

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES
SERRES DANS LE CONTEXTE DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
AICHA HAYAOUI

AVRIL 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

Direction de recherche :

Pr. Kodjo AGBOSSOU Directeur de recherche

Dr. Nilson HENAO Codirecteur de recherche

Jury d'évaluation :

Pr. Alben CARDENAS Évaluateur interne

Pr. Didier HAILLOT Évaluateur externe

Dr. Nilson HENAO Codirecteur de recherche

Résumé

La croissance rapide de la population mondiale et la demande de plus en plus élevée en aliments frais et sains justifient le rôle crucial de l'industrie des serres. Spécifiquement, dans les climats nordiques, les serres sont identifiées comme des installations à haute consommation d'énergie et de production hors saison. Avec une consommation d'énergie représentant jusqu'à 50 % des coûts de production, le développement des serres est considérablement freiné. Dans ce contexte, ce mémoire présente une stratégie de gestion de l'énergie visant à optimiser la consommation d'énergie de la serre en fonction d'un signal de prix de l'électricité. De plus, cette approche planifie stratégiquement la consommation énergétique d'une serre sur 24 heures tout en garantissant des conditions optimales de croissance des plantes. Un problème d'optimisation est formulé en tenant compte du confort climatique de la serre, du signal de prix, et du modèle de la serre, incluant les conditions météorologiques. L'approche proposée est appliquée à une étude de cas de serre au Québec, Canada. Pour optimiser la consommation énergétique de cette serre, une modélisation thermique basée sur des données synthétiques est effectuée avec des données météorologiques réelles du Québec. Les résultats démontrent clairement la capacité du système à optimiser la consommation des ressources énergétiques, en tenant compte du prix variable de l'électricité et des besoins spécifiques de la serre. Cela souligne le potentiel de la gestion de l'énergie par rapport au signal de prix en fonction du temps d'utilisation (TOU) dans les serres nordiques.

Avant-propos

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de mémoire Kodjo Agbossou qui m'a guidée tout au long de ce projet de recherche et qui m'a apporté un soutien par ses précieux conseils, son écoute, son suivi et son intérêt pour mes travaux. J'aimerais remercier aussi mon codirecteur de recherche Nilson Henao, pour l'appui technique et sa participation dans l'élaboration du projet de recherche. J'adresse aussi mes plus sincères remerciements à Shaival Nagarsheth qui m'a appuyée dans le développement et dans l'organisation des idées tout au long de ce travail.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide de différents instituts et organismes qui, au travers de leur soutien financier, ont reconnu mon travail : le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), l'Institut de Recherche sur l'Hydrogène (IRH) et la Fondation de l'UQTR.

Je voudrais aussi remercier mes collègues du laboratoire d'innovation et de recherche en énergie intelligente, particulièrement Khansa Dab qui m'a guidée depuis le début de mes études aux cycles supérieurs, mais aussi Simon Pierre Betoka et Moussa Ibrahim Moumouni qui m'ont apporté de l'aide ou simplement des bonnes conversations durant ce parcours.

À ces personnes qui étaient directement impliquées dans mon cheminement académique, s'ajoutent aussi mes proches : mes parents, mon frère, mes sœurs et mes amis surtout Ahmed Dhahri qui m'a soutenue pendant les périodes glorieuses et les périodes creuses.

Table des matières

| | |
|---|------|
| Résumé | iii |
| Avant-propos | iv |
| Table des matières | v |
| Liste des tableaux | viii |
| Liste des figures | ix |
| Liste des symboles | x |
| Liste des acronymes | xiv |
| Chapitre 1 – Introduction. | 1 |
| 1.1 Contexte et problématique | 1 |
| 1.2 Problématique spécifique. | 3 |
| 1.3 Objectifs de recherche | 4 |
| 1.4 Méthodologie de recherche. | 5 |
| 1.5 Structure du mémoire | 6 |
| Chapitre 2 – État de l’art | 7 |
| 2.1 Introduction | 7 |
| 2.2 Culture sous serre (serriculture) | 7 |

| | | |
|-------------------------------------|---|----|
| 2.3 | Facteurs environnementaux au sein de la serre | 9 |
| 2.3.1 | Température | 9 |
| 2.3.2 | Humidité relative | 11 |
| 2.3.3 | Concentration en CO_2 | 12 |
| 2.4 | Modélisation énergétique des serres | 13 |
| 2.4.1 | Bilan énergétique d'une serre | 13 |
| 2.4.2 | Outils de simulation | 20 |
| 2.4.3 | Types de modèles énergétiques de la serre | 24 |
| 2.5 | Algorithme de contrôle. | 28 |
| 2.5.1 | Algorithmes de contrôle classiques. | 29 |
| 2.5.2 | Algorithmes de contrôle avancés. | 29 |
| 2.5.3 | Algorithmes de contrôle intelligents et flou. | 32 |
| 2.5.4 | Contrôle hybride. | 34 |
| 2.6 | Indicateurs de performance. | 35 |
| 2.7 | Conclusion. | 36 |
| Chapitre 3 – Méthodologie | | 37 |
| 3.1 | Introduction | 37 |
| 3.2 | Aperçu général de la méthodologie proposée | 37 |
| 3.3 | Base de données et outil de simulation | 38 |
| 3.3.1 | Données météorologiques | 38 |
| 3.3.2 | Outil de simulation | 40 |

| | | |
|-------------------------------------|---|----|
| 3.4 | Modélisation de la Serre | 51 |
| 3.4.1 | Dynamique du climat de la serre | 51 |
| 3.4.2 | Calibration du modèle : Méthode de régression Ridge | 52 |
| 3.5 | Optimisation. | 52 |
| 3.5.1 | Formulation du problème d'optimisation | 53 |
| 3.5.2 | Contraintes du système | 55 |
| 3.6 | Conclusion. | 56 |
| Chapitre 4 – Étude de cas | | 57 |
| 4.1 | Introduction | 57 |
| 4.2 | Description de la serre étudiée et la méthode de validation | 58 |
| 4.3 | Résultats. | 59 |
| 4.3.1 | Modélisation. | 60 |
| 4.3.2 | Optimisation. | 62 |
| 4.4 | Conclusion. | 65 |
| Chapitre 5 – Conclusion | | 66 |
| 5.1 | Contributions principales. | 67 |
| 5.2 | Limites | 68 |
| 5.3 | Perspectives | 68 |
| Références. | | 70 |

Liste des tableaux

| | | |
|-------------|---|----|
| Tableau 2-1 | Intervalle de températures pour différentes plantes en serre [22] | 10 |
| Tableau 2-2 | Intervalle d'humidité relative selon le type de plante [22] | 11 |
| Tableau 2-3 | Effet du taux de CO_2 sur la productivité des plantes de serre[22] | 12 |
| Tableau 3-1 | Paramètres de la fonction linéaire pour différentes caractéristiques de croissance des plantes en fonction du DLI. | 46 |
| Tableau 4-1 | Spécifications de la serre | 59 |
| Tableau 4-2 | Les métriques utilisées pour les données d'entraînement et de test. | 62 |

Liste des figures

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 1.1 | Méthodologie de recherche adoptée | 5 |
| Figure 2.1 | Structure du système de contrôle du microclimat de la serre. | 8 |
| Figure 3.1 | Vue d'ensemble de la méthodologie proposée. | 38 |
| Figure 3.2 | Paramètres du microclimat à l'intérieur et l'extérieur de la serre citée a Trois-Rivières pour 6 jours en janvier. | 40 |
| Figure 3.3 | Énergies consommées au sien de la serre citée a Trois-Rivières pour 6 jours en janvier. | 41 |
| Figure 3.4 | Matrice de corrélation entre les variables internes et les systèmes de contrôle. | 42 |
| Figure 3.5 | Caractéristiques spécifiques de la plantes de tomates | 47 |
| Figure 4.1 | Température intérieure de la serre pour l'entraînement et test | 60 |
| Figure 4.2 | Humidité intérieure de la serre pour l'entraînement et test | 61 |
| Figure 4.3 | Concentration de CO_2 intérieure de la serre pour l'entraînement et test . | 61 |
| Figure 4.4 | Profil énergétique agrégé de la serre pour une journée, basé sur un signal de prix avec un point de consigne unique et une plage souhaitée | 63 |
| Figure 4.5 | (a) Profil de température, d'humidité et de concentration de CO_2 avec une seule valeur de α .(b) Profil de température, d'humidité et de concen- tration de CO_2 avec différents niveaux de confort α_i | 65 |

Liste des symboles

| | |
|-----------------|--|
| α_{lamp} | Coefficient d'efficacité lumineuse |
| α_{sun} | Coefficient de transmission du matériau de couverture |
| Δ | Pente de la relation entre la pression de vapeur saturante et la température en (kPa K ⁻¹) |
| γ | Constante psychrométrique en (kPa K ⁻¹) |
| ρ | Densité de l'air en (kg m ⁻³) |
| a | Constante spécifique de la plante |
| b | Constante spécifique de la plante |
| c | Capacité thermique volumétrique de l'air en (J m ⁻³ °C ⁻¹) |
| C_1 | Concentration de CO ₂ à l'intérieur de la serre (kg [CO ₂] m ⁻³) |
| C_2 | Concentration de CO ₂ à l'extérieur de la serre (kg [CO ₂] m ⁻³) |
| C_p | Chaleur spécifique de l'air en (J kg ⁻¹ K ⁻¹) |
| c_{air} | Capacité thermique spécifique de la serre |
| C_{ass} | Assimilation de CO ₂ en (ppm) |
| C_{in} | Concentration de CO ₂ à l'intérieur de la serre en (ppm) |

| | |
|--------------|--|
| C_{out} | Concentration de CO_2 à l'extérieur de la serre en (ppm) |
| C_{vent} | Taux de perte de CO_2 vers l'extérieur ($kg [CO_2] m^{-2}s^{-1}$) |
| D_i | Déficit de pression de vapeur de l'air en (kPa) |
| e | Rapport du contenu de chaleur latente au contenu de chaleur sensible de l'air saturé |
| g | Coefficient d'échange en ($kg m^{-3}$) |
| g_a | Conductance aérodynamique en ($m s^{-1}$) |
| g_c | Conductance stomatique en ($m s^{-1}$) |
| g_e | Conductance de transpiration |
| h | Coefficient d'échange thermique en ($W °C^{-1}m^{-2}$) |
| H_{in} | Humidité intérieure de la serre en % |
| H_{out} | Humidité extérieure de la serre en % |
| H_{plante} | Humidité au niveau de la plante % |
| I_{lamp} | Puissance du rayonnement fournie par les lampes en (W/m^2) |
| I_{sun} | Puissance du rayonnement solaire en (W/m^2) |
| L | Chaleur latente d'évaporation de l'eau en ($J.kg^{-1}$) |
| Q_{conv} | Énergie par convection et conduction en ($W m^{-2}$) |
| Q_{Latent} | Pertes d'énergie en chaleur latente en ($W m^{-2}$) |

$Q_{\text{Trans,leaf}}$ chaleur latente d'évaporation d'une feuille en (W m^{-2} [feuille])

Q_{trans} Énergie par transpiration, en (W m^{-2})

Q_{vent} Énergie perdue par la ventilation en (W/m^2)

Q_{Lamp} Énergie fournie par les lampes en (W/m^2)

Q_{sun} Énergie solaire en (W/m^2)

r_b Résistance de la couche limite

R_n Rayonnement net intercepté par la plante en (W m^{-2} [feuille])

r_s Résistance stomatique

T_{ext} Température extérieure de la serre °C

T_{in} Température intérieure de la serre °C

u_{heat} Énergie consommée par le système de chauffage dans la serre en (Wh)

u_{dehum} Énergie consommée par le système de désumudificateur dans la serre en (Wh)

u_{ligh} Énergie consommée par le système de d'éclairage supplémentaire dans la serre en (Wh)

u_{vent} Énergie consommée par le système de ventilation dans la serre en (Wh)

v Taux de renouvellement de l'air en ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

V_1 Concentration de vapeur d'eau à l'intérieur de la serre (kg [eau] m^{-3})

V_2 Concentration de vapeur d'eau à l'extérieur de la serre (kg [eau] m^{-3})

V_{Air} Concentration de vapeur de l'air en (kg m^{-3})

V_{surface} concentration de vapeur saturante à la température de la surface en (kg m^{-3})

W_{cond} Vapeur condensée en eau sur les surfaces froides en ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

W_{Evap} Quantité d'eau évaporée du sol en ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

W_{Latent} Quantité nette d'eau transformée en vapeur dans la serre en ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

W_{Tran} Quantité d'eau transpirée par la plante en ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

W_{vent} Taux de perte de vapeur d'eau vers l'extérieur ($\text{kg [eau] m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

Liste des acronymes

- AEC** Agriculture en environnement contrôlé. 5
- ANFIS** Systèmes d'interférence neuro-flou adaptatifs. 31
- CVAC** Systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation. 21–23, 40, 41
- DEL** Diodes électroluminescentes. 15
- DLI** Intégrale d'éclairage journalier. 45
- DPV** Déficit de pression de vapeur. 18
- EA** Algorithme Évolutif. 29
- FIR** Rayonnement thermique. 15
- HPS** Lampes à vapeur de sodium à haute pression. 15
- LAI** Indice de surface foliaire. 18
- MAPE** Erreur moyenne absolue en pourcentage. 35
- MIMO** Configuration à multiples entrées et sorties. 28
- MPC** Contrôle prédictif de modèle. 30
- NIR** Rayonnement proche infrarouge. 14, 15
- NMBE** Erreur de biais moyenne. 35
- PAR** Rayonnement photosynthétique actif. 14, 15

PID Proportionnel-Intégral-Dérivé. 28, 29

RMSE Erreur quadratique moyenne. 35

R² Coefficient de détermination. 35

TOU Temps d'utilisation. iii

UV Rayonnement ultraviolet. 14

Chapitre 1 – Introduction

1.1 Contexte et problématique

L'autosuffisance alimentaire est devenue une préoccupation majeure dans le monde entier en raison de l'augmentation de la population et du changement climatique qui affecte la productivité des terres. Pendant la pandémie de COVID-19, l'intention de renforcer l'autosuffisance alimentaire de la province a été annoncée par le gouvernement du Québec [1]. Selon les estimations de l'ONU en 2019, la population mondiale pourrait atteindre près de 9,7 milliards d'habitants d'ici 2050. Aussi, la situation alimentaire mondiale est telle que plus de 10 % de la population est affectée par la famine, et plus de 33 % n'a pas accès à un régime alimentaire régulier et adéquat [2]. Relever ces défis nécessite une approche globale qui prend en compte des facteurs tels que les méthodes de production durables, les systèmes alimentaires locaux et les politiques efficaces visant à atténuer l'insécurité alimentaire et à mettre en place des systèmes alimentaires résilients pour l'avenir [3].

Parmi tous les types d'agriculture, la production en champ représente environ 90 % de l'ensemble de la production agricole au Québec [4]. Cependant, ce mode de production présente plusieurs inconvénients : la vulnérabilité des rendements due aux conditions météorologiques défavorables, l'impossibilité de régler finement les paramètres environnementaux, la production saisonnière, l'exposition des plantes aux parasites et aux maladies. Face à ces défis, les serres agricoles représentent une solution potentielle. En particulier, dans les climats nordiques, la demande importante de chauffage dans le secteur des serres commerciales, ainsi que le potentiel de croissance des serres pour permettre la production de cultures hors sai-

son dans ce climat, rendent la serre particulièrement intéressante [5]. Il existe environ 3,64 millions d'hectares de serres dans le monde [6]. En effet, grâce à l'utilisation de serres, une augmentation substantielle du rendement agricole peut être obtenue par un contrôle rigoureux du climat et une protection des cultures contre les conditions météorologiques défavorables. Au sein de ces structures, une contribution significative est apportée à la promotion de la production locale, facilitant ainsi une réduction marquée des importations. Cela garantit également que la production peut être maintenue hors saison, assurant une disponibilité continue des produits tout au long de l'année [7]. Une gestion plus efficace des ressources est encouragée, marquée par une réduction de la consommation d'eau et une moindre utilisation de pesticides, conduisant à une diminution des coûts de production. En analysant tous ces avantages, il est démontré que la culture en serre peut être placée au cœur des stratégies visant à réduire le coût des produits agricoles [8].

Cependant, la culture en serre est une technologie énergivore, car elle nécessite souvent le chauffage, la climatisation et l'éclairage artificiel [9]. Par exemple, dans trois serres de grandes tailles au Québec, la consommation totale annuelle par mètre carré se répartit comme suit : électricité (820.33 kWh/m²), mazout (81 L/m²), gaz naturel (77.67 m³/m²), gaz propane (115.67 L/m²), et granulé de bois (147.33 kg/m²) [10]. En particulier, le processus de contrôle climatique au sein des serres nécessite une quantité substantielle d'énergie pour maintenir les conditions climatiques requises [11]. Diverses sources d'énergie utilisées à cette fin sont l'électricité, le charbon, le fioul, le gaz naturel, l'énergie éolien, l'énergie solaire, entre autres. Le charbon et le fioul sont souvent utilisés comme sources d'énergie de secours pour alimenter les serres pendant les pannes de courant. Cette consommation d'énergie accrue exerce un double impact en augmentant à la fois les coûts opérationnels de la production en serre et les émissions de gaz à effet de serre [12], [13]. Par exemple, aux États-Unis, la consommation d'énergie des serres constitue 16 % de la consommation énergétique globale dans le secteur

agricole [14]. Selon certains scénarios, les dépenses énergétiques peuvent représenter jusqu'à 50 % du coût total de production au sein des installations de serres [15]. La gestion du microclimat au sein des serres et l'optimisation de la consommation d'énergie peuvent contribuer à la réduction de cette demande énergétique [16]. Toutefois le microclimat de la serre est un système dynamique complexe, comprenant des paramètres critiques tels que la température, l'humidité relative, la concentration de CO_2 et l'intensité lumineuse. Ces paramètres, lorsqu'ils sont soigneusement contrôlés, conduisent à des conditions optimales pour la croissance et le développement des plantes de serre [17].

1.2 Problématique spécifique

La gestion énergétique des serres agricoles représente un défi majeur en raison de la nécessité de maintenir des conditions climatiques optimales pour la croissance des plantes tout en minimisant les coûts opérationnels et les impacts environnementaux. Les serres, particulièrement dans les climats nordiques, nécessitent des quantités substantielles d'énergie pour le chauffage, la ventilation, l'éclairage et la déshumidification. Cette forte demande énergétique se traduit par des coûts élevés et des émissions significatives de gaz à effet de serre, ce qui pose un problème de durabilité et de viabilité économique pour les exploitations agricoles.

En outre, l'optimisation de la gestion énergétique des serres doit intégrer des variables dynamiques et complexes telles que les conditions météorologiques, les prix de l'énergie et les besoins spécifiques des plantes. Actuellement, les stratégies de gestion énergétique utilisées dans les serres ne parviennent pas toujours à équilibrer efficacement ces variables, conduisant souvent à une surconsommation d'énergie et à des coûts opérationnels excessifs.

Par conséquent, il est essentiel de développer des approches innovantes pour modéliser et optimiser la consommation énergétique des serres. Cela implique la création de modèles thermo-énergétiques précis et la formulation de stratégies de gestion énergétique qui

tiennent compte des signaux de prix de l'énergie et des prévisions météorologiques. Une telle optimisation permettra non seulement de réduire les coûts opérationnels, mais aussi de minimiser l'empreinte carbone des serres, contribuant ainsi à des pratiques agricoles plus durables.

Ce mémoire vise à répondre à cette problématique en formulant un problème d'optimisation intégrant le modèle thermique de la serre, l'énergie utilisée, les signaux de prix et les données météorologiques. Cette approche permettra d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les coûts opérationnels, tout en assurant des conditions climatiques optimales pour la croissance des plantes. En particulier, cette étude se concentre sur l'optimisation de l'utilisation des systèmes de chauffage, de ventilation, d'éclairage et de déshumidification, en fonction des signaux de prix et des prévisions météorologiques, afin de proposer une stratégie de gestion énergétique efficace pour les serres agricoles situées au Québec, Canada.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce mémoire est de formuler un problème d'optimisation intégrant le modèle thermique de la serre, l'énergie utilisée, les signaux de prix et les données météorologiques afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les coûts opérationnels. Cette étude est basée sur des données météorologiques synthétiques d'une serre située au Québec, Canada. Pour atteindre cet objectif global, plusieurs objectifs spécifiques ont été définis :

- Établir un mécanisme pour la construction et la calibration d'un modèle thermo-énergétique de la serre basée sur une approche de données.
- Proposer une stratégie de gestion énergétique pour les serres, axée sur l'optimisation de l'utilisation des systèmes de chauffage, de ventilation, d'éclairage et de déshumidification en fonction des signaux de prix.
- Analyser la flexibilité des opérations des serres, notamment en termes de réponse dy-

namique, tout en tenant compte des besoins climatiques des plantes.

1.4 Méthodologie de recherche

Les différentes étapes de ce mémoire sont résumées sur la Figure 1.1.

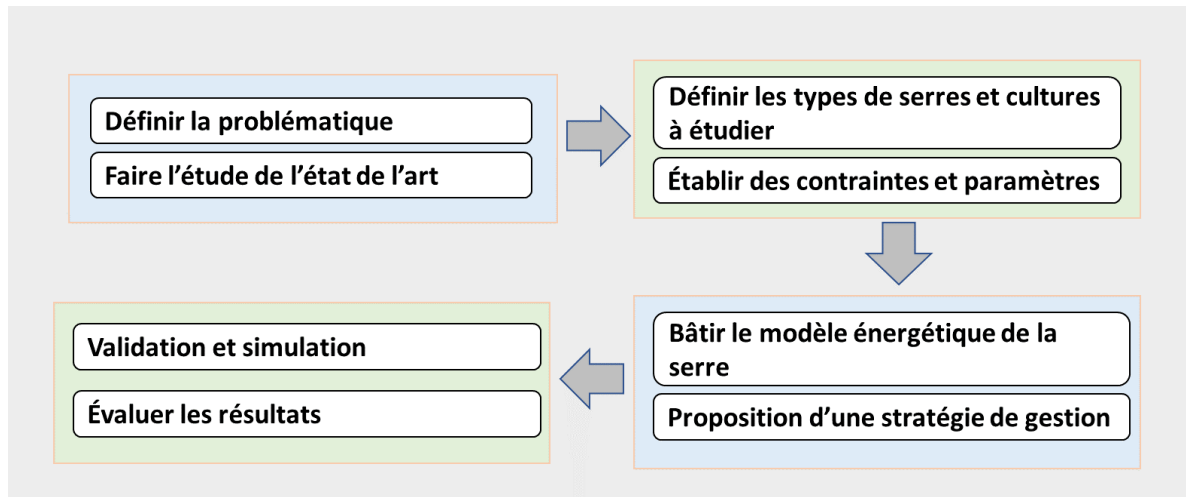


FIGURE 1.1 Méthodologie de recherche adoptée

Quatre activités principales sont proposées dans le déroulement méthodologique de ce projet de recherche. La première concerne une analyse de l'état de l'art sur les différents modèles thermo-énergétiques des serres, les stratégies de contrôle de la consommation énergétique ainsi que les notions reliées au domaine de l'agriculture en environnement contrôlé (AEC). Les résultats escomptés pendant cette phase sont : (i) un inventaire de modèles énergétiques et outils d'analyse utilisés dans les serres (ii) un bilan sur les défis et problèmes concernant la gestion énergétique des serres en considérant les particularités du climat et sources d'énergie propres au contexte québécois ; (iii) une liste de considérations (configurations, paramètres, conditions, etc.) liées aux plantes les plus importantes pour l'AEC.

La deuxième activité concerne la modélisation énergétique des serres et l'identification des techniques d'apprentissage automatique qui peuvent être appliquées à ce problème. Il s'agit d'automatiser les processus de construction de modèles, de sélection de variables, de

régression de paramètres et de validation en réduisant les besoins d'intervention humaine. Ces modèles énergétiques adopteront une approche de type « boîte grise » et seront entraînés à partir de l'historique de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du processus.

La troisième activité consiste à formuler une stratégie de gestion énergétique et de contrôle dans le cadre d'un problème d'optimisation considérant deux objectifs principaux : (i) garder les performances en termes du contrôle de variables environnementales (ii) minimiser le coût énergétique global de la serre [14]. Dans le premier objectif, les mécanismes de contrôle cherchent à garder les variables contrôlables (température, humidité, concentration de CO_2 , etc.) dans un état approprié pour le développement de la plante. Il est donc nécessaire d'établir des fonctions permettant de pénaliser les déviations des états désirés. Le deuxième objectif a une signification beaucoup plus économique, en cherchant à réduire la consommation énergétique ce qui implique une minimisation du coût énergétique de la serre. Ce terme dépend des différentes structures tarifaires et d'autres types d'incitatifs dans le processus décisionnel.

La quatrième activité consiste à simuler les différentes méthodes proposées et évaluer les résultats obtenus.

1.5 Structure du mémoire

Le corps du présent document est composé de cinq chapitres. Le deuxième chapitre présente la revue de la littérature disponible sur les sujets connexes à ces objectifs et présente une liste des modèles de serres existants dans la littérature, ainsi que les différentes stratégies d'optimisation de la consommation énergétique dans une serre. Le troisième chapitre décrit la méthodologie proposée pour le développement et la construction de modèles de serres et l'optimisation de sa consommation énergétique. Le quatrième chapitre est une étude de cas d'une serre dans le contexte du Québec. Enfin, le cinquième chapitre contient la conclusion et les perspectives des travaux futurs.

Chapitre 2 – État de l’art

2.1 Introduction

Ce chapitre examine en profondeur les concepts fondamentaux et les éléments pertinents issus de la littérature qui doivent être pris en compte lors de la construction et l’optimisation du modèle énergétique d’une serre agricole. Il explique les différentes approches permettant de classer les serres et les facteurs les plus importants qui affectent leur consommation d’énergie.

2.2 Culture sous serre (serriculture)

Les serres représentent des structures flexibles constituées d’une armature solide recouverte d’un matériau transparent ou semi-transparent. Ces installations tirent parti de l’effet de serre, où ce revêtement permet aux rayons du soleil de pénétrer tout en capturant la chaleur produite à l’intérieur. Les surfaces présentes au sein de la serre, notamment le sol, absorbent la radiation solaire, ce qui entraîne leur réchauffement, contribuant ainsi à chauffer l’air par convection. Cependant, une partie de cette chaleur est réémise sous forme de rayonnement à grande longueur d’onde. Généralement, le matériau utilisé pour le revêtement est spécifiquement choisi pour sa faible transmissivité à ce type de rayonnement, favorisant ainsi l’accumulation de la chaleur à l’intérieur de la serre [18].

L’environnement des serres est un système dynamique complexe qui a évolué significativement au fil des ans grâce à l’avancement de la technologie et à une meilleure compréhension des processus écologiques. Au cours des dernières décennies, une connaissance

approfondie de la dynamique du climat sous serre a été développée, ce qui a permis de perfectionner les méthodes de culture. La Figure 2.1 illustre de manière concise ce système sophistiqué. Elle met en lumière l'intégration des données climatiques extérieures qui, conjuguée à la gestion de l'énergie provenant du réseau électrique, permet de créer un microclimat idéal à l'intérieur de la serre. Bien que les serres puissent également être alimentées par des sources d'énergie alternatives telles que la biomasse ou le biogaz, cette étude se focalise sur l'utilisation de l'électricité du réseau. Ce système contrôlé est finement ajusté pour répondre aux besoins spécifiques des plantes à différentes étapes de leur développement. Grâce à un système de contrôle automatisé qui régule le chauffage, la ventilation et l'éclairage, les plantes peuvent s'épanouir dans des conditions quasi parfaites, maximisant ainsi le rendement de la production.

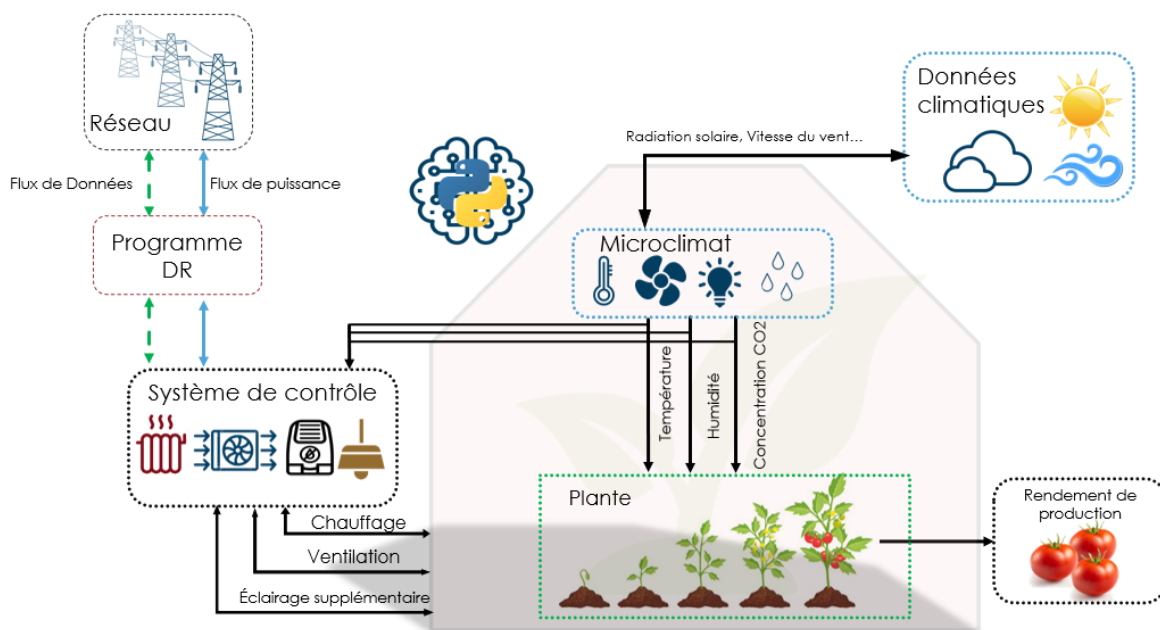


FIGURE 2.1 Structure du système de contrôle du microclimat de la serre.

2.3 Facteurs environnementaux au sein de la serre

Le microclimat au sein d'une serre exerce une influence substantielle sur la croissance végétale ainsi que sur ses échanges avec l'environnement intérieur, principalement à travers les processus fondamentaux de la photosynthèse et de la respiration. Ces interactions sont grandement facilitées par des mécanismes internes, notamment l'évapotranspiration des plantes qui influe sur l'humidité ambiante. La température, l'humidité relative, la concentration de CO_2 et l'intensité lumineuse sont autant de paramètres environnementaux cruciaux qui lorsqu'ils sont soigneusement régulés, peuvent créer des conditions optimales pour la croissance et le développement des plantes en serre [19]. Une gestion adéquate de ces facteurs peut non seulement stimuler la productivité et la qualité des plantes, mais également influencer leur résistance aux maladies et au stress environnementaux. Par conséquent, une compréhension approfondie de la manière dont les plantes réagissent et s'adaptent à leur microclimat est essentielle pour maximiser l'efficacité de production de plantes en serre et pour garantir la durabilité de la production agricole dans un contexte de plus en plus marqué par les défis environnementaux. L'impact de ces paramètres sur les plantes plus cultivées en serre au Québec est examinée dans les sections suivantes [20].

2.3.1 *Température*

La température joue un rôle crucial dans la croissance et le développement des plantes sous serre. En tant que paramètre environnemental majeur, elle exerce une influence significative sur divers processus métaboliques et physiologiques des plantes. Les températures optimales favorisent l'activité enzymatique et les réactions biochimiques nécessaires à la photosynthèse, processus essentiel à la production de sucres et à la croissance [21]. De plus, une température adéquate favorise l'absorption et le transport des nutriments par les racines, contribuant ainsi à une nutrition optimale des plantes. Cependant, des températures trop éle-

vées ou trop basses peuvent perturber ces processus, entraînant des dommages irréversibles. Les informations concernant les gammes de températures optimales et les températures néfastes pour les plantes les plus cultivées en serre au Québec sont synthétisées dans le Tableau 2-1 . Il est important de souligner que ces températures peuvent varier en fonction de l'étape de développement de la plante et du niveau de photosynthèse souhaité.

TABLEAU 2-1 Intervalle de températures pour différentes plantes en serre [22]

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

Le Tableau 2-1 présente les limites maximales et minimales des températures pour différentes plantes cultivées en serre au Québec. Deux dangers liés à la température sont probables pour les plantes : la surchauffe et le gel. La surchauffe se produit lorsque la température de l'air dépasse de 4 °C la plage de température optimale pour la plante. Cela peut affecter négativement la pollinisation et la production de fruits [23]. Par exemple, une exposition prolongée à des températures limite peut compromettre les mécanismes internes des tomates et entraver leur capacité à produire des fruits [24]. Le gel quant à lui se produit lorsque les températures ambiantes se trouvent dans l'intervalle de congélation (-2 °C à 0 °C). Il ralentit considérablement la photosynthèse des plantes. Par exemple des températures trop basses influence négativement la croissance de la laitue [25]. Au regard de ces deux dangers, ce mémoire se focalise à maintenir les températures optimales pour la respiration et la photosynthèse de la plante.

2.3.2 Humidité relative

Le déficit de pression de vapeur (DPV) est un paramètre clé qui mesure la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau à saturation et celle de l'air ambiant à la même température, influençant ainsi le mécanisme de transpiration des plantes par le contrôle de l'ouverture des stomates. Ce processus est essentiel pour la photosynthèse [26]. L'importance de l'humidité relative est également mise en avant, étant un facteur déterminant pour le DPV. En effet, elle affecte directement le taux de transpiration et, par conséquent, le taux de photosynthèse. Le DPV se calcule en utilisant la température et l'humidité relative de l'air, ce qui permet d'ajuster les conditions environnementales pour optimiser la croissance des plantes en serre. La littérature présente des plages recommandées pour l'humidité relative de différentes plantes cultivées en serre [26]. Pour des plantes cultivées au Québec, ces plages sont indiquées dans le Tableau 2-2.

TABLEAU 2-2 Intervalle d'humidité relative selon le type de plante [22]

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

En effet, le concombre est capable de survivre dans des environnements plus humides en raison de sa capacité à gérer l'excès d'eau par une transpiration accrue. Cependant, la tomate a besoin d'un environnement plus sec pour éviter les problèmes de pourriture et d'autres maladies liées à l'humidité. Il est important de respecter les plages d'humidité recommandées pour chaque plante pour assurer un développement optimal et une production maximale. En effet, les variations du taux d'humidité en dehors de ces plages recommandées peuvent entraîner des perturbations dans les processus métaboliques et physiologiques de la plante, ce qui peut avoir un impact sur la croissance, la production de fruits et la qualité des récoltes.

2.3.3 Concentration en CO_2

La photosynthèse dans les environnements de serre peut être optimisée par une régulation attentive de divers paramètres environnementaux. Le taux de CO_2 est un facteur critique, cependant l'humidité, la température et le rayonnement solaire jouent également un rôle prépondérant dans la capacité des plantes à assimiler le CO_2 . Il est donc essentiel de considérer ces éléments de manière globale pour améliorer la croissance végétale.

Nederhoff et al [27] ont évalué l'influence de la concentration en CO_2 sur le rendement de diverses plantes en serre, telles que les concombres, les tomates et les poivrons. Sous des conditions contrôlées, l'étude a révélé des améliorations significatives dans la production de biomasses et la quantité de fruits récoltés en réponse à l'augmentation des niveaux de CO_2 . Ces résultats sont exposés en détail dans le Tableau 2-3. Il est important de noter que l'augmentation de la concentration en CO_2 doit être gérée avec précaution, car une synergie avec les autres facteurs environnementaux est nécessaire pour obtenir les bénéfices optimaux.

TABLEAU 2-3 Effet du taux de CO_2 sur la productivité des plantes de serre[22]

| Plante | Concentration en CO_2 | Production de matière organique | Masse de fruit produite |
|-----------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Concombre | 364 → 620 ppm | +25 % | +31 % |
| Tomate | 306 → 448 ppm | +13 % | +33 % |
| Poivron | 370 → 510 ppm | +17,2 % | +8 % |

Les concombres requièrent des niveaux de concentration en CO_2 supérieurs à ceux des tomates et des poivrons pour optimiser la matière organique et la production de fruits. Il est important de souligner que les concentrations de CO_2 recommandées sont inférieures au seuil maximal de 1000 ppm souvent appliqué dans de nombreuses plantes en serre, selon [28]. Néanmoins, atteindre cette concentration maximale de 1000 ppm est habituellement possible avec l'utilisation d'un système d'injection de CO_2 en combinaison avec la ventilation de la

serre. Dans des situations où il est nécessaire de ventiler la serre pour réguler la température ou l'humidité, il est conseillé de maintenir la concentration en CO_2 au niveau ambiant [26]. Cette approche assure un équilibre entre les besoins spécifiques en CO_2 des plantes et la gestion efficace des conditions environnementales au sein de la serre, contribuant ainsi à une croissance optimale des plantes tout en maintenant des conditions de travail sûres et durables.

2.4 Modélisation énergétique des serres

2.4.1 Bilan énergétique d'une serre

Une formulation commune applicable à l'ensemble des modèles climatiques de serre basés sur les processus, tout en mettant en lumière la diversité des approches adoptées par différents modèles, est décrite dans cette section. Cette analyse s'appuie sur plusieurs sources examinant les modèles de serre avec divers degrés de complexité, tels que [29]-[32]. En effet, ces modèles climatiques en serre se concentrent généralement sur un ou plusieurs paramètres clé : la température, l'humidité et la concentration de CO_2 à l'intérieur de la serre. Ces paramètres peuvent être modélisés par une approche courante tenant en compte des bilans spécifiques : un bilan énergétique, un bilan hydrique et un bilan de CO_2 . Les équations (2.1), (2.2) et (2.3) décrivant respectivement ces trois bilans constitue un ensemble fondamental dans la modélisation du climat des serres.

$$E = Q_{sun} + Q_{heat} + Q_{lamp} - Q_{vent} - Q_{latent} - Q_{con} - Q_{cool} \quad (Wm^{-2}) \quad (2.1)$$

$$M_w = W_{trans} + W_{evap} + W_{hum} - W_{cond} - W_{vent} - W_{dehum} \quad (kg\{eau\}m^{-2}s^{-1}) \quad (2.2)$$

$$M_c = C_{inj} - C_{phot} - C_{vent} \quad (kg\{CO_2\}m^{-2}s^{-1}) \quad (2.3)$$

L'équation (2.1) représente le bilan énergétique, où E est la variation nette d'énergie dans la serre. Q_{sun} l'énergie entrante est fournie par le rayonnement solaire, Q_{heat} l'énergie

de système de chauffage de serre et Q_{lamp} l'énergie émise par les lampes. Les flux d'énergie sortants sont Q_{vent} le renouvellement de l'air régulé par la ventilation, Q_{con} sont les échanges convectifs et conductifs avec l'extérieur et Q_{cool} l'énergie extraite par les mécanismes de refroidissement. L'équation (2.2) représente le bilan hydrique, où M_w est la variation nette de masse de vapeur d'eau dans la serre. W_{trans} est la transpiration des cultures, W_{evap} est l'évaporation de l'eau du sol ou d'autres surfaces et W_{hum} est l'humidité ajoutée par des mécanismes de brumisation tels que le brouillard et le refroidissement par ventilateur. Les flux sortants sont W_{cond} est la condensation de vapeur sur des surfaces froides, W_{vent} est l'eau qui s'égoutte à travers la ventilation et W_{dehum} est la vapeur extraite par des mécanismes de déshumidification. L'équation (2.3) représente bilan du CO_2 où M_c est le changement net de masse de CO_2 dans l'air. Le flux entrant est C_{inj} est l'injection de CO_2 , les flux sortants sont C_{phot} est le CO_2 retiré par la photosynthèse et C_{vent} est l'échange de CO_2 par ventilation.

• Rayonnement solaire et énergie des lampes

La puissance solaire peut être décrite comme $Q_{sun} = \alpha_{sun} I_{sun} (W/m^2)$ avec $I_{sun} (W/m^2)$ représentant le rayonnement solaire et α_{sun} la fraction du rayonnement global qui contribue à chauffer la serre. Le rayonnement solaire I_{sun} est généralement donné en entrée du modèle. Il peut s'agir d'une valeur unique représentant le rayonnement global ou de deux valeurs différenciant le rayonnement direct du rayonnement diffus. Le rayonnement solaire peut être décomposé en rayonnement photosynthétique actif (PAR), qui est utilisé par le modèle de plante pour calculer la photosynthèse, et d'autres bandes d'ondes, telles que le rayonnement proche infrarouge (NIR) ou le rayonnement ultraviolet (UV), qui contribuent au chauffage, mais pas à la photosynthèse. Le coefficient α_{sun} peut être supposé constant ou dépendre de la position du soleil dans le ciel et de la quantité de rayonnement direct et diffus. α_{sun} est généralement considéré comme constant lorsque la proportion du rayonnement solaire qui contribue au chauffage de la serre ne varie pas de manière significative au fil du temps.

La puissance consommée par le système d'éclairage peut être définie comme $Q_{lamp} = \alpha_{lamp} I_{lamp} (W/m^2)$, où I_{lamp} est l'apport d'énergie (électricité) fournie par les lampes et α_{lamp} est la fraction de cet apport qui contribue au chauffage de la serre. Comme pour le rayonnement solaire, I_{lamp} peut être supposé constant ou dépendre d'un sous-modèle décrivant la sortie de la lampe en termes de rayonnement photosynthétique actif (PAR), de rayonnement proche infrarouge (NIR), de rayonnement thermique (FIR), de chauffage par convection et par conduction. Le choix de la modélisation des lampes peut également dépendre des lampes considérées.

Citons comme exemples les lampes à incandescence, les lampes fluorescentes, les lampes à décharge à haute intensité incluant les lampes à vapeur de sodium à haute pression (HPS) ou les lampes à halogénures métalliques, et les diodes électroluminescentes (DEL). Naturellement, pour les serres sans éclairage supplémentaire, cette composante n'est pas incorporée dans le modèle. En plus du fait que l'association de ces deux modes d'éclairage (naturel et artificiel) soit économique, la plupart des modèles utilisent l'éclairage par des lampes artificielles comme éclairage supplémentaire afin de satisfaire aux besoins de la photosynthèse [33].

• Ventilation

L'échange d'énergie thermique par ventilation entre la serre et le milieu extérieur peut être défini par :

$$Q_{vent} = vc(T_{in} - T_{ext}) \quad (W/m^2) \quad (2.4)$$

Où c ($W m^{-3}C^{-1}$) est la capacité thermique volumétrique de l'air, et v ($m \cdot s^{-1}$) est le taux de renouvellement de l'air. Dans les cas les plus simples, U_{vent} est négligé ou supposé constant. Dans d'autres cas (comme dans le modèle de Van Henten), v est donné en entrée, T_{in} est la température de la serre et T_{ext} la température extérieure. Dans les modèles plus

complexes (comme dans le modèle De Zwart), plusieurs échanges d'air sont pris en compte, modélisés comme dans l'équation (2.4), et additionnés pour constituer Q_{vent} . Une approche complexe de la modélisation v prend en compte des facteurs tels que le degré d'ouverture des fenêtres, la vitesse du vent extérieur, les différences de température entre l'air intérieur et l'air extérieur, la géométrie et l'emplacement (toit, mur latéral) des fenêtres, etc. D'autres échanges d'air dans la serre (par exemple, entre l'air au-dessous et au-dessus d'un écran) peuvent être modélisés de la même manière. L'échange d'air entre l'air intérieur et l'air extérieur v est utilisé de la même manière dans le calcul des pertes de vapeur d'eau et de CO_2 par la ventilation :

$$W_{\text{vent}} = v(V_1 - V_2) \quad (\text{kg [eau] m}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.5)$$

$$C_{\text{vent}} = v(C_1 - C_2) \quad (\text{kg [CO}_2\text{] m}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.6)$$

Où W_{vent} ($\text{kg [eau] m}^{-2}\text{s}^{-1}$) est le taux de perte de vapeur d'eau vers l'extérieur, et V_1 et V_2 (kg [eau] m^{-3}) sont respectivement les concentrations de vapeur d'eau à l'intérieur et à l'extérieur. De même, C_{vent} ($\text{kg [CO}_2\text{] m}^{-2}\text{s}^{-1}$) est le taux de perte de CO_2 vers l'extérieur, et C_1 et C_2 ($\text{kg [CO}_2\text{] m}^{-3}$) sont les concentrations de CO_2 à l'intérieur et à l'extérieur.

• Convection et conduction

La loi de Fourier est généralement utilisée pour calculer la convection et la conduction entre deux corps :

$$Q_{\text{con}} = h(T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}) \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2.7)$$

Où h ($\text{W }^\circ\text{C}^{-1}\text{m}^{-2}$) est appelé coefficient d'échange thermique (naturel ou forcé) et T_{in} et T_{ext} ($^\circ\text{C}$) sont les températures intérieure et extérieure respectivement. La convection et la conduction sont des processus très différents, mais ils sont souvent confondus dans les modèles de serre. Par exemple, dans les échanges convectifs, le coefficient d'échange thermique

h est souvent décrit par une fonction non linéaire de la différence de température ($T_{\text{in}} - T_{\text{ext}}$) et peut dépendre d'autres facteurs tels que le vent, bien qu'une approche simple suppose un h constant.

- **Pertes d'énergie en chaleur latente**

Un élément important du bilan énergétique est le transfert de la chaleur sensible en chaleur latente. Ce transfert est décrit comme suit :

$$Q_{\text{Latent}} = LW_{\text{Latent}} \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (2.8)$$

Où L (J.kg^{-1}) est la chaleur latente d'évaporation de l'eau, et

$$W_{\text{Latent}} = W_{\text{Tran}} + W_{\text{Evap}} - W_{\text{cond}} \quad (\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.9)$$

est la quantité nette d'eau transformée en vapeur dans la serre : W_{Tran} est l'eau transpirée par la plante, W_{Evap} est l'eau évaporée du sol et W_{cond} est la vapeur condensée en eau sur les surfaces froides telles que la couverture ou les écrans. Pour chacune de ces composantes W , le flux d'énergie associé est LW . Tous les changements dans le bilan de vapeur d'eau ne sont pas associés à des échanges de chaleur latente : par exemple, la perte de vapeur d'eau par la ventilation W_{vent} n'est pas associée à un changement dans le bilan d'énergie.

- **Transpiration**

Un large éventail d'approches peut être utilisé pour modéliser la transpiration des plantes [34]. Ces approches vont d'une fonction ajustée empiriquement où la transpiration ne dépend que du rayonnement solaire, en passant par des modèles aérodynamiques qui incluent l'influence du vent, jusqu'à des modèles détaillés qui incluent le bilan énergétique de la plante et la réponse des stomates aux attributs environnementaux. Ces attributs incluent le rayonne-

ment total intercepté par la plante, le déficit de pression de vapeur (DPV), la température de l'air et la concentration de CO_2 . L'une des façons les plus simples de modéliser la transpiration est de la considérer comme une fonction linéaire du rayonnement [17] :

$$W_{\text{Tran}} = aI_{\text{sun}} + b \quad (\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.10)$$

Où I_{sun} (W m^{-2}) est le rayonnement solaire, et a (kg J^{-1}) et b ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sont des paramètres ajustés qui peuvent dépendre de la plante, du stade de la culture ou de la saison de croissance.

Une autre façon courante de modéliser la transpiration est la formule de Penman-Monteith [35], qui décrit la chaleur latente d'évaporation d'une feuille (illustrée ici en utilisant la notation de [34]) :

$$Q_{\text{Trans}} = \frac{(\Delta R_n + \rho C_p D_i g_a)}{(\Delta + \gamma(1 + \frac{g_a}{g_c})} \quad (\text{W m}^{-2}[\text{feuille}]) \quad (2.11)$$

Où Δ (kPa K^{-1}) est la pente de la relation entre la pression de vapeur saturante et la température, R_n ($\text{W m}^{-2}[\text{feuille}]$) est le rayonnement net intercepté par la plante, ρ (kg m^{-3}) est la densité de l'air, C_p ($\text{W kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) est la chaleur spécifique de l'air, D_i (kPa) est le déficit de pression de vapeur de l'air, g_a (m s^{-1}) est la conductance aérodynamique, γ (kPa K^{-1}) est la constante psychrométrique et g_c (m s^{-1}) est la conductance stomatique. La transpiration $W_{\text{Trans,leaf}}$ en ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$) est alors calculée en divisant $U_{\text{Trans,leaf}}$ par la chaleur spécifique de l'évaporation de l'eau, voir équation (2.11).

Stanghellini [36] a modifié la formule de Penman-Monteith pour le cas des plantes sous serre. Tout d'abord, un facteur pour l'indice de surface foliaire LAI ($\text{m}^2[\text{feuille}]\text{m}^{-2}[\text{sol}]$), qui exprime la surface foliaire de la plante par surface de sol de la serre, a été utilisé dans ce cas

pour convertir la transpiration des feuilles en transpiration de la plante :

$$Q_{\text{Trans}} = \frac{(\Delta R_n + 2LAI\rho C_p D_i g_a)}{(\Delta + \gamma(1 + \frac{g_a}{g_c})} \quad (\text{W m}^{-2}[\text{sol}]) \quad (2.12)$$

De plus, le calcul de la conductance aérodynamique g_a a été modifié pour décrire un environnement de serre. Enfin, la conductance stomatique g_c a été calculée selon l'approche de [37], où la conductance stomatique dépend des facteurs environnementaux tels que le rayonnement, le déficit de pression de vapeur, la température et la concentration de CO_2 :

$$g_c = g_M f_1(R_n) f_2(D_i) f_3(T_i) f_4(CO_2) \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (2.13)$$

g_M (m s^{-1}) est la conductance stomatique maximale, et f_1, f_2, f_3, f_4 sont des fonctions sans unité avec des valeurs entre 0 et 1 qui représentent l'influence, respectivement, du rayonnement, du déficit de pression de vapeur, de la température et de la concentration en CO_2 sur la conductance stomatique. Les différences entre les modèles de transpiration développés dans [35] et [34] ont été examinées par [38].

Dans l'équation (2.13), T_i peut se référer à la température de l'air ou de la plante, et D_i peut être soit la différence de pression de vapeur de l'air, soit la différence de pression de vapeur saturée à la température de la plante et de l'air. Si la température de la plante est utilisée dans le calcul de la transpiration, cet attribut doit naturellement être inclus dans le modèle de serre. Une autre approche de la modélisation de la transpiration repose sur l'hypothèse que la concentration de vapeur d'eau à l'intérieur est stable et que tous les flux de vapeur autres que la ventilation sont négligeables. Cette hypothèse est valable dans des conditions où le renouvellement de l'air est suffisant pour maintenir une concentration de vapeur homogène et stable, et où les autres sources de vapeur, telles que l'évaporation du

sol ou des structures internes, sont minimales. Si l'on considère l'équation (2.2), on obtient $W_{\text{Trans}} = W_{\text{vent}}$ ce qui permet d'estimer la transpiration en fonction du taux de ventilation et des concentrations de vapeur à l'intérieur et à l'extérieur (équation 2.5).

• 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 termes, la pression de vapeur saturante à la température de la surface est plus élevée que la pression de vapeur de l'air. La condensation se produit généralement sur la face intérieure de la couverture de la serre ou sur les écrans, mais elle peut également se produire sur la culture elle-même, le sol ou la terre. Une équation décrivant la condensation est la suivante :

$$W_{\text{cond}} = \max\{0, g \cdot (V_{\text{Air}} - V_{\text{surface}})\} \quad (\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.14)$$

où V_{air} (kg m^{-3}) est la concentration de vapeur de l'air, V_{surface} (kg m^{-3}) est la concentration de vapeur saturante à la température de la surface, et g ($\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) est un coefficient d'échange. Ce coefficient g peut être lié au coefficient d'échange de chaleur h dans l'équation (2.7), par exemple il peut lui être proportionnel [17].

2.4.2 Outils de simulation

La simulation d'une serre peut être effectuée en utilisant différents outils tels que TRN-SYS [39] ou des outils à architecture ouverte tels qu'EnergyPlus [40] et Design Builder [41]. Des modèles personnalisés peuvent aussi être programmés dans des environnements de simulation comme Python [42] ou Dymola [43]. Une revue de ces outils est effectuée afin d'identifier leurs avantages et inconvénients dans le contexte de la simulation de la performance énergétique des serres.

EnergyPlus est un logiciel avancé conçu pour effectuer des analyses détaillées des bilans énergétiques et massiques au sein des bâtiments. Il peut être intégré à l'interface OpenStudio, qui est reconnue pour sa facilité d'utilisation, afin d'optimiser l'expérience utilisateur. Ce logiciel permet une évaluation précise de l'éclairage dans les espaces en employant la méthode de radiance pour le traçage des rayons lumineux, une technique établie dans la littérature scientifique pour sa capacité à simuler fidèlement les interactions lumineuses dans les environnements complexes [44]. En outre, EnergyPlus est doté d'un moteur de simulation robuste, capable de modéliser les flux massiques d'air dans les serres, offrant ainsi une quantification des échanges d'air résultant de la ventilation naturelle et des mouvements d'air entre différentes zones thermiques au sein des bâtiments, en s'appuyant sur le modèle reconnu COMIS [45].

Il est important de souligner que, malgré ses capacités étendues, EnergyPlus ne supporte pas actuellement la modélisation le dioxyde de carbone. Du point de vue des fonctionnalités, le logiciel intègre une bibliothèque exhaustive de composants de systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVAC), ainsi que des options pour l'incorporation de systèmes exploitant les énergies renouvelables. EnergyPlus est également capable de calculer les besoins en chauffage et en refroidissement en se basant sur les normes de conception définies par ASHRAE ¹[40].

Pour une personnalisation avancée des composants des systèmes de CVAC, EnergyPlus offre la possibilité d'intégrer des fonctionnalités spécifiques via l'utilisation d'outils externes tels que le Energy Management System, augmentant ainsi la flexibilité dans la modélisation et l'intégration des caractéristiques uniques à chaque projet [46].

DesignBuilder est une solution logicielle robuste dédiée à la modélisation énergétique

1. ASHRAE est l'abréviation de "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers", en anglais

avancée des bâtiments. Avec une interface utilisateur conviviale, ce logiciel permet aux professionnels du bâtiment de créer des modèles numériques détaillés, capturant l'essence architecturale et les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation CVAC. Ces modèles servent de toile de fond pour des simulations énergétiques précises et complètes, offrant des analyses approfondies sur les performances énergétiques, les charges thermiques, l'éclairage et la qualité de l'air intérieur. Les avantages de DesignBuilder résident dans sa simplicité d'utilisation, sa capacité à évaluer des stratégies de conception variées et sa capacité à réaliser une optimisation paramétrique pour des performances optimales. Cependant, tout comme d'autres logiciels de modélisation, DesignBuilder exige des données d'entrée précises et une compréhension approfondie des systèmes du bâtiment pour garantir des résultats pertinents et fiables [47].

TRNSYS est un logiciel avancé conçu pour la simulation de systèmes thermiques en conditions dynamiques, basé sur une architecture modulaire de composants [39]. Chaque composant, ou "Type", dans TRNSYS est en fait un modèle mathématique représentant un phénomène physique spécifique, implémenté en FORTRAN 90. Cette structuration impose que chaque composant soit défini par des paramètres constants, des variables d'entrée, et des variables de sortie, offrant une grande flexibilité dans la configuration des simulations. Cette flexibilité permet à TRNSYS d'évaluer la performance énergétique des bâtiments à travers des modèles de bâtiments multizones et de réaliser des analyses avancées de l'éclairage en utilisant DaySIM, une méthode intégrée dans la version 2018 du logiciel [48]. En outre, TRNSYS est équipé de TRNFLOW pour simuler les échanges d'air dans les bâtiments, offrant une analyse détaillée de la ventilation naturelle basée sur le modèle COMIS [49]. Cette fonctionnalité prend en charge la modélisation du transport de contaminants, enrichissant ainsi les capacités de simulation environnementale du logiciel. Avec une bibliothèque interne exhaustive couvrant des bâtiments, des phénomènes physiques, des systèmes d'énergie re-

nouvelable, des systèmes CVAC, et des contrôleurs réalistes, TRNSYS se présente comme un outil puissant pour la modélisation de systèmes complexes dans le domaine du génie thermique et énergétique [50].

Dymola et son équivalent open-source, OpenModelica, sont des plate-forme de simulation avancées qui permettent de construire des modèles en utilisant le langage Modelica. Ce langage se distingue par son approche orientée objet, qui intègre les paramètres, les variables d'entrée et de sortie dans un ensemble unifié, formant un système d'équations symboliques qui est résolu par le moteur de simulation [51]. Cette approche facilite la modélisation de systèmes complexes dans divers domaines, tels que l'ingénierie des bâtiments, les systèmes solaires et les systèmes de CVAC [52], [53], grâce à l'utilisation de bibliothèques de composants Modelica spécifiques.

Des modèles spécifiques ont été développés pour simuler les interactions massiques entre différentes zones d'un bâtiment, analogues à ceux du modèle COMIS, y compris la modélisation du transport de contaminants [43]. Des modèles avancés pour l'analyse de l'éclairage basée sur le traçage des rayons sont également disponibles, permettant même la cosimulation avec radiance, un logiciel de référence pour le traçage des rayons lumineux [54].

Une analyse comparative entre TRNSYS et Dymola révèle que bien que Dymola puisse exiger plus de temps de calcul pour des modèles de complexité similaire, il offre l'avantage d'un pas de temps de calcul variable [55]. Cette caractéristique permet à Dymola d'adapter la granularité en temps en fonction des variations des conditions de simulation, allongeant le pas de temps lors de conditions stables et le raccourcissant lors de changements rapides. Cette flexibilité contraste avec la contrainte de TRNSYS, qui opère avec un pas de temps fixe, potentiellement rallongeant le temps de simulation pour des scénarios nécessitant une haute résolution temporelle. Toutefois, la nécessité de résoudre un système complexe d'équations

symboliques demande une capacité de calcul significative, ce qui peut limiter l'avantage de l'adaptabilité du pas de temps dans certaines situations.

Des modèles personnalisés, conçus pour répondre aux besoins spécifiques, sont élaborés et codés au sein d'environnements de programmation tels que Python. Ces modèles sur mesure offrent une flexibilité exceptionnelle pour capturer des interactions complexes et des scénarios uniques. Grâce à la richesse des bibliothèques et des outils disponibles dans Python, les concepteurs peuvent créer des modèles détaillés et sophistiqués pour aborder des problèmes variés. La programmation dans Python permet d'intégrer diverses fonctions mathématiques, algorithmes de simulation, et d'adopter des approches modulaires pour développer des modèles évolutifs et personnalisables en fonction des besoins spécifiques de chaque application. L'utilisation de Python facilite également la visualisation des résultats, la manipulation des données, et la collaboration entre les experts pour créer des solutions sur mesure à des problèmes complexes [56].

2.4.3 Types de modèles énergétiques de la serre

Le microclimat à l'intérieur d'une serre a un impact significatif sur la croissance des plantes et leurs interactions avec l'environnement intérieur, principalement à travers les processus fondamentaux de la photosynthèse et de la respiration. Ces interactions sont grandement facilitées par des mécanismes internes, en particulier l'évapotranspiration des plantes, qui influence l'humidité ambiante [19]. La température, l'humidité relative, les niveaux de CO_2 et l'intensité lumineuse sont des paramètres environnementaux critiques qui, lorsqu'ils sont régulés avec soin, engendrent des conditions optimales pour la croissance et le développement des plantes de serre [17]. Par conséquent, la modélisation précise du processus dynamique régissant le climat de la serre représente un défi de taille.

La modélisation énergétique des serres est une composante clé pour une production agri-

cole durable et efficace dans un environnement contrôlé. Il existe deux principaux types de modèles de serres : les modèles énergétiques et les modèles de plante [57], [58]. En raison de l'importance des modèles énergétiques sur le marché de la réponse à la demande flexible, ce mémoire se concentre uniquement sur les premiers. Les modèles énergétiques sont utilisés pour décrire la dynamique thermique de la serre, en particulier en ce qui concerne la température, l'humidité, la ventilation et la gestion de l'éclairage. Cela est impératif pour optimiser la consommation d'énergie et assurer des conditions optimales pour la croissance des plantes [59]. Diverses approches de modélisation énergétique, à savoir les modèles boîte-blanche, boîte-grise et boîte-noire, sont élucidées pour fournir des perspectives diverses sur la dynamique énergétique des serres [57].

- **Modèles boîte blanche**

La modélisation physique de type boîte blanche occupe une place importante, cette approche repose sur les principes fondamentaux des lois physiques pour estimer les besoins énergétiques d'une serre, tels que le chauffage, la ventilation, l'éclairage et l'irrigation [60]. Les modèles de type boîte blanche sont particulièrement pertinents dans la phase de conception des serres, où ils servent à dimensionner adéquatement les équipements nécessaires au maintien d'un climat optimal pour la croissance des plantes. Ces modèles utilisent des ensembles complets d'équations qui prennent en compte la géométrie détaillée de la serre, les propriétés des matériaux de construction (par exemple, le type de verre ou de plastique pour les parois), et les caractéristiques énergétiques spécifiques à l'environnement interne de la serre. Leur application permet de simuler avec précision les interactions entre les conditions climatiques extérieures et l'environnement intérieur de la serre, offrant ainsi une compréhension approfondie des besoins énergétiques et climatiques [61]. Cependant, l'utilisation de ces modèles en pratique se heurte à des défis significatifs. Leur efficacité est souvent limitée par le temps et les coûts associés à la collecte et à la définition précise de tous les paramètres nécessaires.

Ces modèles exigent des informations détaillées sur la structure de la serre, les équipements installés, et les conditions météorologiques locales. Cette complexité peut rendre ces modèles moins adaptés pour les serres déjà existantes, où une approche plus flexible et moins coûteuse en temps pourrait être préférable. En outre, les modèles boîte blanche ne sont pas toujours efficaces pour modéliser les comportements dynamiques et variables tels que les changements de plante ou les interventions humaines, qui peuvent influencer de manière significative la consommation d'énergie dans une serre [62]. Pour ces raisons, dans le cas des serres existantes, des modèles alternatifs tels que les modèles boîtes noires et grises peuvent offrir une solution plus adaptative et facile à paramétrer. Ces modèles permettent une analyse plus souple de la performance énergétique, sans nécessiter une quantité exhaustive de données de calibration.

- **Modèles boîte noire**

Les modèles boîte noire occupent une place de choix, en raison de leur capacité à estimer avec précision les paramètres environnementaux de la serre. Ces modèles, qui se distinguent par leur approche basée sur les données plutôt que sur la compréhension physique des systèmes, sont particulièrement adaptés aux environnements complexes et dynamiques des serres [63]. Le principal atout des modèles boîte-noire réside dans leur capacité à traiter et analyser d'importantes quantités de données pour fournir des prévisions. En se basant sur des mesures telles que la température, l'humidité, et la concentration de CO_2 , ces modèles peuvent estimer la consommation énergétique des systèmes de chauffage, de ventilation, de climatisation (CVAC), et d'éclairage. Cette estimation est cruciale pour maintenir un équilibre entre les conditions optimales pour la croissance des plantes et l'efficacité énergétique [63]. Un autre avantage important des modèles boîte-noire est leur flexibilité et leur adaptabilité. Les serres sont soumises à des variations significatives en termes de demandes énergétiques, dues aux changements des conditions météorologiques extérieures, aux différents cycles de croissance

des plantes, et aux pratiques de gestion variées. Les modèles boîte-noire, grâce à leur capacité d'apprentissage adaptatif, peuvent intégrer de nouvelles données d'observation pour affiner continuellement leurs prévisions, offrant ainsi une gestion énergétique plus réactive et plus précise [64]. L'intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage statistique constitue le cœur de l'efficacité des modèles boîte-noire. En exploitant des techniques avancées telles que les réseaux de neurones et les machines à vecteurs de support, ces modèles analysent les données historiques pour estimer la demande en électricité. Cette approche permet non seulement de prévoir la consommation énergétique future, mais aussi d'identifier des opportunités d'optimisation énergétique, contribuant ainsi à réduire les coûts et à améliorer la durabilité des opérations de serre [65]. Cependant, il est important de souligner les limitations de ces modèles. Leur nature "boîte-noire" signifie qu'ils ne fournissent pas d'explications intuitives ou facilement interprétables des processus physiques au sein de la serre. Par conséquent, ils sont principalement utilisés pour la prévision et l'optimisation, plutôt que pour la compréhension approfondie des interactions physiques complexes qui se déroulent dans l'environnement de la serre.

- **Modèles boîte grise**

Les modèles boîte grise ou encore appelées modèle à espace-d'état combinent la modélisation physique pour simuler le comportement thermique de la serre et les aspects des modèles boîte noire pour traiter des données de mesure. Les modèles boîte grise pour les serres intègrent des principes physiques pour simuler des processus tels que la transmission de chaleur à travers les parois de la serre, l'échange de chaleur avec l'environnement extérieur, et les processus internes comme l'évapotranspiration des plantes. Cependant, ils intègrent également des données de mesure réelles pour affiner et valider les paramètres du modèle, permettant ainsi une meilleure adaptation aux conditions réelles de la serre [66]. Les modèles boîte grise sont particulièrement utiles pour la gestion de l'énergie dans les serres, car ils peuvent être

utilisés pour optimiser la consommation d'énergie en relation avec le chauffage, la ventilation, et l'éclairage. Ils permettent également de prévoir les conditions climatiques internes de la serre, ce qui est essentiel pour maintenir un environnement de croissance optimal pour les plantes [67]. En ce qui concerne les inconvénients, les modèles boîtes grises requièrent une double compétence : une connaissance approfondie des processus thermiques dans les serres ainsi qu'une compréhension des modèles boîtes noires. De plus, bien qu'ils soient moins exigeants par rapport aux modèles boîte blanche, ils nécessitent toujours un équilibre entre précision théorique et flexibilité pratique.

La modélisation de la serre fournit une compréhension essentielle des dynamiques thermiques et des interactions complexes entre température, humidité pour la croissance des plantes. Toutefois, pour que cette modélisation soit efficace, elle doit être intégrée à des algorithmes de contrôle sophistiqués. Ces algorithmes exploitent les données des modèles pour ajuster en temps réel les paramètres du microclimat de la serre, tels que la ventilation, le chauffage et l'éclairage, répondant ainsi aux variations des conditions internes et externes.

2.5 Algorithme de contrôle

La gestion du microclimat dans les serres représente un défi en raison de la complexité et de l'interdépendance de multiples variables [68]. Les systèmes de contrôle environnemental des serres sont caractérisés par leur nature et leur configuration à multiples entrées et sorties MIMO. Divers algorithmes de contrôle ont été appliqués dans ces systèmes, incluant le Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID), le contrôle non linéaire, robuste, la logique floue, les réseaux neuronaux, ainsi que des algorithmes hybrides [69]. Ces méthodes peuvent être catégorisées en quatre types principaux : classiques, avancés, intelligents et hybrides [70]-[73].

2.5.1 Algorithmes de contrôle classiques

Le régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) est fréquemment utilisé dans la gestion des serres, principalement en raison de sa polyvalence, simplicité d'utilisation et efficacité prouvée [74]. Ce régulateur fonctionne par une boucle de rétroaction, analysant les données d'un capteur pour calculer la sortie des actionneurs, en se basant sur les composantes proportionnelle, intégrale et dérivée [75]. Toutefois, le réglage de ce régulateur peut être complexe et prendre du temps [76]. Le système PID présente des lacunes, notamment sa tendance à dépasser le point de consigne et sa difficulté à gérer les perturbations externes [77]. Pour pallier ces problèmes, [78] on a suggéré l'intégration d'un Algorithme Évolutif (EA), bien que cette solution soit limitée aux modèles analytiques de serre. Le PID montre également ses limites dans des applications plus avancées, en particulier pour le contrôle non linéaire et dynamique. Un autre défi est le problème d'erreur d'enroulement, où le système perd le contrôle et met du temps à se réajuster après un changement significatif du point de consigne [79].

2.5.2 Algorithmes de contrôle avancés

Ces techniques s'avèrent particulièrement utiles dans les situations de contrôle caractérisées par des délais de traitement prolongés, une forte interdépendance entre les processus, ainsi que diverses contraintes opérationnelles et perturbations mesurables [73]. Elles sont particulièrement efficaces pour gérer des systèmes non linéaires à entrées et sorties multiples (MIMO), offrant une meilleure gestion des perturbations par rapport aux méthodes de contrôle conventionnelles. Cependant, ces techniques nécessitent l'utilisation de modèles mathématiques spécifiques, contrairement aux approches de contrôle intelligent. Parmi ces algorithmes, on trouve le contrôle prédictif basé sur modèle (MPC), ainsi que les techniques de contrôle adaptatif et robuste.

- **Contrôle prédictif de modèle (MPC)**

Le contrôle prédictif basé sur modèle (MPC) se distingue par son approche innovante : il utilise un modèle du processus pour ajuster une variable manipulée, en se focalisant sur l'optimisation d'objectifs sur un horizon temporel. Par rapport aux systèmes PID, le MPC est plus avancé, capable de prédire les évolutions futures et de planifier ses actions de contrôle en conséquence. Dans une étude présentée dans [80], les auteurs ont exploré l'utilisation du MPC dans divers domaines agricoles, incluant l'irrigation, l'opération de machines et la gestion des serres. En tant qu'algorithme de contrôle en boucle fermée, le MPC est capable d'appliquer des contraintes sur les variables manipulées et contrôlées. Sa capacité à gérer efficacement les systèmes MIMO, non linéaires et dynamiques, est renforcée par une optimisation continue qui prend en compte les retards, les changements d'objectifs, et les défaillances de capteurs. Cependant, l'efficacité du MPC est étroitement liée à la précision du modèle mathématique sur lequel il repose. De plus, selon la taille de la serre, l'exigence d'optimisation en temps réel pour le contrôle des serres nécessite des ressources de calcul importantes, ce qui peut additionner des frais significatifs du coût total de la serre.

- **Contrôle adaptatif**

Le contrôle adaptatif se distingue des méthodes de contrôle linéaire par sa capacité à ajuster les paramètres en réponse aux incertitudes et changements inconnus dans le modèle [81]. Contrairement au MPC qui adapte le modèle aux perturbations futures, le contrôle adaptatif réagit aux perturbations actuelles. Il est particulièrement utile dans les processus où la dynamique évolue en raison de perturbations stochastiques [70]. Il existe principalement deux types de contrôle adaptatif : la programmation des gains, basée sur des connaissances préalables, et le contrôle adaptatif auto-ajustable, qui effectue une estimation en temps réel des paramètres [82]. La méthode du contrôle adaptatif fournit des solutions instantanées en se

basant sur des mesures réelles et anticipées [83]. Les Systèmes d'interférence neuro-flou adaptatifs (ANFIS) ont démontré une supériorité sur les contrôles PI, FL et ANN en matière de régulation de la température dans les serres, offrant une réactivité rapide [84]. Berenguel et al. [85] ont conçu un contrôleur adaptatif mixte feedforward pour la régulation de la température diurne en utilisant les ouvertures de ventilation. De même, Arvanitis et al. [86] ont appliqué des contrôleurs adaptatifs à sortie multi-échantillonnage pour un contrôle stable et efficace de la température des serres, en estimant en ligne les paramètres inconnus. Le contrôle hiérarchique adaptatif a été utilisé pour gérer le microclimat des serres, tenant compte des différentes échelles de temps dans la croissance des plantes [87]. Speetjens et al. [88] ont employé un filtre de Kalman étendu (EKF) pour une estimation en ligne et adaptative des paramètres de contrôle climatique des serres, avec de meilleurs résultats de prévision que les approches à paramètres fixes. Toutefois, cette méthode est optimale pour des ensembles de données limités. Bien que le contrôle adaptatif permette une modification rapide des paramètres en réaction aux changements dynamiques de l'environnement de la serre [86], et prenne en compte les erreurs de modèle et d'estimation [88], il nécessite l'identification d'un modèle approprié et sa mise en œuvre peut être complexe et exigeante.

• **Contrôle robuste**

Le contrôle robuste se distingue du MPC et du contrôle adaptatif par sa nécessité de prévoir les incertitudes des processus, notamment dans les cas de non-linéarité ou de variations temporelles [31], [89]. Cette approche permet de couvrir toutes les conditions opérationnelles possibles, visant à maintenir la stabilité et les performances dans une large gamme de conditions [69]. Bennis et al. [90] ont examiné la gestion de la température et de l'humidité dans une serre expérimentale, en utilisant un système de contrôle robuste basé sur la conception qui a surpassé un régulateur marche/arrêt traditionnel. Linker et al. [91] ont implémenté le contrôle robuste pour la ventilation et l'enrichissement en CO_2 d'une serre, utilisant la mé-

thode de Horowitz, bien que la réponse retardée des capteurs ait rendu le contrôle du CO_2 légèrement délicat. Plus tard, la théorie de la rétroaction quantitative (QFT) a été employée pour améliorer le contrôle de la température et de l'humidité, en spécifiant l'enthalpie et le rapport d'humidité de l'air [92]. Moreno et al. [93] ont développé une stratégie de contrôle robuste pour la température des serres, utilisant QFT avec une compensation feedforward et une action anti-enroulement, améliorant la gestion des perturbations et des incertitudes. Agmail et al. [94] ont pris en compte l'interaction forte entre la température et l'humidité dans le contrôle robuste des systèmes de ventilation et d'humidification des serres, réussissant à maintenir ces paramètres proches des points de consigne. Dans les serres aux conditions variables et couplées, le contrôle robuste s'est révélé efficace [74]. Toutefois, il peut rencontrer des difficultés avec des changements drastiques, nécessitant des ajustements spécifiques pour chaque système de serre différent. Parfois, sa robustesse peut être en contradiction avec le besoin de contrôle dynamique.

2.5.3 Algorithmes de contrôle intelligents et flou

Les algorithmes intelligents utilisent des techniques d'intelligence artificielle et s'avèrent utiles en l'absence d'un modèle mathématique. Cependant, ils nécessitent un grand ensemble de données pour l'entraînement du modèle. Parmi ces algorithmes, on trouve le contrôle flou et le contrôle par réseaux de neurones.

- **Contrôle par logique floue (FLC)**

La logique floue (FLC) est souvent privilégiée par rapport à la logique numérique traditionnelle car elle permet une formulation plus intuitive et compréhensible pour les opérateurs humains. Elle interpole les valeurs d'entrée en tant que variables logiques sur une échelle de 0 à 1 [95]. Azaza et al. [96] ont démontré l'efficacité de la FLC dans le contrôle de la température et de l'humidité des serres, où l'application de cette méthode a permis de réa-

liser des économies d'énergie et d'eau de 22% et 33% respectivement. Marquez-Vera et al. [97] ont adopté un modèle FLC pour réguler la température interne des serres, utilisant une vanne servo proportionnelle pour le chauffage nocturne et un autre mécanisme pour la ventilation diurne. Kolokotsa et al. [98] ont conçu un système intelligent de contrôle du climat et de l'énergie des serres utilisant deux contrôleurs FLC, bien que l'évaluation de l'efficacité énergétique ait été limitée par l'absence de données préalables. Toutefois, l'utilisation du FLC présente certaines limitations. Le délai de prise de décision peut être un obstacle, et certaines dynamiques du système ne sont pas toujours bien représentées, notamment lorsqu'une exclusivité mutuelle entre les actions de contrôle est nécessaire [97]. Bien que la FLC soit flexible et adaptée aux systèmes avec des données de modèle incomplètes [99], le nombre de règles nécessaires augmente exponentiellement avec le besoin de précision accrue [70], [100]. De plus, puisque la FLC incorpore l'expérience d'experts dans sa formulation, une connaissance approfondie des conditions de fonctionnement du système est essentielle [101]. Ainsi, pour les applications en serre, il est crucial de développer des contrôleurs FLC qui soient polyvalents, précis et économiquement viables [74].

- **Contrôle neuronal**

Les réseaux neuronaux représentent des formes avancées de systèmes informatiques. Composés d'éléments de traitement interconnectés, ils répondent dynamiquement aux stimuli externes. Typiquement, les réseaux neuronaux se structurent en couches de nœuds avec une fonction d'activation. Les données sont introduites via une couche d'entrée, traitées à travers des connexions pondérées, et aboutissent à une couche de sortie qui génère le résultat. Une application notable de cette technologie est celle de Castaneda Miranda et Castano [102], qui ont employé un réseau de neurones à perceptron multicouche (ANN) pour réguler le gel dans une serre, atteignant une précision de prévision des températures de 95%. En horticulture, les réseaux neuronaux offrent l'avantage de la facilité d'implémentation sans nécessiter un

modèle mathématique complexe. Ils sont de puissants estimateurs non linéaires capables de détecter des corrélations complexes entre les variables d'entrée et de sortie [74]. Cependant, cette méthode a ses limites : elle exige une expertise spécifique et un ajustement minutieux des paramètres, avec un risque de surajustement [80].

2.5.4 *Contrôle hybride*

Les algorithmes de contrôle hybrides fusionnent plusieurs méthodes, classiques ou avancées, pour bénéficier de leurs avantages respectifs. Cette approche combine la stabilité des algorithmes classiques avec la rapidité et l'efficacité des algorithmes intelligents [74]. Par exemple, Ding et al. [103] ont développé un réseau neuronal feed-forward à triple couche utilisant la rétropropagation pour le contrôle prédictif du microclimat des serres. Ce système hybride a montré une formation de réseau plus rapide, une meilleure efficacité de convergence et une stabilité accrue. De même, Fourati et al. [104] ont observé que l'utilisation de réseaux neuronaux à plusieurs couches réduisait significativement l'erreur entre les résultats réels et souhaités, comparativement aux systèmes de contrôle neuronal autonomes. Une autre étude a proposé un contrôleur basé sur un Système d'Inférence Neuro-Flou Adaptatif (ANFIS) et un Algorithme Génétique (GA) [105], qui s'est avéré plus précis que le contrôleur Fuzzy Pseudo-Derivative-Feedback (FPDF) traditionnel. Xiao et al. [106] ont combiné un contrôleur PID avec la Dynamique des Fluides Computationnelle (CFD) pour améliorer l'ajustement des paramètres de contrôle selon différents scénarios climatiques. Les contrôles hybrides offrent une meilleure réactivité, précision, robustesse, optimalité et capacité à gérer les perturbations. Néanmoins, leur mise en œuvre peut être complexe et ils héritent des limitations de leurs composants.

2.6 Indicateurs de performance

Pour évaluer la précision d'un modèle de prévision, divers indicateurs clés sont utilisés. Ces indicateurs servent principalement à comparer les prévisions du modèle proposé avec les résultats obtenus via un simulateur. Les métriques statistiques couramment utilisées incluent l'erreur moyenne absolue en pourcentage (MAPE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur de biais moyenne (NMBE) et le coefficient de détermination (R^2). Cependant, la MAPE présente des limites, notamment sa sensibilité aux valeurs extrêmes et indéfinies, ce qui la rend moins fiable. En conséquence, dans ce mémoire, le RMSE, le NMBE et le R^2 seront utilisés pour vérifier que le modèle proposé est correctement calibré. La conformité de ces indicateurs sera évaluée selon les normes établies par des organisations approuvées. Selon la Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (ASHRAE) et le Programme fédéral de gestion de l'énergie (FEMP), les plages de tolérance acceptables pour les données horaires de la température, l'humidité et la concentration CO_2 sont de ± 30 % pour le RMSE et de ± 10 % pour le NMBE.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2}{\sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2}, \quad (2.15)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{y}_t - y_t)^2 \right\}^{1/2}, \quad (2.16)$$

$$NMBE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{y}_t - y_t) \right\} \times 100(\%) \quad (2.17)$$

où \hat{y}_t et y_t représentent respectivement les valeurs prédites et les données réelles de température, d'humidité ou de concentration en CO_2 pour N échantillons à des instants discrets.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, trois catégories de modèles thermo-énergétiques permettant de prévoir avec précision les conditions internes d'une serre ont été explorés ; de telles conditions incluant la température, l'humidité, et la concentration de CO_2 . En raison de la complexité des dynamiques physiques régissant les processus internes et l'environnement de la serre, les modèles boîte grise ont particulièrement retenu notre attention. Ces modèles s'appuient sur des équations d'équilibre énergétique simplifiées et requièrent l'acquisition de données expérimentales pour affiner les paramètres essentiels du modèle. Cette approche nous a guidés dans l'élaboration d'une stratégie de gestion énergétique pour les serres basée sur le contrôle adaptatif. Après avoir réalisé une revue de la littérature sur les différents types de contrôle, notamment les PID, les réseaux neuronaux, le FLC, le contrôle robuste et le MPC, il est apparu que le contrôle adaptatif est le plus approprié pour notre cas d'utilisation. Le contrôle PID, bien que simple et efficace, présente des limitations en termes de gestion des perturbations externes et d'ajustement précis aux dynamiques changeantes. Les réseaux neuronaux et les FLC offrent une bonne capacité d'adaptation mais requièrent des efforts significatifs en termes d'entraînement et de complexité computationnelle. Le contrôle robuste est performant pour les systèmes avec incertitudes mais peut être trop conservateur et moins flexible. Le MPC, bien que très puissant, nécessite des ressources de calcul importantes et une modélisation précise qui peuvent être coûteuses à mettre en œuvre. En comparaison, le contrôle adaptatif offre un bon équilibre entre performance, flexibilité et coût de mise en œuvre. Il permet d'ajuster les paramètres de contrôle en temps réel en réponse aux variations des conditions internes et externes de la serre, assurant ainsi une optimisation continue de l'efficacité énergétique des systèmes de chauffage, de ventilation, d'éclairage, et de déshumidification, tout en tenant compte du signal de prix de l'énergie.

Chapitre 3 – Méthodologie

3.1 Introduction

La serre caractérisée par sa capacité à moduler les variables climatiques internes telles que la température, l'humidité et la concentration de CO_2 grâce à sa structure semi-perméable, se heurte parfois à des situations nécessitant des interventions auxiliaires, telles que le chauffage supplémentaire ou l'éclairage artificiel. Ces interventions sont nécessaires pour maintenir des conditions de croissance optimales des plantes. En conséquence, une approche minutieuse est requise pour comprendre les opérations de la serre, incluant les variables climatiques internes ainsi que les variables météorologiques externes. Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour la construction et la calibration d'un modèle thermo-énergétique d'une serre. Il expose également la formulation d'une stratégie d'optimisation visant à améliorer la gestion de l'énergie au sein de la serre.

3.2 Aperçu général de la méthodologie proposée

Ce travail est basé sur trois phases clés : la modélisation, l'exploitation du modèle, et l'optimisation. La Figure 3.1 illustre le processus de l'approche proposée pour construire un modèle et optimiser la gestion de l'énergie dans une serre. La modélisation commence par la collecte de données issues d'un simulateur open-source [107], comprenant l'énergie consommée par les systèmes de chauffage, de déshumidification, de ventilation et d'éclairage supplémentaire, ainsi que des variables environnementales telles que la température extérieure, l'humidité et le rayonnement solaire. Les données sont nettoyées et divisées en ensembles

d'entraînement (2/3 de la base de données) et de test (1/3 de la base de données). Un modèle approprié est sélectionné et entraîné en utilisant des algorithmes tels que la regression Ridge, avec une validation croisée pour améliorer la robustesse. Les performances du modèle sont évaluées à l'aide de métriques telles que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2). Une fois le modèle élaboré, il est utilisé pour faire des prédictions sur la consommation d'énergie en fonction des variables environnementales et des systèmes de gestion de la serre, permettant d'anticiper les besoins énergétiques. La phase d'optimisation implique la création d'une fonction objectif visant à minimiser les coûts énergétiques tout en maintenant un climat intérieur optimal pour la serre, en ajustant les paramètres des systèmes de gestion de l'énergie. Cette méthodologie, illustrée par la figure 3.1, décrit en détail le processus d'apprentissage, la création du modèle basé sur les données et l'optimisation des paramètres pour une gestion efficace de l'énergie dans une serre.

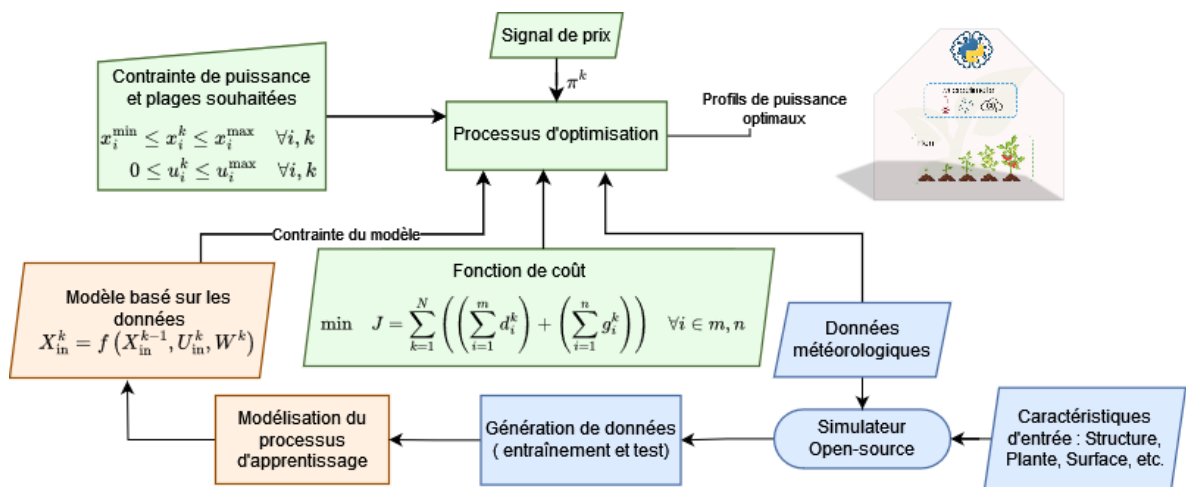


FIGURE 3.1 Vue d'ensemble de la méthodologie proposée.

3.3 Base de données et outil de simulation

3.3.1 Données météorologiques

Les données météorologiques clés utilisées dans ce travail concernent la température externes, l'humidité externe et le rayonnement solaire. Les paramètres météorologiques spé-

cifiques à la ville de Trois-Rivières ont été obtenus à partir du site web [108], Elles sont essentielles car elles fournissent un aperçu détaillé des conditions environnementales dans lesquelles opère la serre. Pour assurer la qualité des données analysées, nous avons mis en place une procédure de traitement des données rigoureuse. Cette méthode commence par l'importation des données brutes, stockées sous forme de fichiers CSV. Ces données sont ensuite converties en objets de type timestamp, optimisant ainsi leur gestion et leur analyse ultérieure. Un aspect clé de notre processus est la capacité à délimiter spécifiquement la période d'analyse en définissant des dates de début et de fin. Une étape essentielle réside dans l'échantillonnage des données à une fréquence personnalisée de 5 minutes, permettant un ajustement fin selon nos exigences. Cette fréquence d'échantillonnage est cruciale pour garantir la précision des analyses temporelles. De plus, pour réduire au maximum les lacunes dues aux données manquantes, une interpolation polynomiale de troisième ordre a été mise en œuvre. Les données météorologiques traitées sont ensuite transmises au simulateur pour la génération d'une base de données. Pour reproduire le comportement thermique d'une serre, la dite base de données doit intégrer la température et l'humidité intérieures de la serre, la concentration de CO_2 , la température et l'humidité ambiantes, l'irradiation solaire, et les énergies consommées par les systèmes de chauffage, de déshumidification, d'éclairage supplémentaire et de ventilation. Plus de 1729 données constituant notre base de donnée ont été générées et les Figure 3.2 et Figure 3.3 représentent un extrait de la base de données utilisée .

Après avoir créé la base de données, nous avons analysé les corrélations entre les différentes variables. La matrice de corrélation Figure 3.4 indique les coefficients de Pearson. Par exemple, il existe une forte corrélation positive (0.92) entre l'énergie consommée par le système de chauffage et la température intérieure de la serre, indiquant que la température augmente avec l'énergie de chauffage utilisée. Inversement, un coefficient de -0.88 entre l'énergie du déshumidificateur et l'humidité interne montre que l'humidité diminue avec l'usage

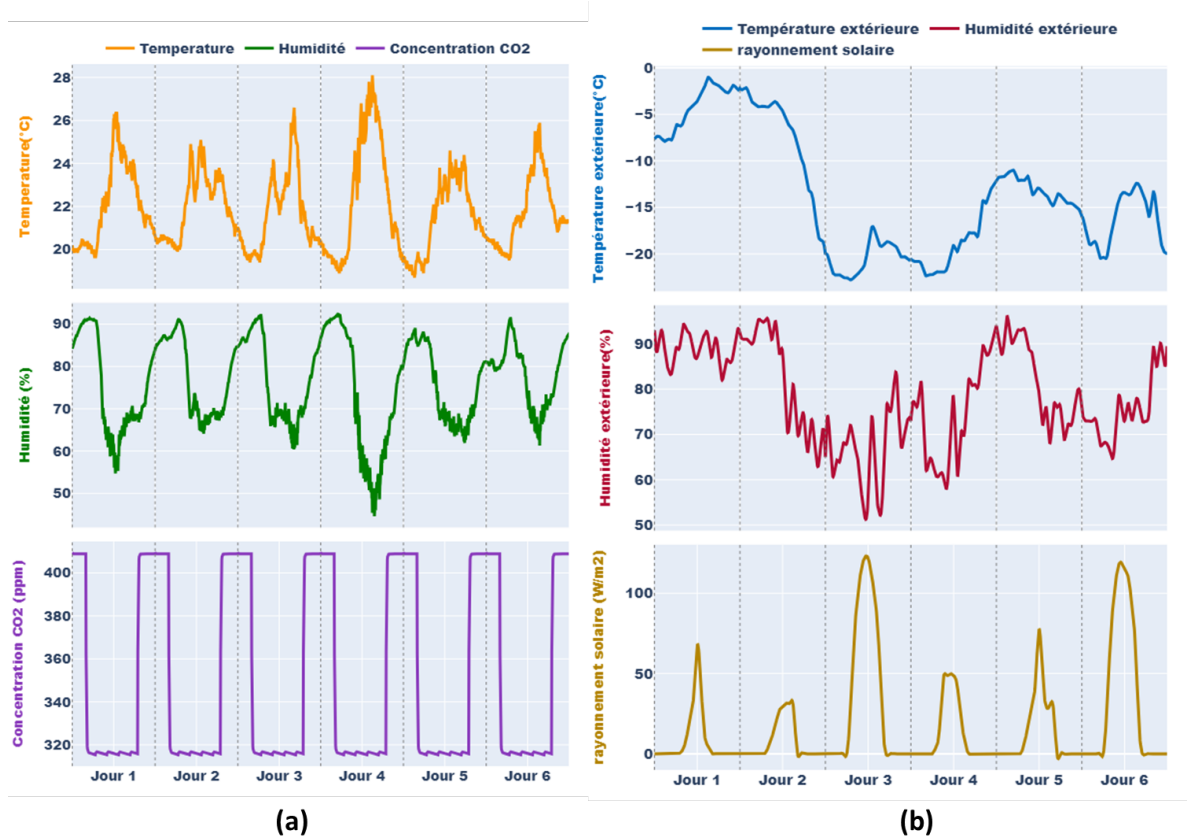


FIGURE 3.2 Paramètres du microclimat à l'intérieur et l'extérieur de la serre citée à Trois-Rivières pour 6 jours en janvier.

du déshumidificateur. Concernant la ventilation et la concentration de CO_2 , bien qu'il existe une corrélation positive, elle n'est pas présentée dans la matrice car l'énergie consommée par le système de ventilation est constante.

Cette forte corrélation entre les variables confirme la fiabilité de la base de données utilisée pour la construction du modèle proposé.

3.3.2 Outil de simulation

Le simulateur open source utilisé dans le cadre de ce mémoire est constitué de quatre éléments : Les systèmes CVAC, les systèmes d'éclairage, la plante et les équations différentielles du microclimat de la serre. Les systèmes CVAC intègrent les systèmes de chauffage, de déshumidification et de ventilation. Les systèmes d'éclairage comprennent l'éclairage naturel

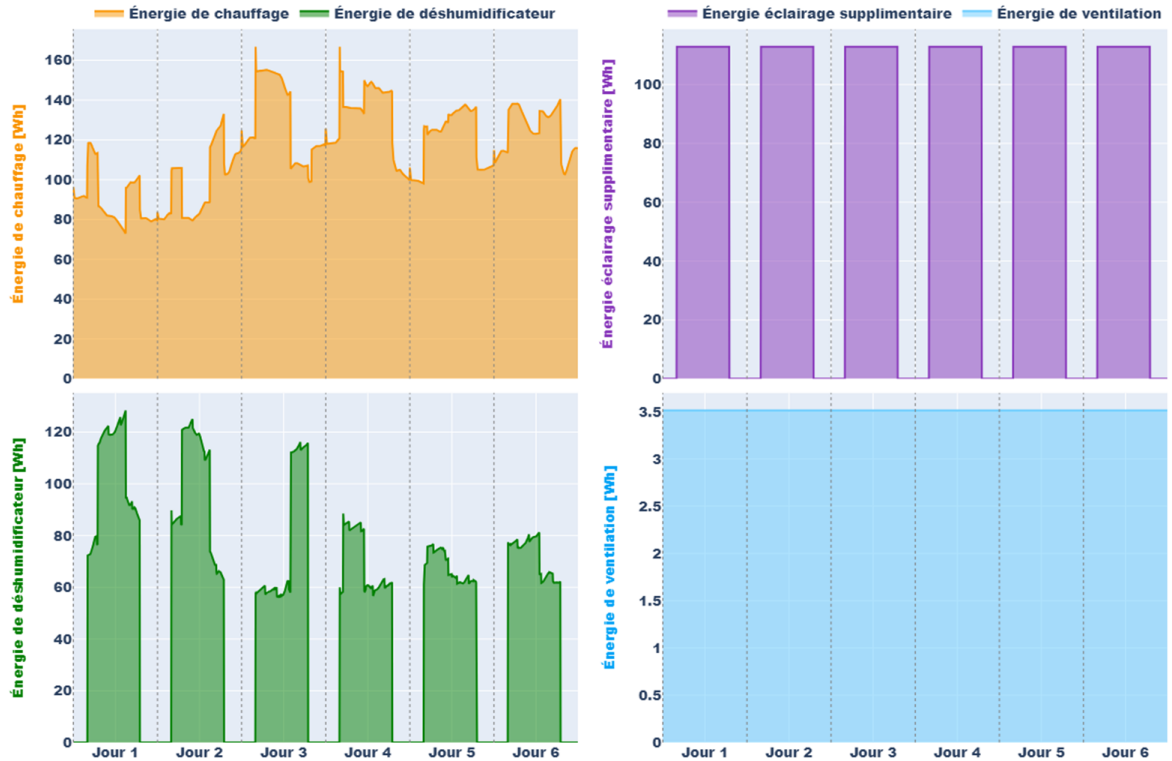


FIGURE 3.3 Énergies consommées au sien de la serre citée a Trois-Rivières pour 6 jours en janvier.

et l'éclairage supplémentaire. Le rôle et le principe de fonctionnement de chaque élément du simulateur ainsi que les énergies consommées par les différents systèmes sont décrits dans cette section.

- Les systèmes CVAC :

- **Systèmes de chauffage :** Le système de chauffage utilisé dans la serre étudiée est constitué d'une pompe à chaleur (Heat Pump) capable de fournir de la chaleur ou de la fraîcheur selon les conditions environnementales optimales et nécessaire pour la croissance des plantes. Ses caractéristiques sont définies par deux paramètres essentiels : l'efficacité de chauffage et l'efficacité de refroidissement. L'efficacité de chauffage de production du chaleur est de $\eta_{\text{heating}} = 22\ 000\ \text{BTU/kWh}$, tandis que l'efficacité de refroidissement est de $\eta_{\text{cooling}} = 24\ 000\ \text{BTU/kWh}$. Ces valeurs définissent la quantité



FIGURE 3.4 Matrice de corrélation entre les variables internes et les systèmes de contrôle.

d'énergie pouvant être fournie par la pompe à chaleur pour chauffer ou refroidir la serre. La pompe à chaleur est activée en fonction des conditions ambiantes et des besoins des plantes. Lorsque la variation de chaleur $u_{\text{heat_change}}$ mesurée à l'intérieur de la serre est supérieure à 0, l'efficacité énergétique de chauffage est utilisée ; tandis que lorsque la variation de chaleur à l'intérieur de la serre est inférieure à 0, c'est l'efficacité énergétique de refroidissement qui est utilisée. L'énergie consommée par la pompe à chaleur dans les deux cas est évaluée par le rapport de la variation de chaleur mesurée en BTU dans la serre et de l'efficacité de chauffage ou de refroidissement tel que défini

par l'équation (3.1).

$$u_{\text{heat}} = \frac{u_{\text{heat_change}}}{\eta}, \quad \begin{cases} \text{si } u_{\text{heat_change}} \geq 0, & \eta = \eta_{\text{heating}} \\ \text{si } u_{\text{heat_change}} < 0, & \eta = \eta_{\text{cooling}} \end{cases} \quad (3.1)$$

u_{heat} , $u_{\text{heat_change}}$ et η représentent respectivement l'énergie consommée (kWh) par le système de chauffage, la variation de chaleur (BTU) dans la serre et l'efficacité du système de chauffage ou de refroidissement en (BTU/kWh).

- **Systèmes de ventilation :** La ventilation joue un rôle essentiel dans la création d'un environnement propice à la croissance des plantes en ajustant la concentration de CO_2 et l'humidité dans la serre. La serre étudiée est équipée d'un ventilateur axial tubulaire *AirFlo* de 12 pouces, capable de générer un débit d'air maximal de $\text{AirFlow}_{\text{Fan}} = 1875$ CFM (pieds cubes par minute) et fonctionnant à une puissance maximale de $\text{MaxPower}_{\text{Fan}} = 0.5$ HP. La performance du ventilateur est déterminée par le volume d'air qu'il déplace en mètres cubes par seconde. Pour les besoins de cette étude, le débit d'air nécessaire à déplacer est considéré constant et égal à $\text{AirFlow}_{\text{GH}} = 0.1$ m³/s. L'énergie consommée par le système de ventilation u_{vent} en (Wh) est calculée en fonction de ce débit d'air, comme donné dans l'équation (3.2).

$$u_{\text{vent}} = \frac{\text{MaxPower}_{\text{Fan}} \times 746 \times (35.315 \times 60)}{\text{AirFlow}_{\text{Fan}} \times \text{AirFlow}_{\text{GH}}} \times t \quad (3.2)$$

- **Systèmes de déshumidification :** La déshumidification est en effet une composante essentielle dans la gestion d'une serre. Elle joue un rôle clé non seulement dans le contrôle de l'humidité de l'air, ce qui est vital pour une croissance saine des plantes, mais aussi dans la prévention des maladies fongiques. La serre étudiée est équipée

d'un déshumidificateur capable de retirer une certaine quantité de vapeur d'eau de l'air ambiant. Il est caractérisé par un facteur d'énergie $\text{Energy}_{\text{factor}} = 2 \text{ L/kWh}$, qui est un indicateur clé de son efficacité énergétique. L'énergie consommée par le système de déshumidification u_{dehum} , exprimée en kWh, est calculée en fonction de la masse d'eau à retirer de l'air, transformée en volume $\text{Volume}_{\text{remove}}$ exprimé en litres (L), comme décrit dans l'équation (3.3).

$$u_{\text{dehum}} = \frac{\text{Energy}_{\text{factor}}}{\text{Volume}_{\text{remove}}} \quad (3.3)$$

- Systèmes d'éclairage

L'ensoleillement naturel et l'éclairage artificiel sont essentiels pour plantes, influençant significativement leur croissance et leur développement. Dans la serre que nous étudions, un système d'éclairage artificiel est installé. Ce système comprend 8 barils ($\text{Barrel}_{\text{count}}$) destinés à la plantation. Chaque baril a une surface ($\text{Barrel}_{\text{surface}}$) de $1,8 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$, soit $2,7 \text{ m}^2$. Le système est équipé de 3 lampes DEL par baril, chacune caractérisée par une efficacité énergétique ($\text{Energy}_{\text{efficiency}}$) de $2,7 \mu\text{mol/J}$ et une puissance maximale ($\text{MaxPower}_{\text{light}}$) de 80 W . La première étape consiste à mesurer le rayonnement photosynthétique actif (PAR) total présent dans la serre pour déterminer s'il répond aux besoins des plantes par rapport au PAR cible. Si le PAR naturel est insuffisant, nous calculons le complément de PAR nécessaire ($\text{PAR}_{\text{supplement}}$). Pour déterminer l'énergie consommée par le système d'éclairage, nous calculons d'abord le PPFD total à compléter ($\text{PPFD}_{\text{supplement}}$) puis utilisons l'équation (3.4) pour l'énergie utilisée par les lampes u_{ligh} :

$$u_{\text{ligh}} = \frac{\text{TotalPPFD}_{\text{supplement}}}{\text{Energy}_{\text{efficiency}}} \quad (3.4)$$

où

$$\text{TotalPPFD}_{\text{supplement}} = \frac{\text{PPFD}_{\text{supplement}} \times \text{Barrel}_{\text{count}}}{\text{Barrel}_{\text{surface}} \times 10^6} \quad (3.5)$$

Cette approche permet une gestion optimale de l'éclairage pour assurer une croissance efficace des plantes tout en minimisant la consommation d'énergie.

- Plante

Dans le cadre de ce mémoire, le simulateur open source utilisé modélise la plante (tomate) comme composant physique au sein de l'écosystème de la serre. Trois fonctions linéaires essentielles sont intégrées dans ce simulateur, chacune jouant un rôle clé dans la représentation des processus biologiques de la plante. Ces fonctions traitent respectivement des propriétés finales de la plante, du taux de photosynthèse spécifique et du taux de transpiration spécifique. L'élément central de ces modèles linéaires est l'intégral d'éclairage journalier DLI, qui est la variable unique utilisée pour déterminer les réponses de la plante.

La première fonction linéaire modélise les propriétés finales de la plante, telles que son poids et sa surface foliaire, en fonction du DLI. Cette approche permet d'évaluer comment l'intensité lumineuse affecte directement la croissance et le développement physique de la plante. La deuxième fonction se concentre sur le taux de photosynthèse spécifique, illustrant comment le DLI influence la capacité de la plante à convertir la lumière en énergie chimique. La troisième fonction, quant à elle, aborde le taux de transpiration spécifique, mettant en lumière la relation entre le DLI et les processus de gestion de l'eau et de régulation thermique de la plante.

L'équation (3.6) donne la forme générale de toutes les fonctions utilisées. La variable DLI est la même pour toutes ces fonctions mais les paramètres a et b donnés dans le tableau

Tableau 3-1 changent selon la fonction calculée.

$$f(\text{DLI}) = a \times \text{DLI} + b \quad (3.6)$$

TABLEAU 3-1 Paramètres de la fonction linéaire pour différentes caractéristiques de croissance des plantes en fonction du DLI.

| f(DLI) | a | b |
|--|----------|----------|
| Poids en (g) | 1.25 | 2.35 |
| Surface foliaire en (cm ²) | 25.4 | 184 |
| Taux de photosynthèse spécifique en ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | 0.706 | 0.115 |
| Taux de transpiration spécifique en ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | 0.101 | 0.472 |

Les paramètres présentés dans le Tableau 3-1 ont été dérivés en utilisant des techniques d'approximation linéaire, fondées sur un ensemble de données empiriques collectées au sein d'une serre opérationnelle. Les figures correspondantes, (3.5a) à (3.5d), illustrent graphiquement les régressions linéaires effectuées pour chacune des variables étudiées : le poids de la plante, la surface foliaire, le taux de photosynthèse spécifique, et le taux de transpiration spécifique.

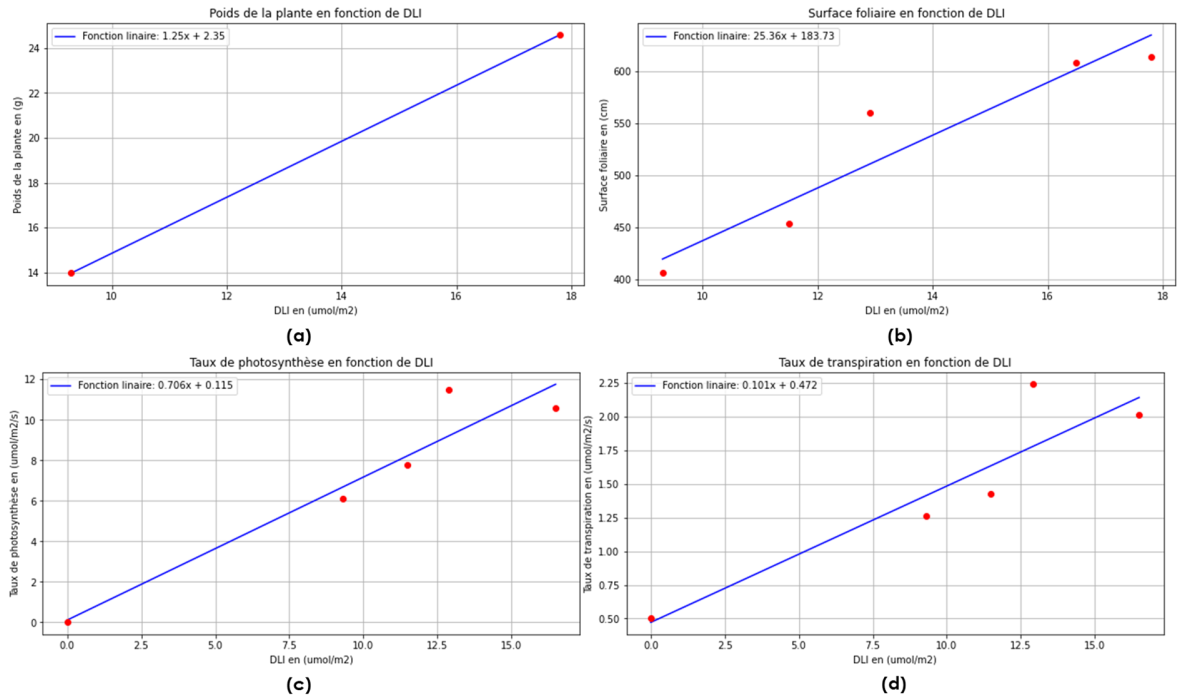


FIGURE 3.5 Caractéristiques spécifiques de la plantes de tomates

- Calculateur des équations différentielles du microclimat de la serre

Tel que décrit dans les travaux de Van Beveren et al. [109], [110], pour évaluer les variations des paramètres essentiels tels que la température, l'humidité et la concentration en CO_2 , le solveur utilise les modèles dynamiques définis par des équations différentielles qui relient ces variables aux énergies mises en œuvre par divers systèmes de contrôle. Ces équations permettent de modéliser de manière précise comment les interventions des systèmes de contrôle, comme le chauffage, la déshumidification et la ventilation, influencent directement l'environnement interne de la serre.

- **Température :** Les variations de la température sont gouvernées par l'équilibre énergétique dans la serre suivant l'équation (3.7).

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{c_{air}} (u_{sun} + u_{lamp} - u_{conv} - u_{trans} - u_{vent} + u_{heat}) \quad (3.7)$$

Où T_{in} désigne la température de l'air à l'intérieur de la serre, tandis que c_{air} représente la capacité thermique spécifique de la serre. u_{sun} fait référence à l'énergie du rayonnement solaire qui pénètre dans la serre, alors que u_{lamp} indique la puissance thermique émise par l'éclairage artificiel. u_{conv} correspond au transfert de chaleur par convection à travers l'enveloppe de la serre, et u_{trans} à la transmission thermique, par exemple, à travers les parois et le toit. u_{vent} représente l'énergie échangée due à la ventilation, soit les pertes ou les gains thermiques liés au renouvellement de l'air. Enfin, u_{heat} reflète la puissance de chauffage ou de refroidissement appliquée pour réguler la température, incluant potentiellement les effets de systèmes comme les pompes à chaleur ou les échangeurs d'air. Le gain de chaleur solaire, u_{sun} , peut être calculé par :

$$u_{sun} = \alpha_{sun} I_{sun} \quad (3.8)$$

où α_{sun} est le coefficient de transmission du matériau de couverture et I_{sun} est la puissance du rayonnement solaire. Le gain de chaleur à travers la couverture, u_{conv} , peut être décrit par :

$$u_{conv} = h_{conv}(T_{in} - T_{out}) \quad (3.9)$$

où h_{conv} est le coefficient de transfert thermique de la couverture, T_{out} est la température extérieure.

Le flux de chaleur de transpiration, u_{trans} , peut être obtenu par :

$$u_{trans} = g_e L (H_{plante} - H_{in}) \quad (3.10)$$

où g_e est la conductance de transpiration, L est la quantité d'énergie nécessaire pour évaporer l'eau d'une feuille. H_{plante} est la concentration absolue de vapeur d'eau au

niveau de la plante. H_{in} est la concentration absolue de vapeur d'eau de l'air de la serre.

H_{plante} peut être calculé par :

$$H_{\text{plante}} = H_{in} + \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{L} \quad (3.11)$$

où H_{in} est la concentration de vapeur saturée. avec H_{in} peut être approximée par :

$$H_{in} = 5.5638e^{0.0572T_{in}} \quad (3.12)$$

g_e est obtenu en utilisant :

$$g_e = \frac{2LAI}{(1 + e^{r_b} r_s)} \quad (3.13)$$

où LAI est l'indice de surface foliaire, e est le rapport du contenu de chaleur latente au contenu de chaleur sensible de l'air saturé. r_b est la résistance de la couche limite, r_s est la résistance stomatique.

- **Humidité relative :** Les variations de l'humidité sont définies par l'équilibre hydrique dans la serre suivant l'équation (3.14)

$$\frac{dH_{in}}{dt} = \frac{1}{h}(H_{\text{trans}} - H_{\text{conv}} - H_{\text{vent}}) \quad (3.14)$$

où H_{in} est la concentration en vapeur de la serre, H_{trans} est la vapeur produite par la transpiration des plantes, H_{conv} est la vapeur de condensation sur la couverture, H_{vent} est le flux de vapeur dû à la ventilation et h est la hauteur moyenne de la serre.

H_{trans} est dépend de H_{plante} et H_{in} , tel que décrit par :

$$H_{\text{trans}} = g_e(H_{\text{plante}} - H_{\text{in}}) \quad (3.15)$$

H_{cov} peut être modélisé par l'équation (3.16) :

$$H_{\text{cov}} = g_c [0.2522e^{0.0485T_{\text{in}}}(T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) + H_{\text{in}}] \quad (3.16)$$

où g_c est la conductance de condensation, et peut être calculée par :

$$g_c = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{\text{in}} \leq T_{\text{out}}, \\ \rho_{g_c}(T_{\text{in}} - T_{\text{cov}})^{1/3} & \text{si } T_{\text{in}} > T_{\text{out}} \end{cases} \quad (3.17)$$

- **Concentration de CO_2 :** Le modèle de concentration de CO_2 basé sur le bilan massique est le suivant :

$$\frac{dC_{\text{in}}}{dt} = \frac{1}{h}(C_{\text{ass}} + C_{\text{vent}}) \quad (3.18)$$

où C_{in} est la concentration de CO_2 à l'intérieur de la serre, C_{ass} est l'assimilation de CO_2 , C_{vent} est les changements de concentration de CO_2 dû à la ventilation. C_{ass} et C_{vent} peuvent être obtenus par :

$$C_{\text{ass}} = 2.2 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{1 + 0.42 \frac{1}{C_{\text{in}}}} (1 - e^{-0.003(u_{\text{sun}} + u_{\text{amp}})}) \right) \quad (3.19)$$

$$C_{\text{vent}} = g_v(C_{\text{in}} - C_{\text{out}}) \quad (3.20)$$

3.4 Modélisation de la Serre

L'environnement de la serre est un système dynamique complexe. Au cours des dernières décennies, les gens ont acquis une compréhension considérable de la dynamique du climat des serres, et de nombreuses méthodes décrivant le processus dynamique du climat des serres ont été proposées. Traditionnellement, il existe deux approches différentes pour le décrire : l'une est basée sur les équations de flux d'énergie et de masse décrivant le processus [111]-[114], et l'autre est basée sur l'analyse des données d'entrée-sortie du processus en utilisant l'approche d'identification de système [115]-[117]. Ce mémoire traite de ce dernier pour parvenir à un modèle climatique intérieur linéaire et discret piloté par les données avec la température de l'air intérieur, l'humidité et les niveaux de CO_2 d'une serre.

3.4.1 Dynamique du climat de la serre

La dynamique du climat d'une serre peut être décrite sous la base des bilans thermique, hydrique et de concentration de CO_2 . Elle peut s'exprimer par l'équation linéaire (3.22) mettant en relation les températures, le taux d'humidité, la concentration de CO_2 , les radiations solaires et certaines énergies consommées dans une serre aux instants k et $k-1$. Moyennant quelques approximations, l'équation (3.22) représente la forme discrète généralisée des équations (3.7), (3.14) et (3.18). Cette formulation discrète s'explique principalement par plusieurs facteurs : d'une part, la forme discrète est facile à implémenter, d'autre part, l'ensemble des données disponibles est de nature discrète, aussi le modèle visant à simuler le comportement d'une serre est destiné à faire des prédictions. La méthode de discrétisation employée pour passer des équations (3.7), (3.14) et (3.18) à la forme générale (3.22) est la méthode explicite d'Euler donnée par (3.21) citée dans [118].

$$\dot{x} \approx \frac{x(k) - x(k-1)}{t_s} \quad (3.21)$$

Où t_s est le temps d'échantillonnage, et $x(k)$ et $x(k - 1)$ sont des valeurs discrètes de $x(t)$.

$$x_{in}^k = Ax_{in}^{k-1} + Bu_{in}^k + Cw^k, \quad (3.22)$$

Avec $x_{in}^k = \{x_i\}_{i=1}^m = \left[T_{in}^k \quad H_{in}^k \quad CO_{2in}^k \right]^T$, Où m est l'indice qui va de 1 à 3. L'énergie consommée dans la serre (chauffage, déshumidification, éclairage supplémentaire et ventilation) est représentée comme $u_{in}^k = \{u_i\}_{i=1}^n = \left[u_{heat}^k \quad u_{fan}^k \quad u_{dehum}^k \quad u_{ligh}^k \right]^T$ avec n allant de 1 à 4. T_{out} , H_{out} et S_r température et humidité extérieure et radiation solaire aux instants k et $k - 1$. A est la matrice d'états ; B la matrice liée aux énergies et C la matrice liée au climat extérieure.

3.4.2 Calibration du modèle : Méthode de régression Ridge

Afin d'identifier les meilleurs coefficients du modèle dynamique de la serre, la régression Ridge a été utilisée pour minimiser l'erreur quadratique entre la base de données et les valeurs prédites par le modèle. Cette approche est formulée dans l'équation (3.23) citée dans [56] :

$$\text{Minimize } J_1 = \left(\sum_{k=1}^N (x_k - \hat{x}_k)^2 + \|A\|_2^2 + \|B\|_2^2 + \|C\|_2^2 \right) \quad (3.23)$$

avec x_k et \hat{x}_k représentent respectivement les valeurs simulées et prédites de la température, de l'humidité, et de la concentration en CO_2 l'intérieur de la serre.

3.5 Optimisation

L'objectif principal de la stratégie d'optimisation proposée est de réduire la consommation d'énergie tout en garantissant un environnement optimal pour les plantes cultivées, en tenant compte des contraintes existantes. Elle fonctionne comme une entité centralisée ayant l'autorité pour déterminer le profil énergétique optimal et programmer en conséquence les

charges flexibles. En conséquence, le défi d'optimisation de la serre est conçu pour répartir intelligemment la consommation d'énergie entre les différents systèmes, dans le but ultime de minimiser la consommation d'énergie globale de la serre.

3.5.1 Formulation du problème d'optimisation

Le problème d'optimisation des serres a été formulé comme une optimisation convexe visant à minimiser les fonctions objectives convexes (inconfort de la plante et coût de l'énergie) sur des ensembles convexes.

- **Confort des plantes**

Le confort des plantes est un aspect essentiel à prendre en compte dans la gestion des serres. L'objectif principal est de maintenir un environnement optimal pour la croissance des plantes tout en minimisant les coûts énergétiques. Ceci est exprimé par $x_{i,sp}^k$ comme les valeurs de consigne et α_i comme un facteur de niveau du confort des plantes. Le niveau de confort de la plante peut être décrit par l'équation (3.24) citée dans [56] :

$$d_i^k = \alpha_i (x_{i,sp}^k - x_i^k)^2, \quad \forall i \in m, \forall k \in \mathbb{N} \quad (3.24)$$

où $x_{i,sp}^k$ représente le niveau de confort souhaité (point de consigne) pour chaque paramètre, y compris la température, l'humidité et la concentration de CO_2 au k^{th} pas de temps.

- **Minimisation du coût énergétique**

Pour minimiser les coûts énergétiques dans une serre, il est nécessaire de tenir compte de la tarification variable. Cela signifie que l'on peut réduire les coûts en planifiant les opérations de manière à utiliser davantage d'énergie pendant les heures où les tarifs sont moins élevés, et moins d'énergie pendant les heures où les tarifs sont plus élevés. Le coût de l'énergie

consommée dans une serre peut être exprimé par l'équation (3.25) citée dans [56] :

$$g_i^k = \pi^k u_i^k, \quad \forall i \in m, \forall k \in \mathbb{N} \quad (3.25)$$

Où π^k est le prix de l'énergie au pas de temps k et u_i^k est l'énergie utilisée. N est un horizon de 24 heures avec un pas de temps de 5 minutes, c'est-à-dire $N = 288$. Le problème d'optimisation convexe formulé dans l'équation (3.26) a été implémenté en utilisant la plateforme *cvxpy* en Python. Pour le résoudre, nous avons utilisé un package d'optimisation numérique, le solveur conique par décomposition [42].

- **Fonction de coût**

Notre objectif est de réduire les coûts d'énergétique tout en veillant au confort optimal de nos plantes dans les serres. Cette contrainte est au cœur de notre stratégie. Elle signifie que nous utilisons l'énergie de manière intelligente. En respectant cette règle, le système utilisé prend des décisions judicieuses pour contrôler le chauffage, la climatisation et l'éclairage de la serre. Donc la fonction de coût peut être formulée de la manière suivante :

$$\text{minimize } J = \sum_{k=1}^N \left(\left(\sum_{i=1}^m d_i^k \right) + \left(\sum_{i=1}^n g_i^k \right) \right) \quad \forall i \in m, n \quad (3.26)$$

$$\text{où } x_{\text{in}}^k = f(x_{\text{in}}^{k-1}, u_{\text{in}}^k, w^k) \quad (3.27)$$

$$0 \leq u_i^k \leq u_i^{\text{max}} \quad \forall i, k \quad (3.28)$$

$$x_i^{\text{min}} \leq x_i^k \leq x_i^{\text{max}} \quad \forall i, k \quad (3.29)$$

Dans l'équation (3.26), d_i^k est une fonction quadratique qui représente le confort climatique des plantes cultivées. De plus, g_i^k mesure le coût de l'énergie consommée par les différents systèmes, y compris le chauffage, la ventilation, la déshumidification et l'éclairage d'appoint.

3.5.2 Contraintes du système

Un ensemble de conditions à respecter doivent être exigées pour garantir le confort des plantes. Ces conditions appelées contraintes peuvent être regroupées en deux catégories : les contraintes liées aux variables environnementales sont appelées contraintes d'états et celle liées aux systèmes de contrôle sont les contraintes d'entrée.

• Contraintes d'état

Les variables d'état telles que la température, l'humidité relative et la concentration de CO_2 doivent être maintenues dans certaines plages de variation pour assurer un meilleur rendement de la serre. Les équations (3.30), (3.31) et (3.32) définissent les contraintes d'état d'une serre.

$$T_{\min} \leq T_{\text{in}} \leq T_{\max} \quad (3.30)$$

$$H_{\min} \leq H_{\text{in}} \leq H_{\max} \quad (3.31)$$

$$C_{\min} \leq C_{\text{in}} \leq C_{\max} \quad (3.32)$$

Où T_{\min} et T_{\max} sont les limites inférieure et supérieure de la température (T_{in}). Et H_{\min} et H_{\max} sont les limites inférieure et supérieure de l'humidité relative (H_{in}). C_{\min} et C_{\max} sont les limites inférieure et supérieure de la concentration de C_{in} .

• Contraintes d'entrée

Les variables de contrôle telles que l'énergie de chauffage, l'énergie de déshumidification et l'énergie de ventilation doivent être aussi maintenues dans des plages appelées contraintes d'entrée d'une serre définies par (3.33), (3.34) et (3.35).

$$u_{\text{heat}}^{\min} \leq u_{\text{heat}} \leq u_{\text{heat}}^{\max} \quad (3.33)$$

$$u_{\text{dehum}}^{\min} \leq u_{\text{dehum}} \leq u_{\text{dehum}}^{\max} \quad (3.34)$$

$$u_{\text{vent}}^{\min} \leq u_{\text{vent}} \leq u_{\text{vent}}^{\max} \quad (3.35)$$

$$u_{\text{ligh}}^{\min} \leq u_{\text{ligh}} \leq u_{\text{ligh}}^{\max} \quad (3.36)$$

Où u_{heat}^{\min} et u_{heat}^{\max} sont les limites inférieure et supérieure de l'énergie de chauffage u_{heat} . Et u_{dehum}^{\min} et u_{dehum}^{\max} sont les limites inférieure et supérieure de l'énergie de déshumidification u_{dehum} . u_{vent}^{\min} et u_{vent}^{\max} sont les limites inférieure et supérieure de l'énergie de ventilation u_{vent} , ainsi u_{ligh}^{\min} et u_{ligh}^{\max} sont les limites inférieure et supérieure de l'énergie de l'éclairage supplémentaire u_{ligh} .

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre un modèle linéaire thermo-énergétique d'une serre piloté par des données synthétiques issues d'un simulateur personnalisé open-source a été construit. Les paramètres environnementaux du microclimat, des énergies consommées par les différents systèmes de contrôle de la serre ainsi que les données météorologique spécifiques, constituant la base de données ont été spécifiquement traitées afin de garantir un ajustement fin selon nos exigences. La méthode ridge regression a été utilisée pour calibrer le modèle. Une stratégie d'optimisation permet de planifier la consommation énergétique d'une serre sur 24 heures prenant en compte deux fonctions objectives, l'une permettant d'optimiser le confort des plante et l'autre permettant de minimiser le coût énergétique a été élaborée en tenant compte le signal de prix et les différentes contraintes.

Chapitre 4 – Étude de cas

4.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude de cas d'une serre située à Trois-Rivières, Québec, Canada. L'objectif principal de cette étude est de valider la méthode de modélisation et de calibration des serres, ainsi que d'évaluer l'efficacité de la technique d'optimisation énergétique proposées dans le chapitre 3. Pour atteindre ces objectifs, nous nous appuyons sur plusieurs hypothèses et paramètres de simulation spécifiques. Les hypothèses incluent la constance des conditions météorologiques et des signaux de prix de l'énergie pendant la période d'analyse. Les simulations, effectuées avec un temps d'échantillonnage de 5 minutes, permettent une résolution fine des dynamiques thermiques et énergétiques de la serre. La période d'analyse couvre 6 jours, durée suffisante pour observer et analyser les variations et l'impact des stratégies de gestion énergétique. Les paramètres de simulation détaillés, présentés dans le Tableau 4-1, incluent les caractéristiques thermiques de la serre, les capacités de chauffage, de ventilation et d'éclairage. Cette étude de cas vise à démontrer la précision de notre approche de modélisation et à valider l'efficacité de la stratégie d'optimisation énergétique développée. En fournissant une description détaillée des hypothèses et des paramètres de simulation, nous contextualisons cette étude de cas et précisons les objectifs spécifiques que nous cherchons à atteindre à travers cette analyse.

4.2 Description de la serre étudiée et la méthode de validation

Cette étude est basée sur une serre située à Trois-Rivières, Québec, Canada. L'analyse tire parti de données synthétiques générées à l'aide d'un simulateur open-source développé en Python. Les coordonnées géographiques (latitude et longitude) et les données météorologiques (température, humidité, rayonnement solaire et vitesse du vent) ont été ajustées pour refléter les conditions spécifiques de Trois-Rivières. Cependant, les caractéristiques de la serre fournies par le simulateur ont été conservées. Ces caractéristiques incluent la surface (15.6 m^2), le volume (42 m^3), le nombre de barils (8), le type de toit (polycarbonate). En ce qui concerne les systèmes de régulation de la serre, les puissances nominales sont les suivantes : 6 kW pour le chauffage, 80 W pour l'éclairage supplémentaire, 370 W pour la ventilation, et 3 kW pour la déshumidification. Dans cette serre dédiée à la plante de tomates, les plages des paramètres de contrôle tels que la température, l'humidité, et la concentration de CO_2 sont spécifiquement définies en tenant compte du confort des plantes tout en visant à optimiser la productivité et la qualité des plantes de tomates en environnement contrôlé. le Tableau 4-1 résume les caractéristiques clés pour la simulation de cette serre.

Dans le but de prévoir efficacement les paramètres de contrôle environnementaux de la serre, notre approche s'est orientée vers l'application d'un modèle de type boîte grise. Ce choix stratégique permet de surmonter les limitations et la complexité souvent rencontrées avec les modèles de type boîte blanche, en particulier lors des phases d'optimisation et de calibration du modèle. Pour l'élaboration et la validation du modèle, un ensemble de données représentatif a été sélectionné, couvrant une période de 8 jours durant l'hiver. Cette période a été divisée en deux phases : une phase d'entraînement de 6 jours, suivie d'une phase de test de 2 jours. Cette segmentation permet d'évaluer l'efficacité du modèle dans des conditions variées et de s'assurer de sa robustesse et de sa fiabilité. L'intervalle d'échantillonnage des

TABLEAU 4-1 Spécifications de la serre

| Propriétés | Valeurs |
|---|---|
| Surface | 15.6 m ² |
| Volume | 42 m ³ |
| Largeur | 6 m |
| Profondeur | 2.6 m |
| Hauteur avant | 2.5 m |
| Hauteur arrière | 3 m |
| Nombre de barils | 6 |
| Plantes par baril | 200 |
| Diamètre du baril | 0.57 m |
| Hauteur du baril | 1.5 m |
| Puissance du rotateur de baril | 10 W |
| Azimut | 180° |
| Type de panneau de toit | Polycarbonate |
| Plante | Tomate |
| Plage de température | [16-28]°C |
| Plage d'humidité | [60-85] % |
| Plage de concentration de CO ₂ | [350-410] ppm |
| Sous-systèmes de contrôle | Chauffage, ventilation, déshumidification et éclairage artificiel |
| Saison | Hiver |
| Position | (46.1°N, -72.0°O) |

données a été fixé à 5 minutes, permettant ainsi de capturer avec précision les fluctuations rapides des paramètres environnementaux et de fournir une granularité de données suffisante pour une modélisation précise.

4.3 Résultats

Cette section présente les résultats de la modélisation et de l'optimisation des paramètres de la serre. D'une part, les résultats issus de la modélisation illustrent la capacité du modèle à anticiper avec précision les paramètres de contrôle environnementaux nécessaires au bon développement des plantes. Ces paramètres incluent des éléments tels que la température, l'humidité, et la concentration de CO_2 . D'autre part, l'optimisation s'est focalisée sur la réduction de la consommation énergétique globale, en particulier durant les heures de forte demande, tout en assurant le maintien des conditions optimales pour le bien-être des plantes.

4.3.1 Modélisation

La validation du modèle de prévision repose sur une comparaison entre les variables prédites (issues du modèle proposé) et celles de la base de données (issues du simulateur). Ces variables sont la température, l'humidité et la concentration de CO_2 à l'intérieur de la serre. Les données ont été subdivisées en deux ensembles : 2/3 pour l'entraînement et 1/3 pour les tests. Des indicateurs de performance, tels que le RMSE (Erreur quadratique moyenne), NMBE (Erreur moyenne de biais normalisé) et R^2 (coefficient de détermination) ont été utilisées pour évaluer la précision du modèle.

La Figure 4.1 illustre la prévision de la température à l'intérieur de la serre durant la phase d'entraînement et de test. Le profil de température prévoit par le modèle est assez proche de celui issu de la base de données. La précision est évaluée à $0.861\text{ }^\circ\text{C}$ avec le RMSE, puis 0.886 avec le R^2 et 0.263 avec le NMBE. Durant la phase de test, les métriques de performance enregistrées sont de $0.801\text{ }^\circ\text{C}$ avec le RMSE et de 0.849 avec le R^2 et 0.302 avec le NMBE.

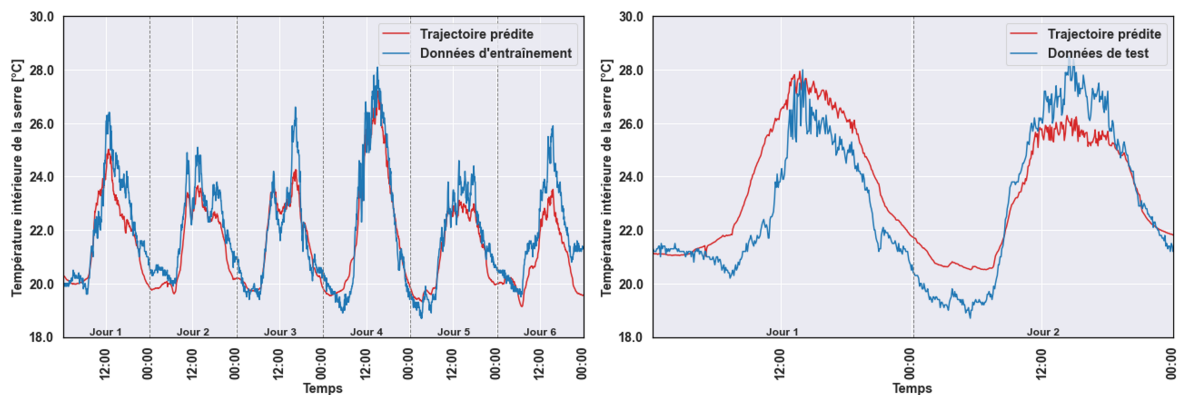


FIGURE 4.1 Température intérieure de la serre pour l'entraînement et test

La Figure Figure 4.2 représente la prévision de l'humidité à l'intérieur de la serre durant la phase d'entraînement et de test. Le profil d'humidité prédite suit de près celui de la base

de données avec une précision évaluée à 0.986 % avec le RMSE et 0.915 avec le R^2 et 0.258 avec le NMBE. Pendant la phase de test, les indicateurs de performances indiquent 1.102 % pour le RMSE, 0.86 pour le R^2 et 0.326 pour le NMBE.

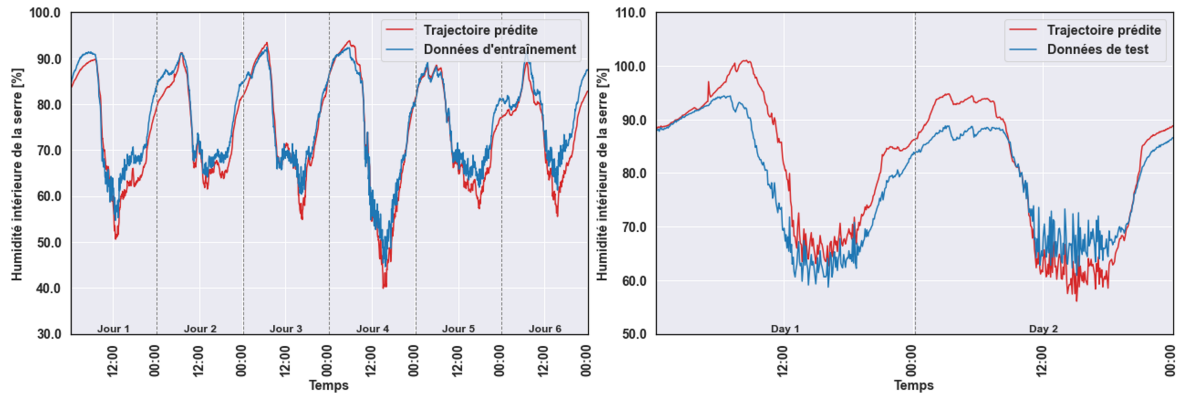


FIGURE 4.2 Humidité intérieure de la serre pour l'entraînement et test

La Figure 4.3 met en évidence le profil prévision de la concentration de CO_2 à l'intérieur de la serre durant la phase d'entraînement et de test. La concentration prédite par le modèle est très proche du profil de concentration de CO_2 issu de la base de données. Pendant la phase d'entraînement, les métriques indiquent une précision de 0.450 ppm avec le RMSE, 0.972 avec le R^2 et 0.27 avec le NMBE. Pour la phase de test, Ces indicateurs sont de 0.567 ppm avec le RMSE, 0.945 avec le R^2 et 0.264 avec le NMBE.

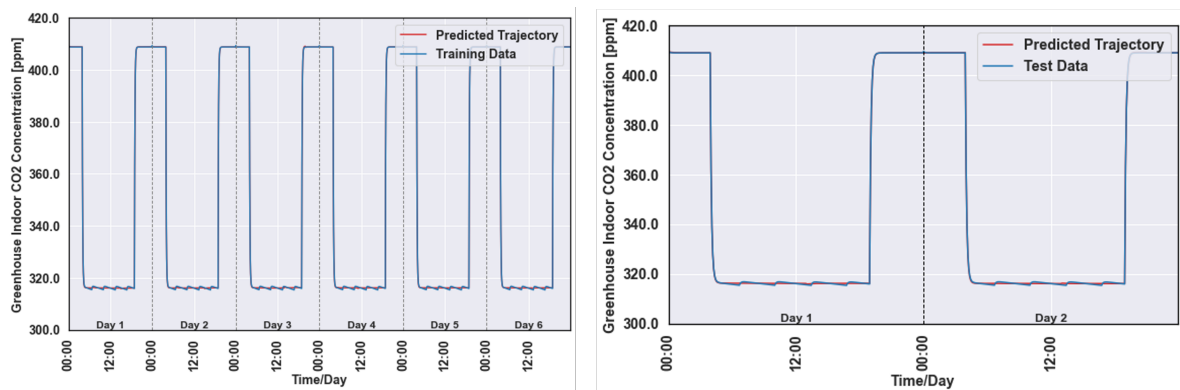


FIGURE 4.3 Concentration de CO_2 intérieure de la serre pour l'entraînement et test

La légère augmentation de la précision indiquée par le RMSE pendant la phase de test, associée à la diminution de la précision indiquée par le R^2 et de manière générale la diminution de précision indiquée par le NMBE, sont conformes aux attentes théoriques cités au chapitre 2. Les valeurs fournies par ces indicateurs de performance (proches de 0 pour le RMSE, se rapprochant de 1 pour le R^2 et proche de 0 pour le NMBE) démontre que notre modèle reproduit la température, l'humidité et la concentration de CO_2 de la base de données avec une précision acceptable. Le Tableau 4-2 résume les performances indiquées par les différentes métriques utilisés.

TABLEAU 4-2 Les métriques utilisées pour les données d'entraînement et de test.

| | Température | | Humidité | | Concentration de CO_2 | |
|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------------------------|-------|
| | Entrainement | Test | Entrainement | Test | Entrainement | Test |
| R^2 | 0.886 | 0.849 | 0.915 | 0.86 | 0.972 | 0.945 |
| RMSE | 0.861 | 0.801 | 0.986 | 1.102 | 0.450 | 0.323 |
| NMBE | 0.263 | 0.302 | 0.258 | 0.326 | 0.27 | 0.264 |

4.3.2 Optimisation

La Figure 4.4 présente le résultat de l'optimisation développée à l'aide de la plateforme *cvxpy* en Python [42], soulignant l'utilisation stratégique de la flexibilité pour optimiser la consommation d'énergie tout en maintenant les performances des sous-systèmes. Un profil de consommation de l'agrégat d'énergie sur 24 heures dans une serre dominée par les systèmes de chauffage et de déshumidification. La ligne en pointillé représente les fluctuations quotidiennes du signal de prix de l'énergie. La ligne bleue indique le profil de consommation d'énergie résultant de l'application d'un point de consigne fixe pour les paramètres de la serre (une température de $22^\circ C$, une humidité de 75 % et une concentration de CO_2 de 380 ppm), tandis que la ligne rouge présente le profil de consommation d'énergie lors de l'utilisation d'une plage souhaitée pour ces variables, comme fixé dans le Tableau 4-1. Cette comparaison montre que l'adoption d'un seul point de consigne entraîne une consommation d'énergie

plus élevée que l'utilisation d'une plage de variables souhaitées. L'approche de gestion de la demande d'énergie qui en résulte s'avère particulièrement efficace pendant les périodes de pointe, soit de 6 h à 9 h le matin et de 16 h à 20 h le soir [119], ce qui permet de réaliser d'importantes économies sur les coûts énergétiques tout en maintenant les conditions intérieures dans des limites acceptables pour la culture de tomates dans une serre. Notamment, le signal de prix est généré en fonction de l'option d'électricité additionnelle pour la culture de végétaux fournie par Hydro-Québec [120], c'est-à-dire que pendant les périodes de pointe, le prix sera de 55,345 ($\text{¢}/kWh$) et pendant les périodes creuses, il demeurera à 5,984 ($\text{¢}/kWh$).

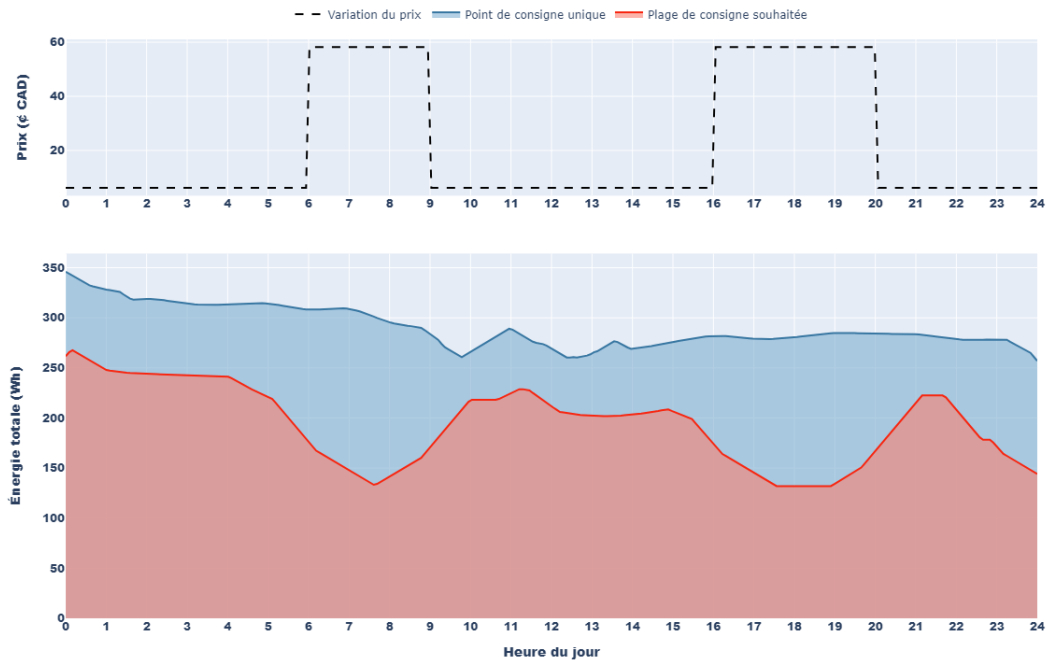


FIGURE 4.4 Profil énergétique agrégé de la serre pour une journée, basé sur un signal de prix avec un point de consigne unique et une plage souhaitée

La Figure 4.5(a) illustre le contrôle du climat interne d'une serre au moyen d'une stratégie d'optimisation énergétique, où la température, l'humidité et la concentration de CO_2 sont ajustées en fonction des signaux de prix de l'énergie. Cela témoigne d'une gestion de

l'énergie qui favorise le confort de la plante sans négliger les coûts. En outre, les pics de consommation d'énergie pendant les heures creuses, de minuit à 3 heures du matin et de 5 heures à 6 heures du matin, préparent le système aux heures de pointe. Par ailleurs, les pics de consommation entre 10 heures et midi, et entre 20 heures et 22 heures, compensent le manque d'énergie nécessaire pour soutenir la photosynthèse et la croissance des plantes pendant les périodes tarifaires intermédiaires et basses. Pendant les heures de pointe, la consommation globale d'énergie est réduite grâce à un ajustement précis des niveaux variables tout en les maintenant dans la fourchette souhaitée pour la culture des tomates, ce qui souligne la précision du contrôle climatique et l'importance d'adapter la consommation à la tarification variable de l'énergie.

La Figure 4.5(b) montre comment le facteur de confort α_i peut influencer les conditions climatiques internes par le biais d'une série de simulations. Les courbes de différentes couleurs - orange pour la température, violet pour l'humidité et vert pour la concentration de CO_2 - illustrent l'impact de l'ajustement de ce facteur de confort sur les variables internes. Une augmentation du poids incite l'optimiseur à rechercher un niveau de confort plus élevé, ce qui entraîne une augmentation des valeurs des variables et, par conséquent, une augmentation de la consommation d'énergie. Les résultats confirment l'efficacité de l'approche proposée pour moduler la consommation d'énergie dans le cadre de l'optimisation en tenant compte du signal de prix. Cette capacité d'adaptation à des conditions fluctuantes souligne la capacité de la méthode proposée à optimiser l'utilisation de l'énergie dans une serre.

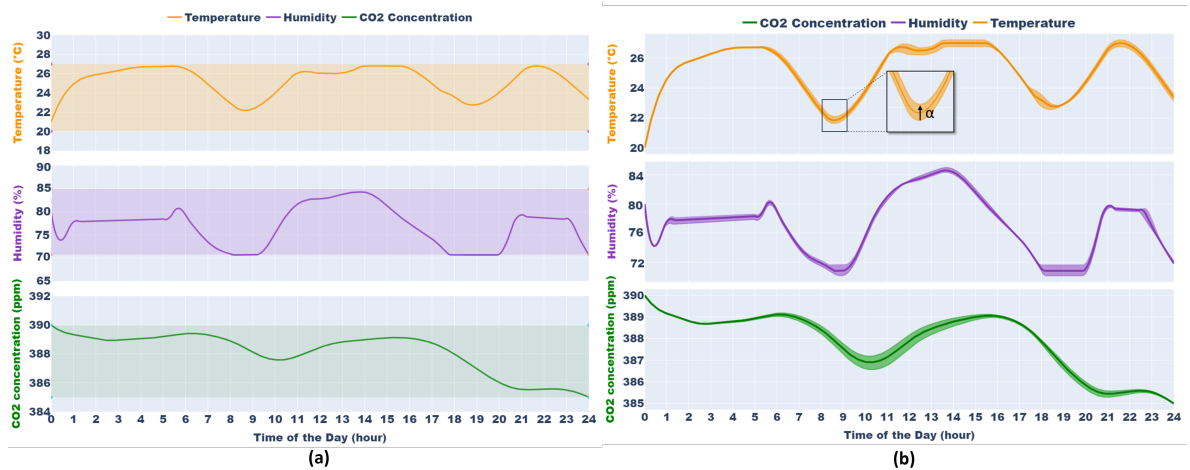


FIGURE 4.5 (a) Profil de température, d'humidité et de concentration de CO_2 avec une seule valeur de α . (b) Profil de température, d'humidité et de concentration de CO_2 avec différents niveaux de confort α_i .

4.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exposé les résultats obtenus dans le cadre de la modélisation et de l'optimisation de la gestion énergétique pour une serre située à Trois-Rivières. L'analyse des performances à travers trois indicateurs clés révèle une correspondance étroite entre les prévisions de notre modèle concernant la température, l'humidité, et la concentration de CO_2 , et les données synthétiques issues d'un simulateur, attestant ainsi de la précision du modèle proposé. Par ailleurs, nous avons validé l'efficacité de notre stratégie d'optimisation qui vise à planifier la consommation d'énergie sur une période de 24 heures en prenant en compte le modèle de la serre, les données météorologiques et la variation du signal de prix. Cette méthode s'avère particulièrement performante durant les heures de pointes, notamment de 6h à 9h et de 16h à 20h, grâce à une gestion adaptative des paramètres de contrôle.

Chapitre 5 – Conclusion

Cette étude a démontré l'efficacité de la stratégie proposée pour l'optimisation énergétique des serres en climats froids. En intégrant un modèle thermo-énergétique calibré avec des données réelles, une gestion dynamique des systèmes de chauffage, de ventilation, d'éclairage et de déshumidification, et en tenant compte des signaux de prix de l'énergie, nous avons réalisé une amélioration significative de l'efficacité énergétique et une réduction notable des coûts opérationnels.

L'application pratique de cette approche à une serre située à Trois-Rivières, Québec, a confirmé son utilité. Grâce à notre stratégie, les coûts opérationnels ont été réduits de 46,4 %, passant de 39,2 centimes à 21 centimes par jour. Les ajustements réalisés en fonction des tarifs de l'énergie sur un horizon de prévision de 24 heures ont permis d'éviter les périodes de tarification élevée. De plus, en intégrant le confort climatique des plantes dans la fonction de coût, nous avons maintenu des conditions optimales pour la croissance tout en optimisant l'utilisation de l'énergie.

Ces résultats montrent que notre stratégie peut être un outil précieux pour les serres situées dans des régions à climat froid, offrant une flexibilité opérationnelle et une réponse efficace aux variations des prix de l'énergie. En somme, ce travail contribue à une gestion énergétique plus durable et économique des serres agricoles, apportant des bénéfices tangibles tant sur le plan environnemental qu'économique.

5.1 Contributions principales

Comme mentionné dans la revue de littérature, l'optimisation de la consommation énergétique dans une serre a déjà fait l'objet de plusieurs études. Toutefois, ces études se sont principalement concentrées sur le coût de l'énergie consommée pour le contrôle des serres, négligeant les implications financières de la ventilation, de la déshumidification et des systèmes d'éclairage supplémentaires, qui constituent une part importante des coûts de production. En outre, ces études n'ont pas pris en compte le tarif en fonction de l'heure d'utilisation (TOU), un facteur essentiel dans l'évaluation des coûts d'exploitation. Un moyen efficace d'améliorer la technique d'optimisation de la consommation d'énergie dans une serre est de prendre en compte simultanément tous les facteurs impliqués dans sa dynamique thermique. Ce mémoire formule un problème d'optimisation tenant compte du modèle thermique de la serre, de l'utilisation de l'énergie et des conditions météorologiques afin d'améliorer l'efficacité énergétique des serres agricoles et de réaliser des économies d'énergie. Les contributions importantes de cette étude peuvent être classées comme suit :

- Proposition d'un mécanisme pour la construction et la calibration d'un modèle thermo-énergétique d'une serre à partir d'une approche guidée par les données.
- Proposition d'une stratégie de gestion de l'énergie dans les serres, se concentrant sur l'optimisation de l'utilisation des systèmes de chauffage, de ventilation, d'éclairage et de déshumidification en fonction des signaux de prix.
- Analyse de la flexibilité des opérations de la serre, en particulier en termes de réponse dynamique, tout en tenant compte des besoins des plantes en matière de climat intérieur.

5.2 Limites

Plusieurs difficultés ont été rencontrées pendant ce travail. Toutefois, quelques considérations et hypothèses ont été adoptées pour circonscrire le cadre de ce travail.

- **Hypothèse sur les données :** À défaut d’avoir des données d’une serre réelle, les données utilisées dans ce travail sont générées par un simulateur open-source. Certains paramètres du simulateur ont été ajustés pour refléter le comportement d’une serre réelle installée à Trois-Rivières.
- **Hypothèse sur le flux d’air :** Pour réduire la complexité de la modélisation dynamique du climat de la serre, le flux d’air au sein de la serre a été considéré constant. Un flux d’air variable impacte les équations de variation de tous les paramètres de contrôle analysés dans cette étude.
- **Profil de prix :** L’efficacité de la stratégie d’optimisation proposée a été démontrée en tenant compte d’un profil de prix, conçu sur la base de l’option d’électricité additionnelle pour l’éclairage de photosynthèse ou le chauffage des espaces destinés à la culture de végétaux. Cette option stipule que le prix de l’électricité soit élevé pendant les périodes de pointe qui durent en moyenne 5 heures pendant les pointes du matin et du soir.

5.3 Perspectives

Pour améliorer ce travail, les recommandations suivantes pourraient être envisagées :

- **Scénario décentralisé :** L’implémentation d’un scénario décentralisé pour chaque sous-système à l’intérieur de la serre pourrait présenter un intérêt potentiel. En gérant indépendamment le chauffage, la ventilation, l’éclairage et la déshumidification, il serait possible de répondre plus précisément aux besoins spécifiques de chaque zone de la

serre, augmentant ainsi l'efficacité globale du système.

- **Intégration de nouveaux paramètres :** Le mécanisme de construction du modèle pourrait être amélioré en intégrant des paramètres tels que l'intensité lumineuse et un système d'injection de CO_2 . L'ajout de ces paramètres permettrait de mieux contrôler les conditions de croissance des plantes, optimisant encore davantage l'utilisation de l'énergie et améliorant la qualité et le rendement des cultures.
- **Extension de la période de prédiction :** Étendre la période de prédiction à un an, au lieu de deux jours, permettrait de démontrer plus clairement les bénéfices à long terme de la stratégie d'optimisation énergétique proposée. Cela fournirait une vision plus complète des économies d'énergie potentielles et des impacts sur les coûts opérationnels tout au long de l'année.
- **Système de stockage thermique :** La mise en œuvre d'un système de stockage thermique pourrait mitiger la nature interruptible de l'option d'électricité additionnelle applicable aux cultures maraîchères. En stockant l'excès d'énergie pendant les périodes de faible demande et en le libérant pendant les périodes de pointe, il serait possible de lisser la demande en énergie, réduisant ainsi les coûts et les émissions de gaz à effet de serre.

Références

- [1] Statistique Canada, *Recensement de l'agriculture de 2021 du Canada : Une histoire sur la transformation de l'industrie agricole et l'adaptabilité des exploitants agricoles canadiens*, 2023.
- [2] N. Asgari, M. T. McDonald et J. M. Pearce, « Energy Modeling and Techno-Economic Feasibility Analysis of Greenhouses for Tomato Cultivation Utilizing the Waste Heat of Cryptocurrency Miners, » *Energies*, t. 16, n° 3, 2023, ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en16031331. adresse : <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1331>.
- [3] M. Z. Haron et R. A. Jalil, « Food Insecurity During COVID-19 : A Neglected Priority ? » *IIUM Medical Journal Malaysia*, t. 22, n° 2, 2023, ISSN : 2735-2285.
- [4] *Culture des légumes de champ | Gouvernement du Québec*. adresse : <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles/culture-legumes-champ>.
- [5] A. Vadiée et V. Martin, « Energy management strategies for commercial greenhouses, » *Applied Energy*, t. 114, p. 880-888, 2014, ISSN : 0306-2619. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.089>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913007332>.
- [6] S. Zhang, Y. Guo, H. Zhao, Y. Wang, D. Chow et Y. Fang, « Methodologies of control strategies for improving energy efficiency in agricultural greenhouses, » *Journal of Cleaner Production*, t. 274, p. 122 695, 2020, ISSN : 0959-6526. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122695>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620327426>.
- [7] Gouvernement du Québec, *Culture des fruits et légumes de serre (serriculture)*, 2023.
- [8] D. Lin, L. Zhang et X. Xia, « Model predictive control of a Venlo-type greenhouse system considering electrical energy, water and carbon dioxide consumption, » *Applied Energy*, t. 298, p. 117 163, 2021, ISSN : 0306-2619. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117163>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921005973>.
- [9] C. Maraveas, C.-S. Karavas, D. Loukatos, T. Bartzanas, K. G. Arvanitis et E. Symeonaki, « Agricultural Greenhouses : Resource Management Technologies and Perspectives for Zero Greenhouse Gas Emissions, » *Agriculture*, t. 13, n° 7, 2023, ISSN : 2077-0472. DOI : 10.3390/agriculture13071464. adresse : <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/7/1464>.

- [10] F. Pelletier et S. Godbout, « Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre en production serricole au Québec, » *Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement. Québec, Projet IRDA*, t. 400023, p. 36, 2017.
- [11] J. A. Fox, P. Adriaanse et N. T. Stacey, « Greenhouse energy management : The thermal interaction of greenhouses with the ground, » *Journal of Cleaner Production*, t. 235, p. 288-296, 2019, ISSN : 0959-6526. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.344>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619323212>.
- [12] G. Smolka, E. Kosatica, M. Berger, M. Kissinger, D. Fridman et T. Koellner, « Domestic water versus imported virtual blue water for agricultural production : A comparison based on energy consumption and related greenhouse gas emissions, » *Journal of Industrial Ecology*, t. 27, n° 4, p. 1123-1136, 2023. DOI : <https://doi.org/10.1111/jiec.13403>. adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.13403>.
- [13] E. J. Van Henten et J. Bontsema, « Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management, » *Control Engineering Practice*, t. 17, n° 1, p. 88-96, 2009, ISSN : 0967-0661. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.05.008>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066108001019>.
- [14] M. C. Bozchalui, C. A. Cañizares et K. Bhattacharya, « Optimal Energy Management of Greenhouses in Smart Grids, » *IEEE Transactions on Smart Grid*, t. 6, n° 2, p. 827-835, 2015. DOI : [10.1109/TSG.2014.2372812](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2372812).
- [15] Y. Shen, R. Wei et L. Xu, « Energy Consumption Prediction of a Greenhouse and Optimization of Daily Average Temperature, » *Energies*, t. 11, n° 1, 2018, ISSN : 1996-1073. DOI : [10.3390/en11010065](https://doi.org/10.3390/en11010065). adresse : <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/65>.
- [16] D. Lin, L. Zhang et X. Xia, « Hierarchical model predictive control of Venlo-type greenhouse climate for improving energy efficiency and reducing operating cost, » *Journal of Cleaner Production*, t. 264, p. 121 513, 2020, ISSN : 0959-6526. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121513>.
- [17] D. Katzin, E. J. van Henten et S. van Mourik, « Process-based greenhouse climate models : Genealogy, current status, and future directions, » *Agricultural Systems*, t. 198, p. 103 388, 2022, ISSN : 0308-521X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103388>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X22000245>.
- [18] Gouvernement du Québec, *Culture des fruits et légumes de serre (serriculture)*, 2023.
- [19] Y. Su, L. Xu et E. D. Goodman, « Greenhouse climate fuzzy adaptive control considering energy saving, » *International Journal of Control, Automation and Systems*, t. 15, n° 4, p. 1936-1948, 2017, ISSN : 2005-4092. DOI : [10.1007/s12555-016-0220-6](https://doi.org/10.1007/s12555-016-0220-6). adresse : <https://doi.org/10.1007/s12555-016-0220-6>.

- [20] MAPAQ, « Portrait-diagnostique sectoriel des légumes de serre au Québec, » Ministère de l'agriculture des pêches et de l'alimentation du Québec, Quebec, rapp. tech., 2018.
- [21] R. Tesi et al., *Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo*. MUNDI-PRENSA LIBROS, SA, 2001, t. pp. 1-288.
- [22] T. Lalonde, « Développement d'un modèle calibré pour la simulation énergétique de serres et analyse des résultats à l'aide d'indicateurs de performance, » thèse de doct., École de technologie supérieure, 2022.
- [23] J. L. Hatfield et J. H. Prueger, « Temperature extremes : Effect on plant growth and development, » *Weather and Climate Extremes*, t. 10, p. 4-10, 2015, ISSN : 2212-0947. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094715300116>.
- [24] S. Sato, M. M. Peet et J. Thomas, « Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress, » *Plant Cell and Environment - PLANT CELL ENVIRON*, t. 23, p. 719-726, fév. 2000. DOI : 10.1046/j.1365-3040.2000.00589.x.
- [25] J. F. Bierhuizen, J. L. Ebbens et N. C. A. Koomen, « Effects of temperature and radiation on lettuce growing., » *Netherlands Journal of Agricultural Science*, t. 21, n° 2, p. 110-116, 1973, ISSN : 0028-2928.
- [26] N. Castilla, *Greenhouse technology and management*. Cabi, 2013.
- [27] E. M. Nederhoff, *Effects of CO2 concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops*. Wageningen University et Research, 1994.
- [28] J. J. Hanan, *Greenhouses : Advanced technology for protected horticulture*. CRC press, 2017, ISBN : 0203719824.
- [29] H. F. De Zwart, « Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model, » thèse de doct., Wageningen University et Research, 1996.
- [30] E. Van Henten, « Greenhouse climate management : an optimal control approach, » thèse de doct., Wageningen University et Research, 1994.
- [31] G. Van Straten et E. J. Van Henten, « Optimal greenhouse cultivation control : survey and perspectives, » *IFAC Proceedings Volumes*, t. 43, n° 26, p. 18-33, 2010, ISSN : 1474-6670.
- [32] C. Stanghellini, B. Van't Ooster et E. Heuvelink, « Greenhouse horticulture : Technology for optimal crop production, » in *Greenhouse horticulture*, Wageningen Academic, 2019, ISBN : 9086863299.
- [33] A. A. M. Ameen, R. S. Abdulhusein et H. A. Y. Suhair, « Equivalent Distribution of Natural and Artificial Lighting in the Interior Space, » *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, t. 1094, n° 1, p. 12 093, fév. 2021. DOI : 10.1088/1757-899X/1094/1/012093. adresse : <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012093>.

- [34] N. Katsoulas et C. Stanghellini, « Modelling Crop Transpiration in Greenhouses : Different Models for Different Applications, » *Agronomy*, t. 9, n° 7, 2019, ISSN : 2073-4395. DOI : 10 . 3390 / agronomy9070392. adresse : <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/7/392>.
- [35] J. L. Monteith, « Evaporation and environment, » in *Symposia of the society for experimental biology*, 1965 : Cambridge University Press (CUP) Cambridge.
- [36] C. Stanghellini, *Transpiration of greenhouse crops : an aid to climate management*. Wageningen University et Research, 1987.
- [37] P. G. Jarvis, J. L. Monteith et P. E. Weatherley, « 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*, t. 273, n° 927, p. 593-610, 1976. DOI : 10 . 1098 / rstb . 1976 . 0035. adresse : <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rstb.1976.0035>.
- [38] F. Villarreal-Guerrero, M. Kacira, E. Fitz-Rodríguez et al., « Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging, » *Scientia Horticulturae*, t. 134, p. 210-221, 2012, ISSN : 0304-4238. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.10.016>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423811005425>.
- [39] B. W. Klein S.A Duffie J.A, *TRNSYS 18 : A Transient System Simulation Program*. Madison : USA : Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin., 2017.
- [40] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, C. O. Pedersen et F. C. Winkelmann, « EnergyPlus : Energy simulation program, » *Ashrae Journal*, t. 42, p. 49-56, 2000. adresse : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110792695>.
- [41] L. Zhang, « Simulation Analysis of Built Environment Based on Design Builder Software, » in *Advances in Civil and Industrial Engineering IV*, sér. Applied Mechanics and Materials, t. 580, Trans Tech Publications Ltd, fév. 2014, p. 3134-3137. DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.3134.
- [42] L. Boyd Stephen P Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.
- [43] Q. Altes-Buch, S. Quoilin et V. Lemort, « Greenhouses : A Modelica Library for the Simulation of Greenhouse Climate and Energy Systems, » fév. 2019, p. 533-542. DOI : 10 . 3384 / ecp19157533.
- [44] G. W. Larson et R. Shakespeare, *Rendering with Radiance : the art and science of lighting visualization*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998.
- [45] H. E. Feustel, « COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model, » *Energy and Buildings*, t. 30, n° 1, p. 3-18, 1999, ISSN : 0378-7788. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00043-7). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778898000437>.

- [46] M. Royapoor, J. Rieradevall, J. Montero, E. Lopez-Capel et A. Nadal, « Building-Integrated Rooftop Greenhouses : An Energy and Environmental Assessment in the Mediterranean Context, » *Applied Energy*, t. 187C, p. 338-351, fév. 2016. DOI : 10 . 1016/j.apenergy.2016.11.051.
- [47] M. Kovac et K. Kovacova, « Using designbuilder to analyse the indoor environment in greenhouse, » *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM*, t. 2, n° Surveying Geology \& Mining Ecology Management (SGEM), p. 787-793, 2016.
- [48] T. P. McDowell, D. E. Bradley, M. Hiller, J. Lam, J. Merk et W. Keilholz, « TRN-SYS 18 : The Continued Evolution of the Software, » *Building Simulation Conference Proceedings*, 2017. adresse : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:201051273>.
- [49] A. Haas, A. Weber, V. Dorer, W. Keilholz et R. Pelletret, « COMIS v3.1 simulation environment for multizone air flow and pollutant transport modelling, » *Energy and Buildings*, t. 34, p. 873-882, fév. 2002. DOI : 10 . 1016/S0378-7788(02)00062-2.
- [50] D. Crawley, J. Hand, M. Kummert et B. Griffith, « Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs, » *Building and Environment*, t. 43, p. 661-673, fév. 2008. DOI : 10 . 1016/j.buildenv.2006.10.027.
- [51] M. Wetter, « Multizone Airflow Model in Modelica, » 2006. adresse : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55674564>.
- [52] M. Wetter, « A Modelica-based Model Library for Building Energy and Control Systems, » fév. 2009.
- [53] M. Wetter, W. Zuo, T. Nouidui et X. Pang, « Modelica Buildings library, » *Journal of Building Performance Simulation*, t. 7, fév. 2014. DOI : 10 . 1080/19401493 . 2013.765506.
- [54] A. Sodja et B. Zupančič, « Integration of Thermal Dynamics and Lighting in Buildings with Object Oriented Multi-domain Approach, » *Computational Intelligence, Modelling and Simulation, International Conference on*, t. 0, p. 98-103, fév. 2009.
- [55] M. Wetter, « BuildOpt - A new building energy simulation program that is built on smooth models, » *Building and Environment - BLDG ENVIRON*, t. 40, p. 1085-1092, fév. 2005. DOI : 10 . 1016/j.buildenv.2004.10.003.
- [56] F. Etedadi, S. Kelouwani, K. Agbossou, N. Henao et F. Laurencelle, « Consensus and sharing based distributed coordination of home energy management systems with demand response enabled baseboard heaters, » *Applied Energy*, t. 336, p. 120 833, avr. 2023, ISSN : 03062619. DOI : 10 . 1016/j.apenergy.2023.120833. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261923001976>.

- [57] E. Iddio, L. Wang, Y. Thomas, G. McMorrow et A. Denzer, « Energy efficient operation and modeling for greenhouses : A literature review, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 117, p. 109480, 2020, ISSN : 1364-0321. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119306884>.
- [58] F. Golzar, N. Heeren, S. Hellweg et R. Roshandel, « A novel integrated framework to evaluate greenhouse energy demand and crop yield production, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 96, p. 487-501, nov. 2018, ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/J.RSER.2018.06.046.
- [59] J. Javadi Moghaddam, G. Zarei, D. Momeni et H. Faridi, « Non-linear control model for use in greenhouse climate control systems, » *Research in Agricultural Engineering*, t. 68, n° 1, p. 9-17, 2022, ISSN : 12129151. adresse : <https://rae.agriculturejournals.cz/artkey/rae-202201-0002.php%20http://dx.doi.org/10.17221/37/2021-RAE>.
- [60] G. Bot, *Greenhouse Climate : From Physical Processes to a Dynamic Model*. Landbouwhogeschool te Wageningen, 1983.
- [61] C. H. M. Van Bavel, J. Damagnez et E. J. Sadler, « The fluid-roof solar greenhouse : energy budget analysis by simulation, » *Agricultural Meteorology*, t. 23, p. 61-76, 1981, ISSN : 0002-1571. DOI : [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90091-1](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90091-1). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0002157181900911>.
- [62] T. Takakura, A. Jordan et K. L. L. Boyd, « Dynamic Simulation of Plant Growth and Environment in the Greenhouse, » *Transactions of the ASAE*, t. 14, n° 5, p. 964-971, 1971, ISSN : 0001-2351. DOI : <https://doi.org/10.13031/2013.38432>. adresse : <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=38432&t=3>.
- [63] S. M. Gharghory, « Deep Network based on Long Short-Term Memory for Time Series Prediction of Microclimate Data inside the Greenhouse, » *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, t. 19, n° 02, p. 2050013, juin 2020, ISSN : 1469-0268. DOI : 10.1142/S1469026820500133. adresse : <https://doi.org/10.1142/S1469026820500133>.
- [64] M. Guesbaya et H. Megherbi, « Thermal Modeling and Prediction of Soilless Greenhouse in Arid Region Based on Particle Swarm Optimization. Experimentally Validated, » in *2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, 2019, p. 1-6. DOI : 10.1109/ICAEE47123.2019.9015190.
- [65] A. Ajagekar, N. S. Mattson et F. You, « Energy-efficient AI-based Control of Semi-closed Greenhouses Leveraging Robust Optimization in Deep Reinforcement Learning, » *Advances in Applied Energy*, t. 9, p. 100119, fév. 2023, ISSN : 26667924. DOI : 10.1016/j.adapen.2022.100119. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666792422000373>.

- [66] F. De Ridder, J. van Roy, W. Vanlommel et al., « Convex parameter estimator for grey-box models, applied to characterise heat flows in greenhouses, » *Biosystems Engineering*, t. 191, p. 13-26, 2020, ISSN : 1537-5110. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.009>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511019309237>.
- [67] J. Chen, J. Yang, J. Zhao, F. Xu, Z. Shen et L. Zhang, « Energy demand forecasting of the greenhouses using nonlinear models based on model optimized prediction method, » *Neurocomputing*, t. 174, p. 1087-1100, jan. 2016, ISSN : 09252312. DOI : 10.1016/j.neucom.2015.09.105. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925231215014794>.
- [68] J. Voogt et P. van Weel, « CLIMATE CONTROL BASED ON STOMATAL BEHAVIOR IN A SEMI-CLOSED GREENHOUSE SYSTEM 'AIRCOKAS', » in *Acta Horticulturae*, International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, sept. 2008, p. 151-156, ISBN : 2406-6168. DOI : 10.17660/ActaHortic.2008.797.19. adresse : <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.797.19>.
- [69] I. Lopez-Cruz, E. Fitz-Rodríguez, J. Torres-Monsivais, E. Trejo-Zúñiga, A. Ruiz Garcia et A. Arias, « Control Strategies of Greenhouse Climate for Vegetables Production, » in *Biosystems Engineering : Biofactories for Food Production in the Century XXI*, fév. 2013, p. 401-421, ISBN : 978-3-319-03879-7. DOI : 10.1007/978-3-319-03880-3{_}14.
- [70] F. Behrooz, N. Mariun, M. H. Marhaban, M. A. Mohd Radzi et A. R. Ramli, « Review of Control Techniques for HVAC Systems—Nonlinearity Approaches Based on Fuzzy Cognitive Maps, » *Energies*, t. 11, n° 3, 2018, ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en11030495. adresse : <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/495>.
- [71] A. Dounis et C. Caraiscos, « Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 13, n° 6-7, p. 1246-1261, août 2009, ISSN : 13640321. DOI : 10.1016/j.rser.2008.09.015. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032108001457>.
- [72] H. Mirinejad, S. H. Sadati, M. Ghasemian et H. Torab, « Control techniques in heating, ventilating and air conditioning systems, » *Journal of computer science*, t. 4, n° 9, p. 777, 2008, ISSN : 1549-3636.
- [73] T. Blevins, W. K. Wojsznis et M. Nixon, *Advanced control foundation : tools, techniques and applications*. International Society of Automation (ISA), 2013, ISBN : 1523106425.
- [74] Y. Li, Y. Ding, D. Li et Z. Miao, « Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse : A review, » *Biosystems Engineering*, t. 171, p. 101-119, 2018, ISSN : 1537-5110. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.018>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511017308796>.

- [75] Instruments National, *The PID Controller & Theory Explained - NI*. adresse : <https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html#top>.
- [76] Y.-G. Wang, Z.-G. Shi et W.-J. Cai, « PID autotuner and its application in HVAC systems, » in *Proceedings of the American Control Conference*, t. 3, 2001, p. 2192-2196.
- [77] A. Afram et F. Janabi-Sharifi, « Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC), » *Building and Environment*, t. 72, p. 343-355, 2014, ISSN : 0360-1323. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313003363>.
- [78] H. Hu, L. Xu, R. Wei et B. Zhu, « Multi-Objective Control Optimization for Greenhouse Environment Using Evolutionary Algorithms, » *Sensors*, t. 11, n° 6, p. 5792-5807, 2011, ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s110605792](https://doi.org/10.3390/s110605792). adresse : <https://www.mdpi.com/1424-8220/11/6/5792>.
- [79] M. S. Goodchild, M. D. Jenkins, W. R. Whalley et C. W. Watts, « A novel dielectric tensiometer enabling precision PID-based irrigation control of polytunnel-grown strawberries in coir, » *Biosystems Engineering*, t. 165, p. 70-76, 2018, ISSN : 1537-5110. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.018>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511017302349>.
- [80] Y. Ding, L. Wang, Y. Li et D. Li, « Model predictive control and its application in agriculture : A review, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 151, p. 104-117, 2018, ISSN : 0168-1699. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.004>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917315296>.
- [81] C. Cao, L. Ma et Y. Xu, « Adaptive control theory and applications, » *Journal of Control Science and Engineering*, t. 2012, 2012. DOI : [10.1155/2012/827353](https://doi.org/10.1155/2012/827353). adresse : <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867314464&doi=10.1155%2f2012%2f827353&partnerID=40&md5=7db9383a768d98379c82a2a7f789b673>.
- [82] A. J. U. Ten Cate, *Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates*. Wageningen University et Research, 1983, ISBN : 9798708782298.
- [83] G. Nicolosi, R. Volpe et A. Messineo, « An Innovative Adaptive Control System to Regulate Microclimatic Conditions in a Greenhouse, » *Energies*, t. 10, n° 5, 2017, ISSN : 1996-1073. DOI : [10.3390/en10050722](https://doi.org/10.3390/en10050722). adresse : <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/722>.
- [84] D. M. Atia et H. T. El-madany, « Analysis and design of greenhouse temperature control using adaptive neuro-fuzzy inference system, » *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, t. 4, n° 1, p. 34-48, mai 2017, ISSN : 23147172. DOI : [10.1016/j.jesit.2016.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.10.014). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2314717216300952>.

- [85] M. Berenguel, L. Yebra et F. Rodriguez, « Adaptive control strategies for greenhouse temperature control, » fév. 2003.
- [86] K. G. Arvanitis, P. N. Paraskevopoulos et A. A. Vernardos, « Multirate adaptive temperature control of greenhouses, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 26, n° 3, p. 303-320, 2000, ISSN : 0168-1699. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00082-X). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816990000082X>.
- [87] F. Rodríguez, J. L. Guzmán, M. Berenguel et M. R. Arahall, « Adaptive hierarchical control of greenhouse crop production, » *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, t. 22, n° 2, p. 180-197, 2008. DOI : <https://doi.org/10.1002/acs.974>. adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/acs.974>.
- [88] S. L. Speetjens, J. D. Stigter et G. van Straten, « Towards an adaptive model for greenhouse control, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 67, n° 1, p. 1-8, 2009, ISSN : 0168-1699. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.01.012>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169909000428>.
- [89] M. J. Willis et M. T. Tham, « Advanced process control, » *Department of Chemical and Process Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, UK*, 1994.
- [90] N. Bennis, J. Duplaix, G. Enéa, M. Haloua et H. Youlal, « Greenhouse climate modelling and robust control, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 61, n° 2, p. 96-107, 2008, ISSN : 0168-1699. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.09.014>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169907002037>.
- [91] R. Linker, P. Gutman et I. Seginer, « Robust controllers for simultaneous control of temperature and CO2 concentration in greenhouses, » *Control Engineering Practice*, t. 7, n° 7, p. 851-862, juill. 1999, ISSN : 09670661. DOI : [10.1016/S0967-0661\(99\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(99)00042-8). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967066199000428>.
- [92] R. Linker, M. Kacira et A. Arbel, « Robust climate control of a greenhouse equipped with variable-speed fans and a variable-pressure fogging system, » *Biosystems Engineering*, t. 110, n° 2, p. 153-167, oct. 2011, ISSN : 15375110. DOI : [10.1016/j.biosystemseng.2011.07.010](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.010). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511011001255>.
- [93] J. Moreno, M. Berenguel, F. Rodríguez et A. Baños, « ROBUST CONTROL OF GREENHOUSE CLIMATE EXPLOITING MEASURABLE DISTURBANCES, » *IFAC Proceedings Volumes*, t. 35, n° 1, p. 271-276, 2002, ISSN : 14746670. DOI : [10.3182/20020721-6-ES-1901.00379](https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.00379). adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667015388005>.

- [94] W. I. R. Agmail, R. Linker et A. Arbel, « Robust Control of Greenhouse Temperature and Humidity, » *IFAC Proceedings Volumes*, t. 42, n° 6, p. 138-143, 2009, ISSN : 1474-6670. DOI : <https://doi.org/10.3182/20090616-3-IL-2002.00024>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701540391X>.
- [95] R. Babuska et E. Mamdani, « Fuzzy control, » *Scholarpedia*, t. 3, n° 2, p. 2103, 2008, ISSN : 1941-6016. DOI : [10.4249/scholarpedia.2103](https://doi.org/10.4249/scholarpedia.2103).
- [96] M. Azaza, C. Tanougast, E. Fabrizio et A. Mami, « Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring, » *ISA Transactions*, t. 61, p. 297-307, 2016, ISSN : 0019-0578. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.12.006>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057815003109>.
- [97] M. A. Márquez-Vera, J. C. Ramos-Fernández, L. F. Cerecero-Natale, F. Lafont, J.-F. Balmat et J. I. Esparza-Villanueva, « Temperature control in a MISO greenhouse by inverting its fuzzy model, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 124, p. 168-174, 2016, ISSN : 0168-1699. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.005>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816991630120X>.
- [98] D. Kolokotsa, G. Saridakis, K. Dalamagkidis, S. Dolianitis et I. Kaliakatsos, « Development of an intelligent indoor environment and energy management system for greenhouses, » *Energy Conversion and Management*, t. 51, n° 1, p. 155-168, 2010, ISSN : 0196-8904. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.007>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409003483>.
- [99] F. Lafont et J.-F. Balmat, « Optimized fuzzy control of a greenhouse, » *Fuzzy Sets and Systems*, t. 128, n° 1, p. 47-59, 2002, ISSN : 0165-0114. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(01\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(01)00182-8). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165011401001828>.
- [100] Y. Yam, H. T. Nguyen et V. Kreinovich, « Multi-resolution techniques in the rules-based intelligent control systems : A universal approximation result, » in *IEEE International Symposium on Intelligent Control - Proceedings*, 1999, p. 213-218.
- [101] Z. Afroz, G. M. Shafiullah, T. Urmee et G. Higgins, « Modeling techniques used in building HVAC control systems : A review, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 83, p. 64-84, 2018, ISSN : 1364-0321. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.044>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117314193>.
- [102] A. Castañeda-Miranda et V. M. Castaño, « Smart frost control in greenhouses by neural networks models, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 137, p. 102-114, 2017, ISSN : 0168-1699. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.024>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169916305798>.

- [103] J.-T. Ding, H.-Y. Tu, Z.-L. Zang, M. Huang et S.-J. Zhou, « Precise control and prediction of the greenhouse growth environment of *Dendrobium candidum*, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 151, p. 453-459, août 2018, ISSN : 01681699. DOI : [10.1016/j.compag.2018.06.037](https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.037).
- [104] F. Fourati, « Multiple neural control of a greenhouse, » *Neurocomputing*, t. 139, p. 138-144, 2014, ISSN : 0925-2312. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.02.052>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231214004731>.
- [105] S. Mohamed et I. A. Hameed, « A GA-Based Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Greenhouse Climate Control System, » *Alexandria Engineering Journal*, t. 57, n° 2, p. 773-779, 2018, ISSN : 1110-0168. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.04.009>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815000071>.
- [106] H. Xiao, L. Feng et Y. Zhi, « Tuning the PID parameters for greenhouse control based on CFD simulation, » in *2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, IEEE, 2013, p. 485-489, ISBN : 1479908681.
- [107] szalai Simon, *GitHub - raiz-vertical-farms/greenhouse-simulator-2 : Raiz Greenhouse Simulator*. adresse : <https://github.com/raiz-vertical-farms/greenhouse-simulator-2>.
- [108] *SIMEB - Données météo*. adresse : https://www.simeb.ca:8443/index_fr.jsp.
- [109] P. J. M. van Beveren, J. Bontsema, G. van Straten et E. J. van Henten, « Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds, » *Applied Energy*, t. 159, p. 509-519, 2015, ISSN : 0306-2619. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.012>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191501082X>.
- [110] P. J. M. van Beveren, J. Bontsema, G. van Straten et E. J. van Henten, « Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds, » *Applied Energy*, t. 159, p. 509-519, 2015, ISSN : 0306-2619. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.012>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191501082X>.
- [111] G. D. Pasgianos, K. G. Arvanitis, P. Polycarpou et N. Sigrimis, « A nonlinear feedback technique for greenhouse environmental control, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 40, n° 1, p. 153-177, 2003, ISSN : 0168-1699. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(03\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(03)00018-8). adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169903000188>.
- [112] L. D. Albright, K. G. Arvanitis et A. E. Drysdale, « Environmental control for plants on Earth and in space, » *IEEE Control Systems Magazine*, t. 21, n° 5, p. 28-47, 2001. DOI : [10.1109/37.954518](https://doi.org/10.1109/37.954518).

- [113] M. Ghosal, G. Tiwari et N. Srivastava, « Modeling and experimental validation of a greenhouse with evaporative cooling by moving water film over external shade cloth, » *Energy and Buildings*, t. 35, n° 8, p. 843-850, sept. 2003, ISSN : 03787788. DOI:10.1016/S0378-7788(02)00242-6. adresse: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778802002426>.
- [114] B. Nielsen et H. Madsen, « Identification of a Linear Continuous Time Stochastic Model of the Heat Dynamics of a Greenhouse, » *Journal of Agricultural Engineering Research*, t. 71, n° 3, p. 249-256, 1998, ISSN : 0021-8634. DOI : <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0322>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021863498903225>.
- [115] F. Fourati et M. Chtourou, « A greenhouse control with feed-forward and recurrent neural networks, » *Simulation Modelling Practice and Theory*, t. 15, n° 8, p. 1016-1028, 2007, ISSN : 1569-190X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.06.001>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X0700072X>.
- [116] F. He et C. Ma, « Modeling greenhouse air humidity by means of artificial neural network and principal component analysis, » *Computers and Electronics in Agriculture*, t. 71, S19-S23, 2010, ISSN : 0168-1699. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.011>. adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169909001410>.
- [117] M. Perea, G. Herrera-Ruiz, G. J. Moreno et R. MIRANDA, « Greenhouse Energy Consumption Prediction using Neural Networks Models, » *International Journal of Agriculture and Biology*, t. 11, nov. 2009.
- [118] H.-P. Halvorsen, « Python for Computational Science and Engineering, » p. 1-167, 2020.
- [119] Hydro-Québec, *Using energy more wisely in cold weather*, 2023.
- [120] Hydro-Québec, *Rate option for raising crops*, 2024. adresse : <https://www.hydroquebec.com/residential/customer-space/rates/additional-electricity-option-crops-billing.html>.