxiliaire, TRNVFM, basé sur la matrice des facteurs de vue, est utilisé dans le mode détaillé.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adesanya, M. A., Na, W.-H., Rabiou, A., Ogunlowo, Q. O., Akpenpuun, T. D., Rasheed, A., Yoon, Y.-C., & Lee, H.-W. (2022). TRNSYS Simulation and Experimental Validation of Internal Temperature and Heating Demand in a Glass Greenhouse. *Sustainability*, *14*(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/su14148283>
- Agrios, G. (2005). Sclerotinia diseases In. *Plant pathology*. 5th ed. Elsevier Academic Press, New York, NY, 546-550.
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018). Energy-efficient design of greenhouse for Canadian Prairies using a heating simulation model. *International Journal of Energy Research*, *42*(6), 2263-2272. <https://doi.org/10.1002/er.4019>
- Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2020). Modeling heating demands in a Chinese-style solar greenhouse using the transient building energy simulation model TRNSYS. *Journal of Building Engineering*, *29*, 101114. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101114>
- Algarni, S., & Nutter, D. (2015). *Survey of Sky Effective Temperature Models Applicable to Building Envelope Radiant Heat Transfer*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4212.5526>
- 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), Article 2. <https://doi.org/10.3390/en13020472>
- Al-Helal, I., Picuno, P., Alsadon, A. A., Ibrahim, A., Shady, M., & Abdel-Ghany, A. M. (2022). Effect of Shape, Orientation and Aging of a Plastic Greenhouse Cover on the Degradation Rate of the Optical Properties in Arid Climates. *Applied Sciences*, *12*(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/app12052709>
- Altes-Buch, Q., Quoilin, S., & Lemort, V. (2022). A modeling framework for the integration of electrical and thermal energy systems in greenhouses. *Building Simulation*, *15*(5), 779-797. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0851-2>
- Amani, M., Foroushani, S., Sultan, M., & Bahrami, M. (2020). Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications. *Applied Thermal Engineering*, *181*, 115979. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115979>
- ASHRAE. (2013). *Load calculation applications manual* (Second edition. I-P edition). ASHRAE.
- ASHRAE. (2014). *Guideline 14-2014, Measurement of energy and demand savings* [Technical Report]. American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers.

- ASHRAE. (2017). 19.7 Model Calibration. In *ASHRAE Handbook—Fundamentals* (ASHRAE, p. 19.34-19.37).
- Baba, F. M., Ge, H., Zmeureanu, R., & Wang, L. (2022). Calibration of building model based on indoor temperature for overheating assessment using genetic algorithm: Methodology, evaluation criteria, and case study. *Building and Environment*, *207*, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108518>
- Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., & Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*, *373*, 133753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133753>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115698>
- Bartok, J. W. (2001). *Energy Conservation for Commercial Greenhouses (NRAES 3)*. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES). <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/67126>
- Beaulac, A., Monfet, D., & Haillet, D. (2023). *Revue de la modélisation énergétique de serres avec TRNSYS. 1*, 69-76. <https://doi.org/10.25855/SFT2023-064>
- Bergman, T. L. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.
- Bontsema, J., van Henten, E. J., Gieling, Th. H., & Swinkels, G. L. (2011). The effect of sensor errors on production and energy consumption in greenhouse horticulture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *79*(1), 63-66. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.08.008>
- Boulard, T., Feuilloley, P., & Kittas, C. (1997). Natural Ventilation Performance of Six Greenhouse and Tunnel Types. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *67*(4), 249-266. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0167>
- Bradley, D. (2011). Type 56 Zone Air Capacitance [Onebuilding]. *TRNSYS-users*. <http://lists.onebuilding.org/pipermail/trnsys-users-onebuilding.org/2011-June/021781.html>
- Cacabelos, A., Eguía, P., Febrero, L., & Granada, E. (2017). Development of a new multi-stage building energy model calibration methodology and validation in a public library. *Energy and Buildings*, *146*, 182-199. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.071>

- Carotti, L., Pistillo, A., Zauli, I., Meneghello, D., Martin, M., Pennisi, G., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2023). Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation. *Agricultural Water Management*, 285, 108365. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108365>
- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management* (2e éd.). CABI.
- Chen, J., Yang, J., Zhao, J., Xu, F., Shen, Z., & Zhang, L. (2016). Energy demand forecasting of the greenhouses using nonlinear models based on model optimized prediction method. *Neurocomputing*, 174, 1087-1100. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.105>
- Choab, N., Allouhi, A., Maakoul, A. E., Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2021). Effect of Greenhouse Design Parameters on the Heating and Cooling Requirement of Greenhouses in Moroccan Climatic Conditions. *IEEE Access*, 9, 2986-3003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047851>
- Chong, A., Gu, Y., & Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, 253, 111533. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>
- Cimmino, M., & Bernier, M. (2022). *ENE6510: Modélisation énergétique des bâtiments*.
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Coudret, S. (2022). *Mise en place d'une campagne de mesure dans des espaces d'Agriculture en Environnement Contrôlé*. École de technologie supérieure.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Perderson, O. C., & Winkelmann, C. F. (2000). *EnergyPlus: Energy simulation program*. <https://www.aivc.org/resource/energyplus-energy-simulation-program>
- Cruz-Valeriano, E., Begovich, O., & Ruiz-León, J. (2013). Modeling of a greenhouse using Particle Swarm Optimization. *2013 10th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 268-273. <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2013.6676034>

- Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., Cultrera, M., Scotton, P., Mueller, J., Bertermann, D., Mendrinós, D., Pasquali, R., Perego, R., Pera, S., Di Sipio, E., Cassiani, G., De Carli, M., & Bernardi, A. (2020). An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics*, 85, 101758. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101758>
- Delgarm, N., Sajadi, B., Azarbad, K., & Delgarm, S. (2018). Sensitivity analysis of building energy performance : A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods. *Journal of Building Engineering*, 15, 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2017.11.020>
- de Zwart, H. F. (1996). *Analyzing Energy-Saving Options in Greenhouse Cultivation Using a Simulation Model* [Ph.D., Wageningen University and Research]. <https://www.proquest.com/docview/2465452813/abstract/653D6F1462494A0FPQ/1>
- 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'agroeconomie*, 66(1), 43-54. <https://doi.org/10.1111/cjag.12161>
- Eto, J. H. (1985). *A comparison of weather normalization techniques for commercial building energy use* (Energy Efficient Buildings Program, Applied Science Division). Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
- Feustel, H. E. (1999). COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model. *Energy and Buildings*, 30(1), 3-18. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00043-7)
- Fortier, J.-M., & Sylvestre, C. (2021). *Le maraîchage nordique* (Les Éditions Cardinal).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.344>
- Gailloux, C., McClintock, N., Van Neste, S. L., Raymond, J., Barnabé, F., Beaulac, A., Bordeleau, G., Clavelier, H., Dos Santos Brito, J., Flory-Célini, C., Garcia Gonzalez, B., Haillet, D., Lavoie, S., Léveillé-Dallaire, X., Mamifarananahary, E., Maranghi, F., Monfet, D., Pasquier, L.-C., & Selliah, S. (2023). *CommunoSerre : Enjeux sociaux et techniques des serres communautaires urbaines dans les quartiers défavorisés—Une boîte à outils pour praticien.ne.s et décideur.se.s* (p. 49) [Rapport de recherche]. Institut national de la recherche scientifique.
- Ghosal, M. K., Tiwari, G. N., Srivastava, N. S. L., & Sodha, M. s. (2004). Thermal modelling and experimental validation of ground temperature distribution in greenhouse. *International Journal of Energy Research*, 28(1), 45-63. <https://doi.org/10.1002/er.950>

- Gobeil & Dion. (2015). *Évaluation du chauffage à l'électricité pour les serres*.
- Graamans, L., van den Dobbelsteen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.003>
- Guo, Y., Zhao, H., Zhang, S., Wang, Y., & Chow, D. (2021). Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124843>
- Guzmán-Cruz, R., Castañeda-Miranda, R., García-Escalante, J. J., López-Cruz, I. L., Lara-Herrera, A., & de la Rosa, J. I. (2009). Calibration of a greenhouse climate model using evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering*, 104(1), 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.006>
- Ha, T., Lee, I., Kwon, K., & 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), Article 6. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v8i6.2037>
- Hasni, A., Taibi, R., Draoui, B., & Boulard, T. (2011). Optimization of Greenhouse Climate Model Parameters Using Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms. *Energy Procedia*, 6, 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.043>
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes : Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Herrero, J. M., Blasco, X., Martínez, M., Ramos, C., & Sanchis, J. (2007). Non-linear robust identification of a greenhouse model using multi-objective evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering*, 98(3), 335-346. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.06.004>
- Herrero, J. M., Blasco, X., Martínez, M., Ramos, C., & Sanchis, J. (2008). Robust identification of non-linear greenhouse model using evolutionary algorithms. *Control Engineering Practice*, 16(5), 515-530. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2007.06.001>
- Heyat Jilani, Md. N., Yadav, S., Hachem-Vermette, C., Panda, S., Tiwari, G., & Nayak, S. (2023). Design and performance evaluation of a greenhouse integrated Thin-Film Photovoltaic system and an earth air heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 231, 120856. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120856>

- IBPSA. (2023). *About | IBPSA*. International Building Performance Simulation Association. <http://www.ibpsa.org/about/>
- IPMVP. (2002). *International performance measurement and verification protocol : Concepts and options for determining energy and water savings* (Volume 1).
- J. S. Zhang, K. A. Janni, & L. D. Jacobson. (1989). Modeling Natural Ventilation Induced by Combined Thermal Buoyancy and Wind. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 2165. <https://doi.org/10.13031/2013.31279>
- Jarvis, P. G., Monteith, J. L., & Weatherley, P. E. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 273(927), 593-610. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>
- Judkoff, R., Wortman, D., O'Doherty, B., & Burch, J. (2008). *Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations* (NREL/TP-550-42059, 928259; p. NREL/TP-550-42059, 928259). <https://doi.org/10.2172/928259>
- Katsoulas, N., & Stanghellini, C. (2019). Modelling Crop Transpiration in Greenhouses : Different Models for Different Applications. *Agronomy*, 9(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070392>
- Katzin, D., van Henten, E. J., & van Mourik, S. (2022). Process-based greenhouse climate models : Genealogy, current status, and future directions. *Agricultural Systems*, 198, 103388. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103388>
- Katzin, D., van Mourik, S., Kempkes, F., & van Henten, E. J. (2020). GreenLight – An open source model for greenhouses with supplemental lighting : Evaluation of heat requirements under LED and HPS lamps. *Biosystems Engineering*, 194, 61-81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.010>
- Klein, S. A., Beckamn, W. A., Mitchell, J. W., Duffie, J. A., Duffie, N. A., Mitchell, J. C., Braun, J. E., Evans, B. L., Kummer, J. P., Urban, R. E., Fiksel, A., Blair, N. J., Williams, P. M., Bradley, D. E., McDowell, T. P., Kummert, M., Arias, D. A., & Duffy, M. J. (2017). *TRNSYS 18 : A transient system simulation program* (USA: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin).
- Kuroyanagi, T. (2017). Investigating air leakage and wind pressure coefficients of single-span plastic greenhouses using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 163, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.004>
- Lalonde, T. (2022). *Développement d'un modèle calibré pour la simulation énergétique de serres et analyse des résultats à l'aide d'indicateurs de performance* [Mémoire, École de technologie supérieure]. <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2963/>

- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (1998). Leaf Energy Budgets : Effects of Radiation and Temperature. In H. Lambers, F. S. Chapin, & T. L. Pons, *Plant Physiological Ecology* (p. 210-229). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2855-2_4
- Lammari, K., Bounaama, F., Ouradj, B., & Draoui, B. (2020). Constrained GA PI sliding mode control of indoor climate coupled mimo greenhouse model. *Journal of Thermal Engineering*, 6(3), Article 3. <https://doi.org/10.18186/thermal.711554>
- Lavigueur, C. (2022). *Improving greenhouse modelling in building performance simulation tools* [Mémoire]. Polytechnique Montréal.
- Lebre, B., Silva, P. D., Pires, L. C., & Gaspar, P. D. (2021). Computational Modeling of the Thermal Behavior of a Greenhouse. *Applied Sciences*, 11(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/app112411816>
- Lee, S., Lee, I., Lee, S., Yeo, U., Kim, J., Kim, R., & Decano-Valentin, C. (2021). Dynamic Energy Exchange Modelling for a Plastic-Covered Multi-Span Greenhouse Utilizing a Thermal Effluent from Power Plant. *Agronomy*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081461>
- Li, H., Li, Y., Yue, X., Liu, X., Tian, S., & Li, T. (2020). Evaluation of airflow pattern and thermal behavior of the arched greenhouses with designed roof ventilation scenarios using CFD simulation. *PLOS ONE*, 15(9), e0239851. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239851>
- Liang, Z., He, G., Li, Y., Gao, Z., Ren, X., Wu, Q., Zhao, S., & Xu, J. (2023). Analysis of Wind Pressure Coefficients for Single-Span Arched Plastic Greenhouses Located in a Valley Region Using CFD. *Agronomy*, 13(2), 553. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020553>
- López, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., & Peña, A. (2016). Wind Tunnel Analysis of the Airflow through Insect-Proof Screens and Comparison of Their Effect When Installed in a Mediterranean Greenhouse. *Sensors*, 16(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/s16050690>
- López-Cruz, I. L., Fitz-Rodríguez, E., Graduate Agricultural Engineering Program, University of Chapingo, Chapingo, Mexico, Salazar-Moreno, R., Graduate Agricultural Engineering Program, University of Chapingo, Chapingo, Mexico, Rojano-Aguilar, A., Graduate Agricultural Engineering Program, University of Chapingo, Chapingo, Mexico, Kacira, M., & Agricultural and Biosystems Engineering Dept., University of Arizona, Tucson, USA. (2018). Development and analysis of dynamical mathematical models of greenhouse climate : A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 269-279. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.1>

- Mai, J. (2023). Ten strategies towards successful calibration of environmental models. *Journal of Hydrology*, 620, 129414. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129414>
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained : Theory, design and application* (2nd ed). Wiley.
- MAPAQ. (2018). *Portrait-diagnostic sectoriel des légumes de serre au Québec*. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portaitdiagnosticdeslegumesdeserre_final.pdf
- MAPAQ. (2021). *Le Bioalimentaire économique—Bilan de l'année 2021*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Maraveas, C. (2020). Wind Pressure Coefficients on Greenhouse Structures. *Agriculture*, 10(5), 149. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050149>
- McCree, K. J. (1971). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191-216. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)
- McDowell, T. P., Letellier-Duchesne, S., & Kummert, M. (2018). *A new method for determining sub-hourly solar radiation from hourly data*.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). (2020). *Croissance des serres au Québec*. Gouvernement du Québec. <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/croissance-serres>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2022). *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétique*. Secteur de l'innovation et de la transition énergétiques.
- Mira, M., Valor, E., Boluda, R., Caselles, V., & 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*, 112(F4), F04003. <https://doi.org/10.1029/2007JF000749>
- Mitalas, G. P. (1973). Transfer function method of calculating cooling loads, heat extraction and space temperature. *ASHRAE Journal*.
- Mitchell, R., Kohler, C., Curcija, D., Zhu, L., Vidanovic, S., Czarnecki, S., Arasteh, D., Carmodi, J., & Huizenga, C. (2019). *WINDOW 7.7* [Logiciel]. Lawrence Berkeley National Laboratory.

- Mohammadi, S., Sayyah, A. H. A., Nikbakht, A. M., & Khalife, E. (2020). Modeling and design a special type of passive solar greenhouse in cold climate by TRNSYS. *Journal of Agricultural Sciences*, 26(4), 488-498. Scopus. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.502073>
- Monteith, J. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, p.205-234.
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (Éds.). (2013). Principles of Environmental Physics. In *Principles of Environmental Physics (Fourth Edition)* (p. i). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386910-4.00018-4>
- Morris, L. L. (1982). Chilling Injury of Horticultural Crops : An Overview. *HortScience*, 17(2), 161-162. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.17.2.161>
- NASA Global Climate Change. (2023). *Carbon Dioxide Concentration*. Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide>
- Nawalany, G., Bieda, W., Radoń, J., & Herbut, P. (2014). Experimental study on development of thermal conditions in ground beneath a greenhouse. *Energy and Buildings*, 69, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.020>
- Nawalany, G., & Sokołowski, P. (2021). Numerical Analysis of the Effect of Ground Dampness on Heat Transfer between Greenhouse and Ground. *Sustainability*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/su13063084>
- NGMA. (2010). *Heat loss standards*.
- Nijskens, J., Deltour, J., Albrecht, E., Gratraud, J., & Feuilleley, P. (1990). Comparative studies on the ageing of polyethylene film in the laboratory and in practical use. *Plasticulture*, No. 87, 11-20.
- Ogunlowo, Q. O., Na, W. H., Rabiou, A., Adesanya, M. A., Akpenpuun, T. D., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2022). Effect of envelope characteristics on the accuracy of discretized greenhouse model in TRNSYS. *Journal of Agricultural Engineering*. <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1420>
- Ohlsson, K. E. A., & Olofsson, T. (2021). Benchmarking the practice of validation and uncertainty analysis of building energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110842. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110842>
- Ouazzani Chahidi, L., Fossa, M., Priarone, A., & Mechaqrane, A. (2021). Energy saving strategies in sustainable greenhouse cultivation in the mediterranean climate – A case study. *Applied Energy*, 282, 116156. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116156>

- Pelletier, F., & Godbout, S. (2017). *Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre en production serricole au Québec*.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- 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. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- Pérez-González, A., Begovich-Mendoza, O., & Ruiz-León, J. (2018). Modeling of a greenhouse prototype using PSO and differential evolution algorithms based on a real-time LabView™ application. *Applied Soft Computing*, 62, 86-100. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.023>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.008>
- Piscia, D., Muñoz, P., Panadès, C., & Montero, J. I. (2015). A method of coupling CFD and energy balance simulations to study humidity control in unheated greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.005>
- Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models : An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, 43(9), 2356-2364. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.020>
- Rasheed, A., Kwak, C. S., Na, W. H., Lee, J. W., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2020). Development of a Building Energy Simulation Model for Control of Multi-Span Greenhouse Microclimate. *Agronomy*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091236>
- Rasheed, A., Lee, J. W., & Lee, H. W. (2018). Development and Optimization of a Building Energy Simulation Model to Study the Effect of Greenhouse Design Parameters. *Energies*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/en11082001>
- Rasheed, A., Na, W. H., Lee, J. W., Kim, H. T., & Lee, H. W. (2019). Optimization of Greenhouse Thermal Screens for Maximized Energy Conservation. *Energies*, 12(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/en12193592>
- Reddy, T. A. (2006). *Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs : Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools*. 15.

- Reis, M., & Ribeiro, A. (2020). *Conversion factors and general equations applied in agricultural and forest meteorology*. 27, 227-258. <https://doi.org/10.31062/agrom.v27i2.26527>
- Righini, I., Vanthoor, B., Verheul, M. J., Naseer, M., Maessen, H., Persson, T., & Stanghellini, C. (2020). A greenhouse climate-yield model focussing on additional light, heat harvesting and its validation. *Biosystems Engineering*, 194, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.009>
- Roy, J. C., Boulard, T., Kittas, C., & Wang, S. (2002). PA—Precision Agriculture : Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 1: the Greenhouse considered as a Perfectly Stirred Tank. *Biosystems Engineering*, 83(1), 1-20. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0107>
- Runkle, E., & Both, A. J. (2011). *Greenhouse energy conservation strategies*. <https://doi.org/10.7282/T3K64KWN>
- Sahdev, R. K., Kumar, M., & Dhingra, A. K. (2019). A comprehensive review of greenhouse shapes and its applications. *Frontiers in Energy*, 13(3), 427-438. <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0464-8>
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181(2), 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>
- Sanford, S. (2011). *Reducing greenhouse energy consumption—An overview*.
- Sansregret, S., & Lavigne, K. (2015). *Lessons Learned from the Calibration of 5 Building Models with Total Electric Demand Measurement on 15-Minutes Intervals*. 14, 2889-2896. <https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2465>
- Semple, L., Carriveau, R., & Ting, D. S.-K. (2017). Assessing heating and cooling demands of closed greenhouse systems in a cold climate. *International Journal of Energy Research*, 41(13), 1903-1913. <https://doi.org/10.1002/er.3752>
- Sherman, M., & Grimsrud, D. (1980). *Infiltration-pressurization correlation: Simplified physical modeling* (Lawrence Berkeley Laboratory). https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/779747
- SIMEB. (2023). *Fichier météo pour le Québec*. Données météo.
- Sobol', I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1), 271-280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)

- Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. (2017). *TRNSYS 18 Documentation, Volume 5, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild*. University of Wisconsin-Madison.
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops : An aid to climate management* [PhD Thesis]. IMAG.
- Talbot, M.-H., Lalonde, T., Beaulac, A., Haillet, D., & Monfet, D. (2022). *Comparing the energy performance of different controlled environment agriculture spaces using TRNSYS. 12*, 0-0. https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=esim2022_208
- 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. <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1806594>
- Tei, F., Scaife, A., & Aikman, D. P. (1996). Growth of Lettuce, Onion, and Red Beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. *Annals of Botany*, 78(5), 633-643. JSTOR.
- Thevenard, D., & Haddad, K. (2006). Ground reflectivity in the context of building energy simulation. *Energy and Buildings*, 38(8), 972-980. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.007>
- Tian, W. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>
- TRNSYS 18. (2017a). *Volume 4, Mathematical reference*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, WI.
- TRNSYS 18. (2017b). *Volume 5, Multizone Building modelling with Type 56 and TRNBuild*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, WI.
- Vadiee, A., & Martin, V. (2013). Energy analysis and thermoeconomic assessment of the closed greenhouse – The largest commercial solar building. *Applied Energy*, 102, 1256-1266. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.051>
- Valera. (2008). *Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos*. Eficiencia y ahorro energético.
- Van Beveren, P. J. M., Bontsema, J., Van Straten, G., & Van Henten, E. J. (2015). Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Applied Energy*, 137, 97-109. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.083>

- Van Henten, E. J. (2003). Sensitivity Analysis of an Optimal Control Problem in Greenhouse Climate Management. *Biosystems Engineering*, 85(3), 355-364. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00068-0](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00068-0)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>
- Ward, R., Choudhary, R., Cundy, C., Johnson, G., & McRobie, A. (2015). *Simulation of plants in buildings; incorporating plant-air interactions in buildign energy simulation. 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 8.
- Webster, L., Bradford, J., Sartor, D., Shonder, J., Atkin, E., Dunnivant, S., Frank, D., Franconi, E., Jump, D., & Schiller, S. (2015). *M&V guidelines : Measurement and verification for performance-based contracts* (Version 4.0). U.S. Department of Energy Federal Energy Management Program.
- Wei, A., Nourozi, B., & Chen, Y. (2021). Incorporating Plants Modelling in Greenhouse Design. *IBPSA Canada*.
- Xiao, J., Wang, Q., Wang, X., Hu, Y., Cao, Y., & Li, J. (2023). An earth-air heat exchanger integrated with a greenhouse in cold-winter and hot-summer regions of northern China : Modeling and experimental analysis. *Applied Thermal Engineering*, 232, 120939. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120939>
- Yang, H., Liu, Q.-F., & Yang, H.-Q. (2019). Deterministic and stochastic modelling of greenhouse microclimate. *Systems Science & Control Engineering*, 7(3), 65-72. <https://doi.org/10.1080/21642583.2019.1661310>
- Yeo, U.-H., Lee, S.-Y., Park, S.-J., Kim, J.-G., Choi, Y.-B., Kim, R.-W., Shin, J. H., & Lee, I.-B. (2022). Rooftop Greenhouse : (1) Design and Validation of a BES Model for a Plastic-Covered Greenhouse Considering the Tomato Crop Model and Natural Ventilation Characteristics. *Agriculture*, 12(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070903>
- Yildiz, I. (2021). *Greenhouse Engineering : Integrated Energy Management*. CRC Press.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117281>
- Zhou, X., Liu, Q., Katzin, D., Qian, T., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2023). Boosting the prediction accuracy of a process-based greenhouse climate-tomato production model by particle filtering and deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, 107980. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107980>