

Étude et implémentation de pilotage d'espaces d'agriculture
en environnement contrôlé : application à une serre de
moyenne taille, un système de stockage thermique et une
ferme conteneur

par

Emile MENGUY

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

MONTRÉAL, LE 22 AOÛT 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Emile MENGUY, 2026



Cette [licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de créditer l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Stéphane Gibout, codirection de mémoire
LaTEP à l'université de Pau et des pays de l'Adour

M. Erik Poirier, présidence du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw Kajl, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 17 AOÛT 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux codirecteurs de recherche, Didier Haillot et Stéphane Gibout. Leur accompagnement tout au long du projet et leurs approches complémentaires des différents sujets m'ont permis de progresser, notamment sur des sujets qui ne sont pas dans mon domaine de prédilection à l'origine. L'autonomie et la confiance accordée, en particulier pour réaliser deux terrains dans le Grand Nord, m'ont permis de me dépasser et ont rendu l'expérience extrêmement enrichissante.

Je tiens ensuite à remercier Guilhem. Réaliser ces deux terrains à Kuujjuaq ensemble a été un vrai bonheur. J'en garde un excellent souvenir, entre la découverte de la communauté, les trajets en autostop, et la satisfaction d'avoir mené à bout avec succès ces terrains.

Je remercie ensuite tous les autres étudiants de L3e : Paule, Noémie, Lysie, Vincent, Maxime, Diego, Erwan, Thomas, Sullivan, pour les nombreux échanges, aussi bien dans le cadre des différents projets que lors des pauses café, grâce à qui l'ambiance au laboratoire a été très conviviale durant ces deux années.

Je remercie aussi les collègues du LTSB pour tous ces moments partagés lors des pauses du midi.

Je souhaite aussi remercier Sam Chauvette du CISA, sans qui les deux terrains à Kuujjuaq auraient été impossibles. Sa disponibilité et son aide sur place pour trouver un logement, nous faire comprendre le fonctionnement de la communauté et des serres sur place, mais aussi pour nous faire découvrir Kuujjuaq et ses alentours. Ce fut un vrai plaisir de travailler ensemble.

Je tiens enfin à remercier Michel Drouin. Son expertise sur l'instrumentation et sur LabVIEW m'a beaucoup aidé lors de mon projet. Merci pour le temps consacré et pour les échanges, que ça soit pour la sélection des capteurs de la ferme conteneur, des cartes d'acquisition, que pour la formation sur LabVIEW.

Étude et implémentation de pilotage d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé : application à une serre de moyenne taille, un système de stockage thermique et une ferme conteneur

Emile MENGUY

RÉSUMÉ

Les espaces d'agriculture en environnement contrôlé se développent fortement au Québec. Les objectifs de ces types d'espace sont d'augmenter les rendements des cultures et de produire même quand les conditions extérieures ne le permettent pas. Cela implique de réguler plusieurs paramètres (température, humidité, rayonnement...), avec des besoins variables selon le type d'espace, mais entraîne une consommation énergétique importante. Il est alors essentiel de comprendre le contrôle de ces espaces afin de déterminer la stratégie la plus adaptée. Dans ce cadre, ce mémoire se concentre sur trois études de cas.

La première est l'étude d'un contrôle de la température et de l'humidité dans une serre maraîchère à Magog, au Québec, afin de comprendre son fonctionnement et de mettre en avant les problématiques rencontrées. Plusieurs difficultés ont ainsi été mises en valeur : la déshumidification est souvent inefficace, la limitation des écarts de températures entre le jour et la nuit entraîne une surconsommation, et l'impossibilité de mesurer l'humidité lors de températures négatives.

La deuxième étude concerne l'amélioration du contrôle d'un système de stockage thermique constitué de lits de roches installé dans une serre à Kuujuaq, au Nunavik. Ce système permet de limiter les écarts de températures entre le jour et la nuit. Une étude énergétique ayant révélé que son contrôle n'était pas optimisé, deux terrains ont permis d'installer un nouveau contrôleur, afin de mettre en place une stratégie de contrôle optimisée, conçue au préalable à partir des résultats de l'étude énergétique.

La dernière étude porte sur l'analyse du contrôle proposé par une firme de génie-conseil pour le système CVCA de la ferme conteneur de l'ÉTS. Il est basé sur des régulations PID et tout ou rien à hystérésis. Plusieurs lacunes ont été mises en évidence. Des améliorations ont été proposées puis le système d'acquisition et de contrôle, possédant une interface réalisée sur LabVIEW, a été conçu. Enfin, la méthodologie de mise en place d'une stratégie de contrôle amélioré, basé sur la logique floue est proposée, afin d'augmenter le rendement énergétique du système.

Mots-clés : espace d'agriculture en environnement contrôlé, contrôle, stockage thermique, ferme conteneur, CVCA

Study and implementation of management of controlled environment agriculture spaces : application to a medium-sized greenhouse, a thermal storage system, and a container farm

Emile MENGUY

ABSTRACT

Controlled-environment agriculture spaces are growing rapidly in Quebec. The goals of these types of spaces are to increase crop yields and to enable production even when outdoor conditions do not allow it. This requires regulating several parameters (temperature, humidity, radiation, etc.), with needs that vary depending on the type of space, but it results in significant energy consumption. It is therefore essential to understand the control of these spaces in order to determine the most suitable strategy. Within this framework, this document focuses on three case studies.

The first is a study of temperature and humidity control in a market garden greenhouse in Magog, Quebec, in order to understand its operation and highlight the problematics. Several difficulties were identified: dehumidification is often ineffective, limiting temperature differences between day and night leads to excess energy consumption, and it is impossible to measure humidity during periods of negative temperatures.

The second study concerns the improvement of the control of a thermal storage system consisting of rock beds installed in a greenhouse in Kuujuaq, Nunavik. This system helps limit temperature differences between day and night. Since an energy study revealed that its control was not optimized, two field visits made it possible to install a new controller, in order to implement an optimized control strategy designed beforehand based on the results of the energy study

The last study focuses on the analysis of the control system proposed by an engineering consulting firm for the HVAC system of ÉTS's container farm. It is based on PID regulation and on-off control with hysteresis. Several shortcomings were identified. Improvements were proposed, and the acquisition and control system, featuring a LabVIEW-based interface, was then designed. Finally, a methodology for implementing an improved control strategy based on fuzzy logic is proposed, in order to increase the system's energy efficiency

Keywords : controlled environment agriculture spaces, control, thermal storage, container farm

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Espaces d’agriculture en environnement contrôlé (AEC)	5
1.1.1 Serres.....	6
1.1.2 Enceintes de productions végétales intérieures (EPVI)	8
1.2 Balance énergétique des espaces d’AEC	10
1.3 Stratégie de contrôle des espaces d’AEC.....	12
1.3.1 Paramètres à contrôler pour la croissance de végétaux	13
1.3.1.1 Liste des paramètres contrôlable dans les espaces d’AEC	14
1.3.1.2 Tableaux de synthèse	20
1.3.2 Équipements présents dans les espaces d’AEC	22
1.3.2.1 Ventilation	22
1.3.2.2 Chauffage et climatisation	26
1.3.2.3 Ombrages et toiles occultantes	28
1.3.2.4 Déshumidification.....	29
1.3.2.5 Lumière artificielle	31
1.3.2.6 Taux de dioxyde de carbone (CO ₂)	33
1.3.2.7 Irrigation	34
1.3.2.8 Tableaux de synthèse	35
1.3.3 Stratégie de contrôle des espaces d’AEC.....	37
1.3.3.1 Contrôle ON/OFF	38
1.3.3.2 Contrôle Proportionnel Intégral Dérivé (PID)	39
1.3.3.3 Contrôle prédictif.....	41
1.3.3.4 Contrôle à logique floue	43
1.3.3.5 Réseaux de neurones.....	46
1.3.3.6 Tableaux de synthèse	48

1.4	Études de cas	50
1.4.1	Sélection des articles	50
1.4.2	Analyse et discussion	52
1.4.3	Synthèse	57
CHAPITRE 2	MÉTHODOLOGIE.....	59
2.1	Objectifs de l'étude	59
2.2	Méthodologie	60
2.2.1	Analyse d'un contrôle : serres maraîchères à Magog	62
2.2.2	Mise en place d'un contrôle : système de stockage thermique à Kuujuaq.....	62
2.2.3	Mise en place d'un contrôle : ferme conteneur à l'École de Technologie Supérieure	63
CHAPITRE 3	ANALYSE D'UN CONTRÔLE : SERRES MARAÎCHÈRES À MAGOG	65
3.1	Description des serres	65
3.1.1	Taille et utilité de la serre.....	65
3.1.2	Paramètres à contrôler et instrumentation.....	66
3.1.3	Équipements.....	69
3.2	Stratégie de contrôle des serres	73
3.2.1	Contrôle de la température.....	74
3.2.2	Contrôle de l'humidité	79
3.2.3	Gestion des serres à l'année	81
3.3	Étude du contrôle des serres	82
3.4	Discussion et perspectives	91
CHAPITRE 4	MISE EN PLACE D'UN CONTRÔLE : SYSTÈME DE STOCKAGE THERMIQUE À KUUIJUAQ.....	95
4.1	Description de la serre	95
4.2	Stratégie de contrôle de la serre et du système de stockage	101
4.3	Étude du contrôle et influence sur le comportement énergétique de la serre	102
4.4	Proposition d'une nouvelle stratégie et implantation sur site	106
4.4.1	Cahier des charges	106
4.4.2	Conception du dispositif expérimental	109

4.4.3	Implantation de la stratégie de contrôle	111
4.4.4	Campagne de terrain pour implantation du contrôleur	116
4.5	Discussion et perspectives	118
CHAPITRE 5	MISE EN PLACE D'UN CONTRÔLE : FERME CONTENEUR À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE	123
5.1	Description de la ferme container	123
5.2	Stratégie de contrôle du système CVCA	136
5.2.1	Unité de traitement d'air (UTA)	137
5.2.2	Réservoirs de stockage thermique	141
5.3	Étude du contrôle et piste d'amélioration	146
5.3.1	Analyse du contrôle	146
5.3.2	Mise en place du contrôleur	152
5.4	Proposition d'une nouvelle stratégie de contrôle	158
5.4.1	Proposition d'un contrôle de la température à logique floue	159
5.4.2	Discussion du contrôle à logique floue	168
CONCLUSION		173
RECOMMANDATIONS		177
ANNEXE I	INSTRUMENTATION COMPLÉMENTAIRE DE LA FERME CONTENEUR	179
ANNEXE II	PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS INTERFACES RÉALISÉS SUR LABVIEW	183
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		185

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Bilan des variables contrôlables 21
Tableau 1.2	Valeur cible de différentes variables contrôlables en fonction du type de plante..... 22
Tableau 1.3	Efficacité photonique en fonction de la longueur d'onde 32
Tableau 1.4	Principaux équipements présents dans la littérature..... 35
Tableau 1.5	Principales stratégies de contrôle d'espaces d'AEC 37
Tableau 1.6	Avantages et limites des différents types de contrôle..... 49
Tableau 1.7	Nombres d'études sur le contrôle selon le type d'espace d'AEC 50
Tableau 1.8	Nombre d'articles selon le type de contrôle pour les fermes verticales entre 2005 et 2025 52
Tableau 1.9	Récapitulatif des études de cas 53
Tableau 3.1	Caractéristiques des serres étudiées..... 65
Tableau 3.2	Mesures réalisées dans les deux serres et à l'extérieur..... 67
Tableau 3.3	Modèle et puissance des équipements 73
Tableau 3.4	Paramètres des contrôleurs PID..... 76
Tableau 4.1	Valeurs des paramètres du contrôle..... 113
Tableau 4.2	Règles de logiques définies sur Gysmo..... 116
Tableau 5.1	Liste des acronymes utilisés pour le contrôle du système CVCA..... 129
Tableau 5.2	Puissances des principaux équipements 136
Tableau 5.3	Points de consigne de température et d'humidité de la FC définis par Alte 138
Tableau 5.4	Température de soufflage consigne et puissance de l'UTA en fonction du PID de refroidissement 139

Tableau 5.5	Température de soufflage consigne et puissance de l'UTA en fonction du PID de chauffage	140
Tableau 5.6	Points de consigne des réservoirs préconisés par Alte	145
Tableau 5.7	Conditions de lancement et d'arrêts des TPEE et TPAE	151
Tableau 5.8	Liste des capteurs nécessaires à la régulation, avec leur précision et la précision recommandée	154
Tableau 5.9	Articles étudiés pour la mise en place du contrôle flou de la température	161
Tableau 5.10	Variables d'entrée et de sortie du contrôle flou	163
Tableau 5.11	Règles de logique floue	165
Tableau 5.12	Règles activées et degré d'activation	166

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Serres de Kuujjuaq, Nunavik, Québec	6
Figure 1.2 Les principales formes de serres.....	7
Figure 1.3 Ferme verticale de la ferme d’hiver à Vaudreuil-Dorion	9
Figure 1.4 Ferme conteneur installée à l’École de Technologie Supérieure	9
Figure 1.5 Flux d’énergie dans un espace d’AEC.....	10
Figure 1.6 Schéma de principe du contrôle d’un espace d’AEC	12
Figure 1.7 Diagramme d’air humide	15
Figure 1.8 Toit ouvrant d’une serre à Kuujjuaq	23
Figure 1.9 Refroidissement isenthalpique sur le diagramme d’air humide	24
Figure 1.10 Ventilateur à pression positive d’une serre à Kuujjuaq, Nunavik.....	25
Figure 1.11 Ventilateur pour la circulation de l’air dans l’espace	25
Figure 1.12 Ombrage dans une serre	28
Figure 1.13 Déshumidification sur un diagramme d’air humide.....	30
Figure 1.14 Influence des paramètres d’un correcteur PID à un échelon unitaire	40
Figure 1.15 Principe de fonctionnement du contrôle prédictif	42
Figure 1.16 Exemple de fonctions d’appartenance pour la température dans un contrôle à logique floue	44
Figure 1.17 Schéma de principe du contrôle à logique floue.....	44
Figure 1.18 Schéma de principe d’un réseau de neurones	47
Figure 1.19 Nombre d’articles sur le contrôle des serres en fonction du type de contrôle et de l’année.....	51
Figure 2.1 Objectifs et sous objectifs du mémoire.....	59
Figure 2.2 Méthodologie générale d’une étude de contrôle d’un espace d’AEC	61

XVIII

Figure 3.1	Serres étudiées	66
Figure 3.2	Boîtier avec les sondes de température et d'humidité et station météo sur son mât.....	68
Figure 3.3	Ventilateur et ballon dans la serre 3	69
Figure 3.4	Ouvrant de la face ouest de la serre 3	70
Figure 3.5	Ventilateur dans la serre 1	70
Figure 3.6	Schémas des systèmes de chauffage des serres 1 et 3	71
Figure 3.7	Thermopompe, unité de traitement d'air et ballons d'airs chauds (serre 3).....	72
Figure 3.8	Points de consigne pour le contrôle de la température l'été	74
Figure 3.9	Irradiance et accumulation lumineuse ainsi que températures de chauffage et refroidissement les 1 et 2 septembre 2025	75
Figure 3.10	Valeurs de lancements et d'arrêts des équipements en fonction du besoin de chauffage	78
Figure 3.11	Points de consigne de déficit d'humidité	79
Figure 3.12	Déficit d'humidité réel, limite et cycles de purge	80
Figure 3.13	Évolution de la température dans les serres 1 et 3 et à l'extérieur sur une année.....	81
Figure 3.14	Contrôle du climat l'été.....	83
Figure 3.15	Contrôle du climat l'automne.....	85
Figure 3.16	Contrôle du climat l'hiver	87
Figure 3.17	Contrôle du climat le printemps	89
Figure 4.1	Carte du Nunavik.....	96
Figure 4.2	Serre de Kuujjuaq étudiée.....	97
Figure 4.3	Toit ouvrant de la serre de Kuujjuaq	98
Figure 4.4	Ventilateur et volet motorisé de la serre de Kuujjuaq	98
Figure 4.5	Schéma de fonctionnement du lit de roche.....	99

Figure 4.6	Emplacement des deux lits de roche face sud-ouest.....	100
Figure 4.7	Principe de contrôle du lit roche et des ouvrants.....	101
Figure 4.8	État du système et températures d'entrée et de sortie du lit de roche	104
Figure 4.9	Schéma de contrôle de la serre	107
Figure 4.10	Carte météo installée à Kuujjuaq.....	109
Figure 4.11	Branchements et fonctionnement du contrôleur.....	110
Figure 4.12	Stratégie de contrôle du lit de roche	112
Figure 4.13	Stratégie de contrôle implémentée dans Gysmo partie 1	114
Figure 4.14	Stratégie de contrôle implémentée dans Gysmo partie 2	115
Figure 4.15	Position d'une carte météo, de son alimentation et des ventilateurs contrôlés dans la serre de Kuujjuaq.....	118
Figure 5.1	Ferme conteneur de l'ÉTS	124
Figure 5.2	Plan de la salle de culture de la FC.....	125
Figure 5.3	NFT installés dans une serre.....	125
Figure 5.4	Tables inondantes	126
Figure 5.5	Schéma du système CVCA.....	128
Figure 5.6	Refroidissement et déshumidification sur un diagramme d'air humide ..	132
Figure 5.7	Circuits d'eau en fonction de la thermopompe en fonctionnement	135
Figure 5.8	Schéma de principe du contrôle de l'humidité et de la température	137
Figure 5.9	Fonctionnement de la régulation de refroidissement.....	139
Figure 5.10	Fonctionnement de la régulation de chauffage.....	140
Figure 5.11	Schéma du contrôle de la température des réservoirs en saison de refroidissement	142
Figure 5.12	Schéma du contrôle de la température des réservoirs en saison de chauffage	144

Figure 5.13	Exemple de réponse de la température de soufflage à un échelon de consigne sur la valve trois voies	149
Figure 5.14	Branchements du contrôleur	153
Figure 5.15	Objectifs du programme LabVIEW	156
Figure 5.16	Interface de contrôle du système CVCA	156
Figure 5.17	Fonctions d'appartenances des paramètres d'entrée et de sortie	164
Figure 5.18	Tracé de la fonction résultante d'appartenance de la V3V	166
Figure 5.19	Sorties de la V3V et de l'UTA en fonction de l'erreur en température et de sa variation	167

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AEC	Agriculture en environnement contrôlé
CE	Conductivité électrique
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement d'air
DLI	Daily light integral
EPVI	Enceinte de production végétale intérieure
FC	Ferme conteneur
HR	Humidité relative
NTF	Nutrient film technique
PAR	Photosynthetically Active radiation
PPFD	Photosynthetic photon flux density
RTD	Resistance temperature detector
TPAE	Thermopompe air-eau
TPEE	Thermopompe eau-eau
UTA	Unité de traitement d'air
VM	Volet motorisé
VPD	Vapour pression deficit
V3V	Valve trois voies

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Symboles :

c	Vitesse de la lumière dans le vide
C_{Kp}	Coefficient gain proportionnel
C_{Ti}	Coefficient constante intégrale
C_{Td}	Coefficient constante dérivée
COP	Coefficient de performance
D_{hum}	Déficit d'humidité
E	Énergie
Er	Erreur
e_v	Pression partielle
G_s	Radiation solaire
h	Constante de Plank
n	Quantité de matière
P	Pression
q''	Flux thermique
Q^{cn}	Énergie déstockée pendant la n-ième décharge
Q^{dn}	Énergie stockée pendant la n-ième charge
T	Température
U	Consigne de contrôle
V	Volume
ω	Humidité spécifique
λ	Longueur d'onde en mètre

η_s Rendement de stockage

Indices :

atm Atmosphérique

C Échanges par convection

Elec Électrique

H Chauffage

I Pertes par conduction

L Éclairage

max Maximum

min Minimum

Q pertes Radiatives

ref Référence

s Source lumineuse

sat Saturation

StoAir Énergie thermique stockée

V Pertes par la ventilation

Unités de mesure :

g gramme

J joule

m mètre

Pa pascal

s seconde

W watt

INTRODUCTION

L'agriculture en environnement contrôlé associe la science et l'ingénierie dans l'objectif de créer des conditions optimales pour la croissance végétale. Le but est d'optimiser les ressources (eau, énergie), tout en répondant aux besoins humains (UA-CEAC, 2025). Les espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC) sont donc des environnements qui permettent de faire pousser des plantes, des légumes, des fruits, mais aussi des champignons à l'année, même dans des endroits où l'agriculture en champ n'est pas possible (Conseil des académies canadiennes, 2024). Leur développement s'accélère aujourd'hui, notamment pour répondre aux enjeux de sécurité alimentaire liés à la croissance de la population mondiale et au dérèglement climatique. Cependant, ces espaces consomment beaucoup plus d'énergie qu'une agriculture classique en champs (Badji, Benseddik, Bensaha, Boukhelifa, & Hasrane, 2022). Il est donc nécessaire d'étudier leur contrôle afin d'optimiser cette consommation énergétique, tout en garantissant le maintien de conditions favorables à la croissance des plantes.

On distingue principalement deux types d'espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC). Les **serres** exploitent directement le rayonnement solaire grâce à leur enveloppe transparente, ce qui permet de bénéficier d'un apport énergétique naturel pour la croissance des cultures. En contrepartie, cette enveloppe présente généralement une faible isolation thermique, entraînant une forte dépendance aux conditions climatiques extérieures. À l'inverse, les **enceintes de production végétale intérieures** (EPVI) ne bénéficient pas du rayonnement solaire et reposent donc sur un éclairage artificiel. Leur enveloppe opaque peut toutefois être fortement isolée, ce qui réduit les échanges thermiques avec l'extérieur et facilite le maintien de conditions climatiques stables tout en limitant les besoins de chauffage ou de refroidissement. Ces différences de conception conduisent naturellement à des besoins de régulation différents, qui nécessitent des stratégies de contrôle adaptées (Schimelpfenig, 2022). La problématique de ce mémoire est donc d'identifier, pour différents espaces d'AEC, les stratégies de contrôle les plus adaptées afin de concilier performances agronomiques et efficacité énergétique.

Cette problématique de régulation est étudiée au travers de trois études de cas représentatives de différents espaces d'agriculture en environnement contrôlé, afin d'analyser leurs stratégies de pilotage et d'identifier les approches les plus adaptées à leurs spécificités. Ces trois études correspondent également à trois niveaux de maturité d'un système de contrôle : l'analyse d'un contrôle existant, l'amélioration d'un contrôle existant et la conception d'un nouveau contrôle.

La première est l'analyse d'un contrôle de la température et de l'humidité d'une serre maraîchère en activité située à Magog, au Québec. Basé sur le recueil et l'analyse de données obtenue sur plusieurs jours de production, l'objectif sera de comprendre le fonctionnement d'une installation réelle puis de mettre en avant les problématiques rencontrées dans la régulation de ce type d'espace d'AEC.

La deuxième étude de cas portera sur un système de stockage thermique aussi existant, installé dans une serre à Kuujuaq, au Nunavik. Dans l'objectif de réduire les amplitudes de température nycthémère, ce stockage est constitué d'un lit de roches placées sous les cultures qui stockent la chaleur pour la restituer la nuit. Cependant le contrôleur mis en place lors de la construction en 2017 n'est pas optimal. L'objectif est donc de proposer une nouvelle stratégie de régulation, qui sera mise en œuvre lors de campagnes expérimentales sur le terrain.

La troisième et dernière étude de cas porte quant à elle sur un espace qui n'est pas encore construit, mais qui est dans une phase de conception avancée : la ferme conteneur (FC) de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS). Cet espace, financé par le programme John Evans du fond canadien à l'innovation, doit servir de plateforme expérimentale au Laboratoire Énergie et Efficacité Énergétique (L3e) afin d'étudier les performances agronomiques et énergétiques des FC mais aussi tester des technologies innovantes de stockage thermique et de refroidissement, avec notamment plusieurs thermopompes et des panneaux radiatifs. Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif sera d'analyser de manière critique la stratégie de contrôle proposée par la firme de génie-conseil mandatée à cette tâche et de proposer des pistes d'amélioration aboutissant à une stratégie de contrôle fonctionnelle et implémentable.

Pour répondre aux objectifs précédemment présentés, le mémoire est organisé en cinq chapitres. Le chapitre 1 présente une revue de la littérature portant sur les espaces d'AEC. Cette revue décrit d'abord les différents types d'espaces ainsi que leurs principales caractéristiques. Elle aborde ensuite les paramètres environnementaux pouvant être contrôlés et les équipements utilisés pour réguler ces paramètres. Les principales stratégies de contrôle, issues à la fois du domaine commercial et de la littérature scientifique, sont ensuite présentées et comparées en fonction de leurs avantages et de leurs limites, dans le but d'identifier les approches les plus adaptées à chaque contexte. Enfin, ce chapitre se conclut par une étude des travaux de recherche récents consacrés aux stratégies de contrôle appliquées aux espaces d'AEC. Le chapitre 2 présente la méthodologie de la recherche qui repose sur les trois études de cas. Les chapitres 3, 4 et 5 présentent respectivement l'analyse du contrôle d'une serre commerciale, l'amélioration d'un contrôle de stockage thermique et la conception d'une stratégie de contrôle pour la ferme container en cours de développement à l'ÉTS, illustrant ainsi une progression allant de l'étude de systèmes existants vers la conception d'une stratégie de contrôle pour un nouvel espace d'AEC.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature a pour objectif de faire un état de l'art sur le contrôle des espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC). Elle doit permettre de comprendre le principe du contrôle des espaces d'AEC et d'étudier les principales stratégies de contrôle existantes, afin d'analyser leur mise en place ainsi que leurs impacts sur la consommation énergétique et le maintien des consignes. Cette revue doit servir de base afin d'étudier et mettre en place des contrôles dans des espaces d'AEC variés, notamment dans une serre et une ferme conteneur. Ce chapitre est découpé en trois parties. La première présente les différents types d'espaces d'AEC existants. La deuxième décrit le contrôle de ces espaces, avec les paramètres climatiques contrôlables, les principaux équipements existants ainsi que les stratégies de contrôle les plus courantes. Enfin, la dernière partie se focalise sur des études de cas qui vont à la fois permettre d'illustrer les stratégies de contrôle présentées précédemment, mais aussi servir à choisir la stratégie idéale pour le fonctionnement d'une ferme conteneur.

1.1 Espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC)

D'après le centre de l'agriculture en environnement contrôlé de l'université d'Arizona, l'AEC est une méthode regroupant la science et l'ingénierie afin de créer des conditions optimales pour la croissance des plantes. L'objectif est d'optimiser l'utilisation de l'eau, de l'énergie, de l'espace et de la satisfaction humaine (UA-CEAC, 2025). Il existe de nombreux espaces d'AEC différents, dépendants du climat, du type de culture, des stratégies de contrôle, mais aussi des besoins de l'exploitant. Ces espaces peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les serres, possédant au moins une paroi transparente, et les enceintes de production végétale intérieure possédant uniquement des parois opaques (Conseil des académies canadiennes, 2024).

1.1.1 Serres

Le type d'espace d'AEC le plus courant est la serre (Figure 1.1). Elle est caractérisée par une structure transparente utilisant le soleil pour faire pousser des plantes tout en les protégeant des conditions climatiques extérieures (Geelen, Voogt, & van Weel, 2021). L'objectif est de créer des conditions permettant d'améliorer leur pousse. Les premières serres telles qu'on les connaît aujourd'hui sont apparues à la renaissance, vers les XVI^e et XVII^e siècles. C'est ensuite lors du XX^e siècle qu'elles se sont fortement développées. Elles sont encore en pleine expansion aujourd'hui. En Méditerranée (ensemble des pays européens possédant une côte sur la mer méditerranée) par exemple, leur superficie est passée de 65 000 ha en 1987 à 200 000 ha en 2010 (Castilla, 2013).



Figure 1.1 Serres de Kuujjuaq, Nunavik, Québec

Il existe de nombreux types de serres, qui peuvent être classées selon deux critères : leur géométrie et les matériaux de leur enveloppe (Piché, 2021).

La géométrie des serres peut elle-même être séparée en deux catégories : les serres simples et les serres multi-chapelles. Il existe ensuite plusieurs types de serres simples, en fonction de leurs formes. Sethi a mis en valeur 5 formes différentes couramment utilisées : à portées égales, à portées inégales, à vignobles, à arcs modifiés et Quonset (Sethi, 2009). Ces formes sont présentées dans la Figure 1.2.

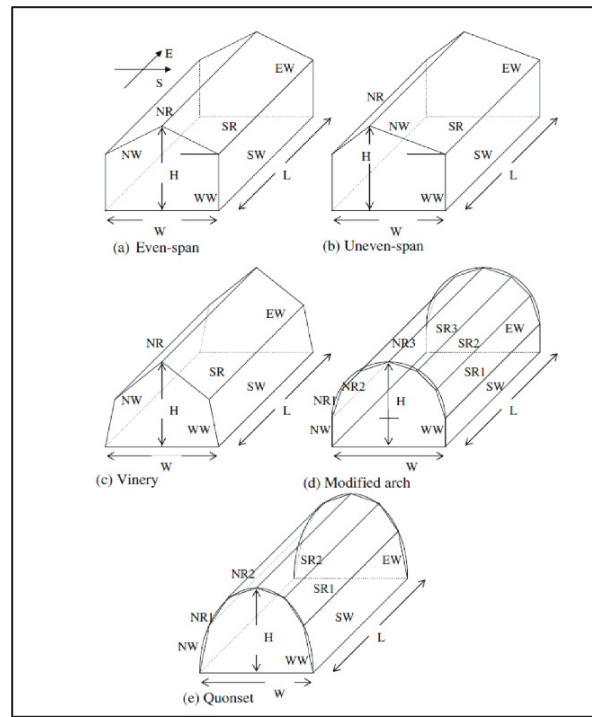


Figure 1.2 Les principales formes de serres
Tiré de Sethi (2009)

On trouve aussi des serres en forme de dôme (Piché, 2021). Enfin il existe des serres dites « serres solaires chinoises ». Ces serres sont conçues de telle sorte à pouvoir garder une température intérieure convenable sans chauffage, même lorsque les températures extérieures sont fortement négatives, aux alentours de -10°C (Piché, 2021). Elles possèdent côté Sud¹ une façade exposée la plus longue et, côté Nord, un mur isolé, qui joue bien souvent le rôle de stockage thermique.

Le deuxième critère est le matériau de couverture. D'après Piché il existe trois matériaux différents pour les enveloppes. Ces matériaux sont le verre, les plastiques rigides et les plastiques souples. Ils ont des propriétés thermiques et optiques différentes (Piché, 2021), ce qui va influencer sur le comportement du climat interne de la serre.

¹ Pour l'hémisphère Nord.

Pour résumer, les serres sont les espaces d'AEC les plus communs. Elles possèdent une paroi transparente, ce qui leur permet de capter le rayonnement solaire, mais favorise également les échanges thermiques avec l'environnement extérieur. Elles permettent de créer de meilleures conditions pour la croissance des végétaux que la culture en champs. Il existe plusieurs serres différentes, caractérisées par leurs formes et leurs matériaux de couverture.

1.1.2 Enceintes de productions végétales intérieures (EPVI)

Les enceintes de productions végétales intérieures ou EPVI sont des espaces d'AEC qui diffèrent des serres, car elles possèdent principalement des parois opaques. L'objectif est de limiter les échanges thermiques avec le milieu extérieur. Le climat nécessaire pour la croissance des plantes est alors reproduit artificiellement, notamment l'éclairage, à l'aide d'équipements (chauffage, lumière, injecteurs de CO₂, humidificateurs...) et de stratégies de contrôle poussées. Les EPVI sont apparues plus récemment que les serres. Elles permettent de produire des fruits, des légumes et autres plantes tout au long de l'année, aussi bien dans des espaces très urbanisés que dans des régions isolées, et cela indépendamment des conditions climatiques extérieures. Les fermes conteneurs sont les EPVI les plus courantes (Xi, Zhang, Zhang, Lew, & Lam, 2022).

Les fermes verticales consistent à faire pousser les plantes les unes au-dessus des autres dans des espaces urbains, en optimisant l'espace (Erekath et al., 2024). L'idée est apparue dans les années 1960, mais le concept tel qu'il existe aujourd'hui a été introduit en 2009 (Erekath et al., 2024). La Figure 1.3 montre un exemple de ferme verticale, située à Vaudreuil-Dorion, au Québec.



Figure 1.3 Ferme verticale de la ferme d'hiver à Vaudreuil-Dorion
Tiré du site fermedhiver.com

Les fermes conteneurs (FC) consistent, comme leur nom l'indique, à réutiliser des conteneurs de transport et de les aménager pour produire des fruits, légumes et autres plantes. L'objectif est de pouvoir créer des systèmes de production végétale rapides à mettre en place, économiques et permettant de produire à la fois en milieu urbain et dans les régions isolées. Un exemple de FC, installée à l'École de Technologie Supérieure à Montréal, est présenté Figure 1.4. Cette FC fera l'objet de l'étude du chapitre 5.



Figure 1.4 Ferme conteneur installée à l'École de Technologie Supérieure

Il existe donc plusieurs types d'EPVI différents, dont l'objectif est toujours le même : produire peu importe les conditions extérieures, dans des zones aussi bien très urbanisées qu'isolées. Ces espaces nécessitent un contrôle du climat important et donc une connaissance précise de leur fonctionnement énergétique.

1.2 Balance énergétique des espaces d'AEC

Afin d'améliorer les performances énergétiques des espaces d'AEC, il est important de connaître leur balance énergétique, caractérisée par les flux d'énergies entrants et sortants, représentés sur la Figure 1.5.

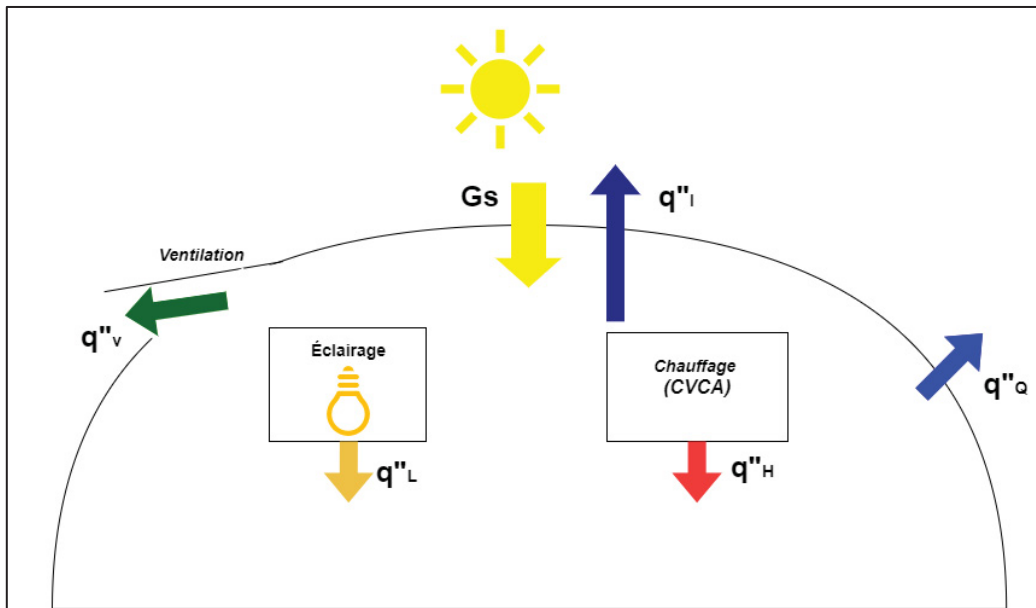


Figure 1.5 Flux d'énergie dans un espace d'AEC

Ici G_s représente la radiation solaire par unité de surface au sol de la serre (W/m^2), q''_H la capacité de chauffage (W/m^2), q''_L l'énergie thermique apportée par l'éclairage (W/m), q''_v les pertes par la ventilation (W/m^2), q''_Q les pertes radiatives (W/m^2), q''_I les pertes par conduction au travers des parois (toiture et pignons), dépendantes de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur et du coefficient de transfert thermique, puis par convection entre la couverture et l'extérieur, influencée par les conditions météorologiques (notamment la vitesse du vent)

(Geelen et al., 2021). La balance énergétique simplifiée en régime permanent d'un espace d'AEC peut alors être décrite par l'équation (1.1) :

$$G_s + q_H'' + q_L'' = q_I'' + q_V'' + q_Q'' \quad (1.1)$$

Si la somme des flux entrants est plus importante que la somme des flux sortants, alors la température dans la serre augmente. À l'inverse, si les flux entrants sont plus faibles que les flux sortants, alors la température diminue (Geelen et al., 2021). Pour atteindre l'équilibre thermique, les échanges de chaleur pilotables (chauffage, ventilation, rafraîchissement, et éclairage) doivent compenser les échanges thermiques subis par l'espace, notamment les apports de rayonnement solaire ainsi que les pertes par ventilation, conduction, convection et rayonnement vers l'environnement extérieur. Cela entraîne généralement une consommation énergétique (majoritairement électrique) importante.

Selon le type d'espace, les différents termes n'auront pas la même importance. Pour les serres, la majorité de l'énergie provient du rayonnement solaire G_s . Elles peuvent également être équipées de systèmes de chauffage, notamment dans le cas des serres industrielles, ainsi que d'éclairage, mais cela n'est pas systématique.

Pour les EPVI, le terme de radiation solaire disparaît, ces espaces possédant des parois opaques. Un éclairage artificiel est donc systématiquement nécessaire pour apporter l'entièreté du rayonnement requis, et donc le terme q_L'' sera plus important que pour les serres. De plus, l'installation d'un système CVCA est systématique dans ces espaces, contrairement aux serres. L'ensemble de ces équipements engendrent une plus grande consommation énergétique.

Nous voyons donc que l'installation d'équipements techniques, notamment de systèmes CVCA et d'éclairage artificiel, est essentielle pour assurer les conditions de culture intérieures. Ces équipements entraînent une consommation énergétique pouvant être importante. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies de contrôle adaptées afin d'optimiser la gestion du climat et la consommation énergétique. La mise en place du contrôle d'un espace d'AEC est présentée dans la partie suivante.

1.3 Stratégie de contrôle des espaces d'AEC

Étudier le contrôle des espaces d'AEC est essentiel dans le but de réduire la consommation énergétique de ces espaces et d'augmenter la production de culture. Avant de réaliser ce contrôle, il faut définir différentes variables afin de donner une définition à la notion de contrôle d'un espace d'AEC. Ces variables sont résumées dans la Figure 1.6.

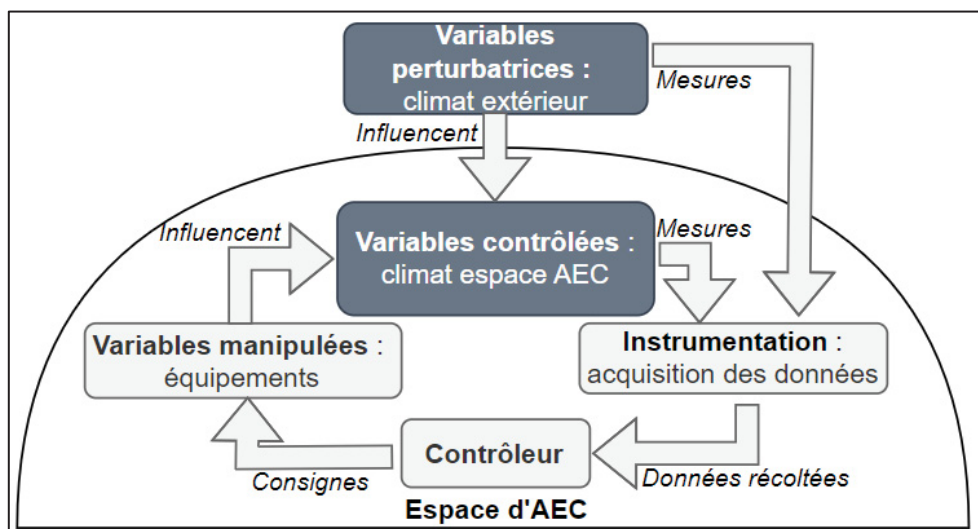


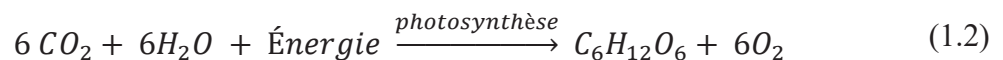
Figure 1.6 Schéma de principe du contrôle d'un espace d'AEC

Parmi les variables importantes se trouvent les variables contrôlées, qui sont les paramètres du climat intérieur destinés à être influencés (dans les espaces AEC c'est souvent la température et l'humidité de l'air intérieur ainsi que l'éclairage). Il y a ensuite les variables perturbatrices. Ce sont des variables qu'il n'est pas possible de contrôler, mais qui vont influencer les variables contrôlées. Dans la littérature sont retrouvés principalement le climat extérieur et les éléments de la serre (structure, matériaux) comme variables perturbatrices (Badji et al., 2022 ; Rodríguez, Berenguel, Guzmán, & Ramírez-Arias, 2015). Les interventions humaines telles que les récoltes, l'ouverture de l'espace pour rentrer, l'arrosage manuel peuvent aussi être considérées comme des perturbations. Enfin il y a les variables manipulées, qui sont les consignes transmises aux équipements de la serre qui vont influencer les variables contrôlées (Rodriguez et al., 2015).

Le contrôle des conditions intérieures repose sur le principe de boucle de rétroaction. Les variables contrôlées ainsi que le climat extérieur sont mesurées en continu à l'aide du système d'acquisition de données. Puis un contrôleur centralise ces données et, suivant une stratégie de contrôle défini par l'opérateur, envoie des consignes aux variables manipulées et donc aux équipements. L'action de ces équipements va influencer l'environnement intérieur. L'effet de ces actions sur cet environnement est à son tour mesuré et réintégré en entrée du contrôleur, constituant ainsi la boucle de rétroaction. Les différents paramètres contrôlables ainsi que l'instrumentation nécessaire seront décrits dans une première partie, puis les principaux équipements présents dans les espaces d'AEC seront listés et expliqués. Enfin, différentes stratégies de contrôle seront décrites.

1.3.1 Paramètres à contrôler pour la croissance de végétaux

Les paramètres contrôlables sont les paramètres essentiels à la croissance des plantes, notamment à travers la photosynthèse, dont l'équation est la suivante :



Elle permet de produire du sucre ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), qui sert de source d'énergie pour la plante, et de l'oxygène (O_2). Pour cela, la plante consomme du CO_2 , absorbé par les feuilles, et d'eau, absorbé par les racines, comme présenté équation (1.2). Pour que la photosynthèse se réalise, il faut un apport d'énergie. Cet apport est apporté par la lumière (soleil ou éclairage artificiel). Réguler ces trois paramètres (le CO_2 , l'apport en eau et le rayonnement) est donc essentiel.

La photosynthèse est aussi dépendante par la température, qui influence la quantité de sucre produit et l'humidité, qui régule l'ouverture des stomates et donc l'absorption du CO_2 . Les paramètres considérés comme critiques, et donc les plus souvent contrôlés sont ainsi la température, l'humidité, la radiation lumineuse ainsi que la concentration en CO_2 (Badji et al., 2022). La gestion de l'eau avec la régulation du débit d'irrigation et des fertilisants peut aussi être ajoutée (Rodriguez et al., 2015). La partie suivante détaille pourquoi ces paramètres sont importants ainsi que l'instrumentation nécessaire et les précautions à prendre sur les mesurer.

1.3.1.1 Liste des paramètres contrôlable dans les espaces d'AEC

Le contrôle de la température est essentiel pour la croissance des plantes. En effet elle a un impact sur la quantité de sucre produite avec la photosynthèse et la respiration et influence la croissance des racines, des feuilles et des fleurs. La température optimale est aussi liée à l'humidité de la serre ainsi qu'à la concentration en CO₂. Par exemple, la température idéale pour le développement des plantes augmente lorsque la concentration en CO₂ augmente (Badji et al., 2022). Lorsque la température augmente, la photosynthèse est meilleure, jusqu'à un certain point où elle devient trop élevée et abîme les enzymes (Both et al., 2015). La température idéale dans les espaces d'AEC dépend du type de plante, mais est généralement comprise entre 10 et 30°C (Castilla, 2013). Dans les serres la température est influencée principalement par le rayonnement solaire.

Il est simple de mesurer la température, en utilisant des thermocouples, des thermistances ou des RTD (Resistance Temperature Detector). Ces capteurs sont parfois couplés avec des capteurs de mesure de l'humidité relative (Coudret, 2021). D'après Both et al. (2015), il est recommandé de mesurer la température avec une précision de 0,2°C et de calibrer le capteur une fois par an. Il doit être placé au centre de l'espace d'AEC, au niveau de la canopée. Il peut aussi être intéressant de réaliser des mesures à plusieurs endroits, afin d'étudier l'homogénéité dans l'espace.

Le capteur doit être placé dans un écran de protection ou un boîtier ventilé afin de le protéger du rayonnement extérieur, car il est sensible à ce paramètre. Il faut aussi faire attention à ne pas placer le capteur trop près d'un chauffage ou d'une ventilation.

L'humidité relative (HR) est un autre paramètre important dans les espaces d'AEC. En effet elle influence l'ouverture des stomates et donc les échanges entre la plante et son environnement, qui sont nécessaires pour la photosynthèse (Geelen et al., 2021). Si l'HR est trop importante, il y a un risque de développement de bactéries et de champignons. À l'inverse, une HR trop faible entraîne un stress hydrique des plantes. La valeur idéale pour les plantes se situe généralement entre 20 et 80% (Badji et al., 2022).

L'HR se mesure avec un hygromètre. Souvent cette mesure est couplée avec la mesure de la température (Coudret, 2021). Both et al. recommandent une précision de 5% et une calibration tous les ans. Comme pour la température, la mesure doit être réalisée au centre de l'espace d'AEC au niveau de la canopée. Il peut être intéressant de réaliser des mesures à plusieurs endroits de l'espace pour étudier son homogénéité (Coudret, 2021).

Les capteurs sont sensibles à la poussière et au rayonnement, il faut donc les placer dans un écran de protection ou dans un boîtier ventilé.

La température et l'HR sont deux paramètres fortement liés. Le diagramme d'air humide, présenté Figure 1.7, permet d'observer et d'étudier leur lien.

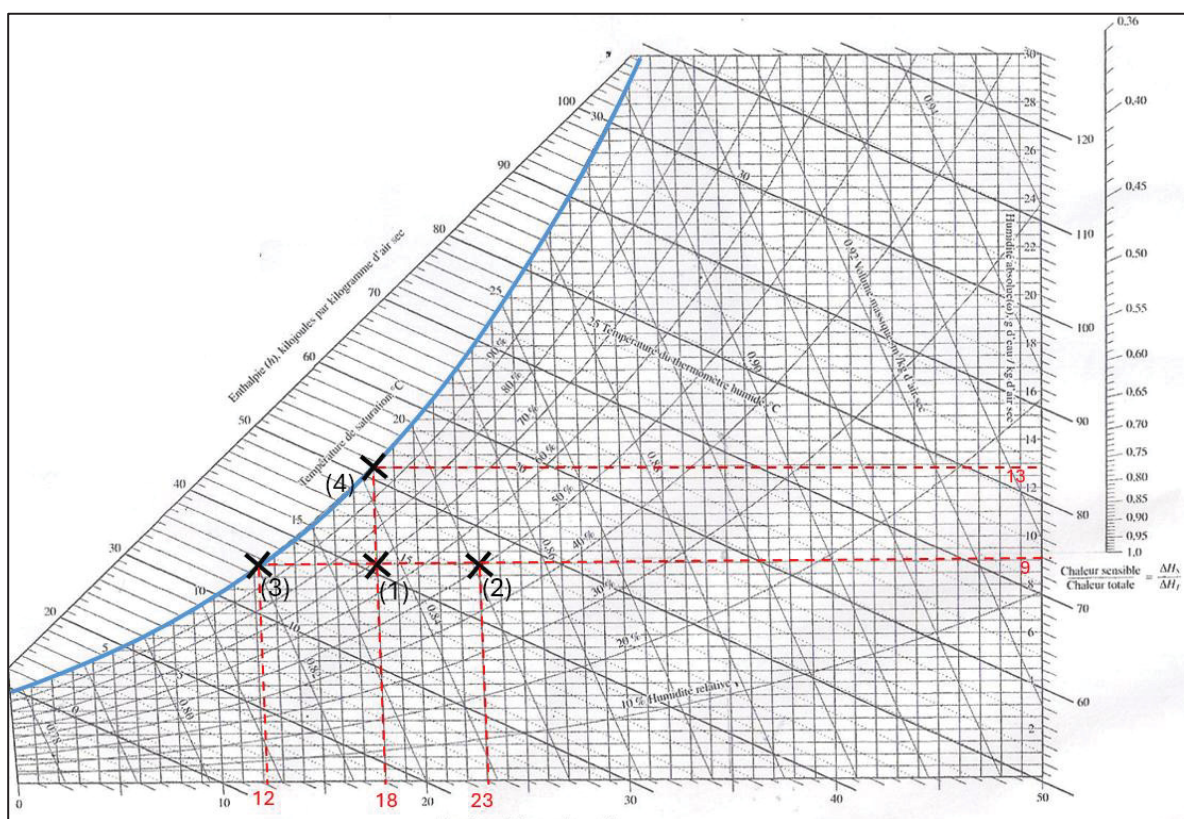


Figure 1.7 Diagramme d'air humide
Adapté de ASHRAE (1992)

L'abscisse de ce diagramme représente la température de l'air sec. C'est cette température qui est généralement mesurée par un thermomètre. L'axe vertical à droite représente la teneur en eau (ou l'humidité absolue), c'est-à-dire la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air (en g

d'eau par kg d'air sec). Ensuite, des courbes représentant l'HR sont tracées. Cette HR augmente jusqu'à la courbe bleue, qui est la courbe de saturation. Tous les points sur cette courbe représentent un air saturé, c'est-à-dire à 100% d'HR.

Ce diagramme permet d'observer que plus l'air est chaud, plus l'humidité qu'il peut contenir augmente. Ainsi, pour une même humidité absolue, l'HR de l'air diminue à mesure que la température augmente. Par exemple le point (1) est à une température de 18°C et une humidité relative de 70%. Si la température augmente avec une humidité absolue constante (jusqu'au point 2), alors l'HR diminue et passe à 50%. Lorsque la température diminue et/ou que l'humidité augmente, les conditions s'approchent de la courbe de saturation (en bleu). Lorsque les conditions atteignent cette courbe, de la condensation se forme, car l'air ne peut plus contenir davantage d'humidité. La nuit l'humidité relative augmente à cause du refroidissement de l'espace d'AEC, et peut donc arriver sur la courbe de saturation (Castilla, 2013). Ce graphique permet également de définir la température de rosée, qui représente la température à laquelle un air à pression et humidité absolue constantes va atteindre la courbe de saturation et donc commencer à condenser. Dans l'exemple précédent (condition de température et d'HR correspondant au point (1)), la température de saturation est d'environ 12°C (point 3).

Une mesure de l'HR combinée à une mesure de température permet de calculer le déficit de pression de vapeur (Vapour Pressure Deficit ou VPD) c'est-à-dire la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau maximale (à saturation ie humidité relative de 100%) et la pression partielle de vapeur à la température ambiante. Cette donnée est en kPa (Geelen et al., 2021).

À partir de la loi de Dalton (équation (1.3)), peut être déduit le calcul de la pression partielle à l'aide de l'humidité spécifique.

$$e_v = P_{tot} \cdot \frac{n_1}{n_{total}} \quad (1.3)$$

La loi de Dalton calcule la pression partielle e_v (en kPa) d'un gaz 1 dans un mélange de gaz en fonction de la pression totale P_{tot} , de la quantité n_1 de gaz 1 (en mol) et de la quantité totale

n_{tot} de mélange de gaz. De cette formule peut être calculée la pression partielle en fonction de l'humidité spécifique (équation (1.4)) :

$$e_v = \frac{\omega \cdot P_{atm}}{0,622 + \omega} \quad (1.4)$$

Avec e_v la pression partielle (kPa), P_{atm} la pression atmosphérique (kPa), ω l'humidité spécifique (kg d'eau/kg d'air sec) et 0,622 le rapport entre les masses molaires de la vapeur d'eau et de l'air sec.

Si on garde les mêmes conditions que pour l'exemple précédent (température de 18°C et humidité relative de 70%, soit le point (1)) sur le diagramme d'air humide, la pression partielle de vapeur d'eau maximale est la pression partielle au point (4) et la pression partielle de vapeur à la température ambiante correspond à la pression partielle au point (1).

Ce paramètre est souvent utilisé dans l'étude et le contrôle de l'humidité, car, contrairement à l'humidité relative, il ne dépend pas directement de la température. Les échanges hydriques entre la plante et l'air étant gouvernés par le gradient de pression partielle de vapeur d'eau entre les tissus végétaux et l'atmosphère, cette grandeur constitue un indicateur pertinent du potentiel de transpiration : plus la pression partielle de vapeur d'eau de l'air est faible par rapport à celle des feuilles, plus la transpiration est favorisée (Both et al., 2015).

L'intensité lumineuse est le premier composant de la photosynthèse. Dans les serres, le rayonnement est naturel et dépend des conditions climatiques, de la position du soleil dans le ciel, de la géométrie de la serre, de son orientation, du matériau de couverture et de la condensation de l'eau dans sa surface intérieure (Castilla, 2013).

Le type de rayonnement à contrôler et donc à mesurer est la partie du rayonnement utile à la photosynthèse, soit dans un spectre compris entre 400 et 700 nm. Il est appelé rayonnement PAR (Photosynthetically Active Radiation).

Des capteurs de rayonnement PAR existent. Ils mesurent généralement le PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density en $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), c'est-à-dire la densité de flux de photons du rayonnement PAR. Elle permet de calculer la quantité de lumière journalière reçue par unité de surface, appelée DLI (Daily Light Integral en $\text{mol}/\text{m}^2/\text{jour}$). Cette valeur est souvent utilisée

dans la littérature comme point de consigne pour le contrôle de la lumière. Dans les serres, le vitrage va engendrer une diminution du flux. Cette diminution est de plus en plus grande à mesure que le vitrage vieillit, car l'opacité de celui-ci augmente. Dans le cadre des EPVI, l'entièreté de ce rayonnement est apportée par la lumière artificielle, ces espaces possédant des parois opaques.

La précision recommandée pour ces capteurs est de 10%. Il doit être placé au niveau de la canopée, de préférence à un endroit évitant les effets d'ombre (Both et al., 2015). Il doit être installé parfaitement à l'horizontale et nettoyé régulièrement, le capteur étant sensible à la poussière (Coudret, 2021).

À partir du PPFD, il est possible de calculer l'irradiance de la source lumineuse (soleil ou lumière artificielle) en W/m^2 . Pour déterminer la puissance exacte du rayonnement, il faudrait mesurer l'ensemble du spectre à l'aide d'un spectroradiomètre, afin de connaître toutes les longueurs d'onde émises, puis calculer l'énergie totale en sommant l'énergie associée à chaque longueur d'onde. Cette énergie, propre à chaque longueur d'onde, peut être calculée à partir de la relation (1.5).

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.5)$$

Avec h la constante de Plank ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s), c la vitesse de la lumière dans le vide ($2,998 \cdot 10^8$ m/s) et λ la longueur d'onde en mètre.

L'achat d'un spectroradiomètre est cependant coûteux. Il est alors possible d'approximer l'irradiance reçue par le rayonnement PAR à l'aide de la formule (1.6).

$$q_s'' = \frac{PPFD}{Coef (source lumineuse)} \quad (1.6)$$

Avec PPFD la mesure du capteur de rayonnement PAR ($\mu mol/m^2/s$) et Coef un coefficient dépendant de la source lumineuse. Par exemple, si la source considérée est le rayonnement solaire entre 400 et 700 nm, il sera de 4,57 (Sager & McFarlane, 1997).

La concentration en CO₂ est un paramètre important pour la croissance des plantes. Plus sa concentration est grande, meilleure sera la photosynthèse, comme le montre l'équation (1.2). Dans l'air sa concentration est d'environ 430 ppm. Augmenter sa valeur dans l'espace d'AEC entre 800 et 1300 ppm permet d'augmenter de 15 à 20% la croissance des plantes (Badji et al., 2022).

Les capteurs de CO₂ déterminent sa concentration dans l'air en mesurant son absorption du rayonnement infrarouge dans la bande de longueurs d'onde comprise entre 4 000 et 4 500 nm. Cependant cette mesure peut être influencée par la température et la vapeur d'eau. Les capteurs de CO₂ sont donc souvent des capteurs intelligents, capables de compenser l'influence de la température et de l'humidité, ce qui les rend coûteux. Both et al. recommandent une précision de 3% et une calibration une fois par an. Cependant il est difficile de trouver des capteurs aussi précis, leur précision étant en général limitée à 40 ppm. Il est donc préférable de sélectionner des capteurs précis à 40 ppm (Coudret, 2021). Il doit être placé au centre de la serre, au niveau de la canopée. Au vu de son prix, un seul capteur suffit (Coudret, 2021).

Enfin, ces capteurs sont sensibles aux changements de chaleur, il faut donc les mettre derrière un écran de protection ou dans un boîtier ventilé.

L'apport en eau et en nutriments est essentiel pour la croissance des plantes. En effet, l'eau compose 70 à 95% de la masse d'une plante fraîche (Both et al., 2015 ; Rodríguez et al., 2015, (Kramer & Boyer, 1995).. La quantité d'eau disponible a donc un impact sur la croissance et le développement des plantes (Both et al., 2015). Une baisse de 10% de la disponibilité en eau peut avoir un effet sur le développement de la plante. Cela diminue la taille des feuilles, rend la plante plus rigide et endommage de façon définitive son tissu (Both et al., 2015). De plus, les nutriments sont généralement apportés grâce à l'eau d'irrigation (Both et al., 2015). Le suivi du pH et de la conductivité électrique (CE) du substrat est indispensable pour ajuster les apports en fertilisants : le pH influence la disponibilité des nutriments, tandis que la CE reflète leur concentration globale dans la solution nutritive. Une précision de 5% et une calibration toutes les semaines des capteurs sont recommandées (Both et al., 2015).

L'apport en eau et en nutriments est alors régulé en mesurant et adaptant le débit dans les circuits d'irrigation, en fonction des mesures de pH et de CE, notamment pour les cultures en bancs hydroponiques (présentés plus bas), souvent utilisées dans les espaces d'AEC.

1.3.1.2 Tableaux de synthèse

Les variables contrôlables sont les paramètres essentiels à la croissance des plantes. Le Tableau 1.1 résume l'ensemble de ces paramètres, la raison pour laquelle ils sont importants ainsi que le choix du capteur pour le mesurer, sa précision et son emplacement. Leurs précisions sont des facteurs qui vont déterminer la précision et le temps de réponse du contrôleur et peuvent ainsi être des paramètres limitants.

Tableau 1.1 Bilan des variables contrôlables

Variable	Pourquoi la contrôler	Capteur associé	Emplacement capteur	Précision recommandée
Température	Influence respiration, croissance des racines, des feuilles et des fleurs	Thermocouple Thermistance RTD	Au centre de la serre, au niveau de la canopée	0,2°C
Humidité relative	Influence ouverture stomates et donc les échanges entre la plante et l'environnement	Hygromètre	Au centre de la serre, au niveau de la canopée	5%
Rayonnement	Composant de la photosynthèse	Capteur PAR	Au niveau de la canopée en minimisant les effets d'ombre	10%
CO₂	Composant de la photosynthèse	Capteur CO ₂	Au niveau de la canopée	40 ppm
Irrigation	Essentiel pour la croissance des plantes	Débitmètre	Dans le circuit d'irrigation	
Apport en nutriments	Essentiel pour la croissance des plantes	Mesures pH et CE du substrat	Dans le substrat	5%

Le Tableau 1.2 regroupe les valeurs cibles pour différentes plantes concernant la température l'humidité l'éclairement ainsi que le taux de dioxyde de carbone.

Tableau 1.2 Valeur cible de différentes variables contrôlables en fonction du type de plante

Tiré de Schimelpfenig (2022)

Type de plante	Température [°C]	Humidité relative [%]	DLI [mol/m ² /j]	CO ₂ [ppm]
Concombres	18 – 27	60 – 70	15 – 30	750 à 1500
Tomates	18 – 27	60 – 90	20 - 30	
Poivre	18 – 29	60 - 90	20 – 30	
Fraises	10 - 25	40 - 95	17 - 20	

Pour être dans ces valeurs cibles, l'espace d'AEC doit être régulé et pour cela des équipements doivent être installés.

1.3.2 Équipements présents dans les espaces d'AEC

Afin de réguler les paramètres contrôlables, il existe de nombreux équipements. Les paramètres climatiques étant quasiment tous couplés, ces équipements influencent en général plusieurs paramètres à la fois, ce qui rend la régulation difficile. Les plus communs sont présentés dans la suite, en précisant les paramètres qu'ils influencent.

1.3.2.1 Ventilation

La ventilation est essentielle pour quasiment tous les espaces d'AEC. Elle peut jouer deux rôles différents.

Le premier rôle est de renouveler l'air intérieur par de l'air extérieur. Ces échanges d'air influent sur l'humidité, la température ainsi que la concentration en CO₂ dans la serre (Castilla, 2013 ; Geelen et al., 2021). Dans les serres, la ventilation est souvent utilisée pour refroidir l'espace, le déshumidifier ainsi que pour garder une concentration en CO₂ suffisante. Elle peut être naturelle ou forcée.

La ventilation naturelle crée des mouvements d'air grâce à la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la serre (Badji et al., 2022). Cette ventilation est généralement réalisée à l'aide de toits ouvrants. Ce système est très commun dans les serres et à l'avantage d'être peu cher. Cependant le volume d'air échangé est imprévisible et dépend des conditions

extérieures (Geelen et al., 2021). La Figure 1.8 présente un toit ouvrant d'une serre à Kuujjuaq, Nunavik.



Figure 1.8 Toit ouvrant d'une serre à Kuujjuaq
Adapté de Piché (2021)

La ventilation forcée ou mécanique utilise des ventilateurs afin de forcer les mouvements d'air en créant une pression positive ou négative dans la serre (Badji et al., 2022). Ce système a l'avantage de pouvoir contrôler la quantité d'air renouvelée, mais demande plus d'installations et consomme de l'énergie, ce qui augmente les coûts (Geelen et al., 2021).

Il existe un autre système de ventilation appelée Fan-Pad. Ce système permet de refroidir et d'humidifier la serre (Badji et al., 2022). Il est surtout utilisé dans les régions chaudes et sèches. Des « pads » (tampons de refroidissement en français) sont installés d'un côté de la serre et des ventilateurs de l'autre. L'air extérieur entre par des Pads, humidifiés à l'aide de systèmes goutte à goutte. Au cours de ce passage, une partie de l'eau s'évapore, ce qui refroidit et humidifie l'air entrant (Castilla, 2013 ; Geelen et al., 2021). Ce phénomène correspond à un refroidissement évaporatif adiabatique : en l'absence d'échange de chaleur significatif avec l'environnement, l'enthalpie de l'air humide reste pratiquement constante. L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est prélevée sur la chaleur sensible de l'air, qui est convertie

en chaleur latente. L'air devient ainsi plus humide et sa température diminue. Cette transformation peut être visualisée sur le diagramme d'air humide (Figure 1.9).

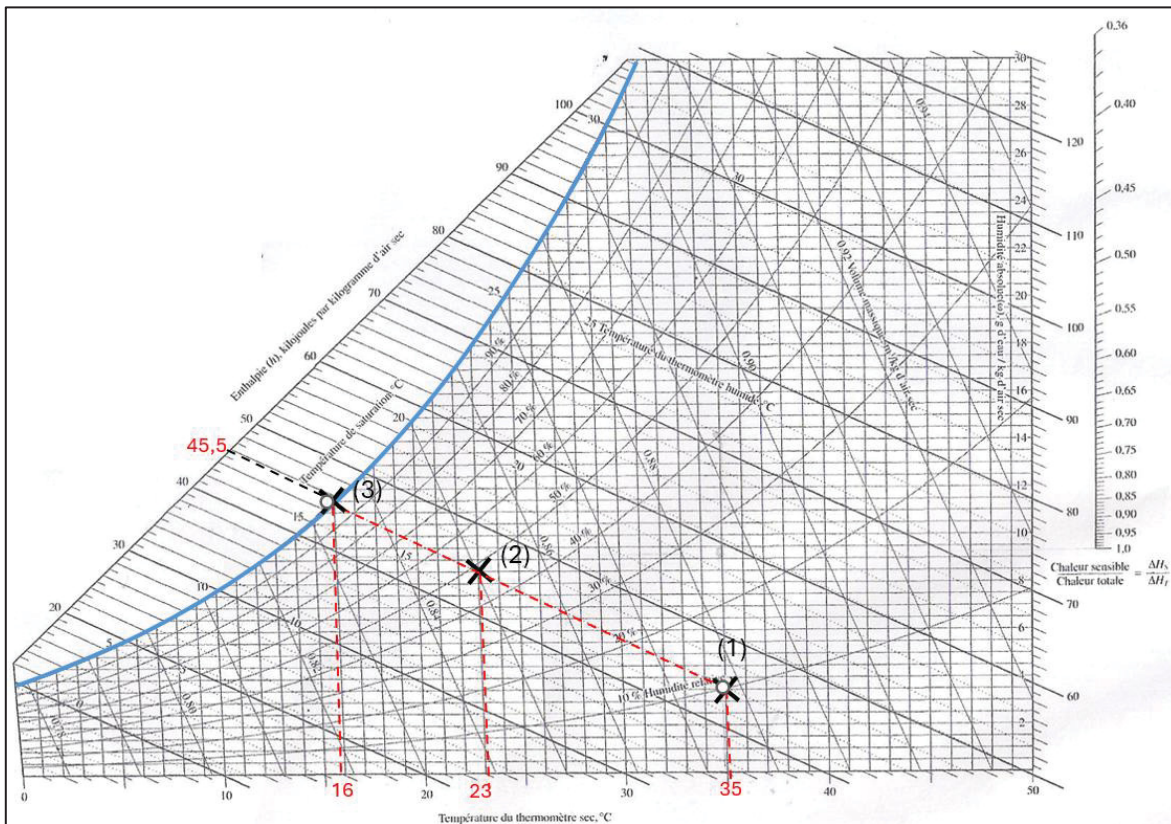


Figure 1.9 Refroidissement isenthalpique sur le diagramme d'air humide
Adapté de ASHRAE (1992)

Par exemple, un air entre à une température de 35°C et une humidité relative de 10% (1). L'évaporation va faire bouger l'état de l'air le long de la droite allant de (1) à (3), qui est la droite d'enthalpie constante. Par exemple le point (2) est à 23°C et quasiment 50% d'humidité relative. Les caractéristiques de l'air tendent vers le point de température humide (T_h) qui est le point sur la courbe de condensation lors d'un refroidissement à enthalpie constante (point 3). Le défaut de ce système Fan-Pad est qu'il crée un gradient de température dans la serre. En effet il peut y avoir 4 à 8° de différence entre un côté et l'autre (Geelen et al., 2021). Son efficacité se réduit également lorsque l'humidité extérieure est élevée (le point (1) se « rapproche » du point (3)). Enfin, ce dispositif entraîne une augmentation de l'humidité à

l'intérieur de la serre. La Figure 1.10 montre un ventilateur à pression positive d'une serre à Kuujjuaq au Nunavik.



Figure 1.10 Ventilateur à pression positive d'une serre à Kuujjuaq, Nunavik

Le deuxième rôle de la ventilation est de créer des mouvements d'air à l'intérieur de l'espace afin d'homogénéiser le climat intérieur. Ce mouvement d'air est essentiel, afin de créer un microclimat actif autour des plantes (Geelen et al., 2021). Cela joue sur la température des feuilles, l'évaporation, l'humidité et l'apport de CO₂. Pour cela des ventilateurs horizontaux placés dans la serre sont souvent utilisés (Geelen et al., 2021). Un exemple de ventilateur installé dans une serre à Magog est présenté Figure 1.11.



Figure 1.11 Ventilateur pour la circulation de l'air dans l'espace

1.3.2.2 Chauffage et climatisation

Il existe plusieurs systèmes pour chauffer les espaces d'AEC de façon active. Pour cela, deux sources d'énergie sont principalement utilisées : les combustibles et l'électricité.

Les combustibles sont utilisés dans des générateurs d'air chaud (Badji et al., 2022). Il existe plusieurs types de combustibles. Aujourd'hui le mazout est la source d'énergie la plus commune. Cependant, d'autres combustibles comme le propane, le butane ou les gaz naturels (méthane) peuvent être utilisés. Ces derniers sont plus chers que le mazout, mais produisent moins de gaz à effet de serre. Par exemple les émissions passent de 2 753 g/L pour le mazout à 1 515 g/L pour le propane (Pelletier & Godbout, 2017). Ces derniers ont aussi des rendements de combustion plus importants. En effet le mazout a un rendement entre 70 et 85%, le gaz naturel entre 75 et 95% et le propane entre 80 et 92% (Berger & Brazeau, 2018). Parfois, le CO₂ émis peut être réutilisé pour la photosynthèse des plantes (Castilla, 2013). Les générateurs sont constitués de plusieurs parties : un brûleur ou une chambre de combustion, un échangeur de chaleur pour transférer la chaleur vers le fluide du circuit de chaleur (dont la description est réalisée ci-dessous) et une cheminée pour évacuer les gaz (Castilla, 2013). Entre 2015 et 2020, la superficie de serre chauffée au mazout au Québec a été réduite de 10%. Ce chauffage est en effet remplacé par des chauffages à la biomasse et les nouvelles serres sont en général équipées de système de chauffage électrique (Pelletier & Godbout, 2017).

La deuxième source d'énergie utilisée est l'électricité. Elle sert principalement pour faire fonctionner une thermopompe, qui extrait la chaleur d'une source froide vers une source chaude (Badji et al., 2022). Cela nécessite une demande électrique importante. Cependant, depuis 2020, un tarif préférentiel rend cette énergie plus attractive (Hydro Quebec, 2026). De plus, cette énergie produit moins de gaz à effet de serre qu'un générateur à air chaud utilisant un combustible. Cela est d'autant plus vrai que 94% de l'électricité provient de l'hydroélectricité au Québec (Régie de l'énergie du Canada, 2021). Les thermopompes peuvent utiliser l'air extérieur ou de l'eau circulant dans un circuit comme source froide. Les sources chaudes peuvent être soit l'air de l'espace ou un circuit d'eau chaude. Certaines thermopompes

utilisant l'air comme source froide (thermopompes air-air ou air-eau) sont réversibles et peuvent utiliser l'air extérieur comme source chaude et l'air intérieur ou le fluide caloporteur comme source froide. Les thermopompes eau-eau le sont aussi en général, à condition d'avoir un réseau d'émission (circuits d'eau des sources chaudes et froides) adapté. Elles peuvent alors servir à refroidir, voir déshumidifier dans le cas de thermopompes eau-eau, de façon active les serres ou les EPVI. Cela permet un meilleur contrôle du climat. Un échangeur de chaleur permet de chauffer (ou refroidir) le fluide transportant la chaleur dans l'espace (air ou eau). Les thermopompes sont caractérisées par leur coefficient de performance (COP) qui est le rapport entre l'énergie thermique produite et l'énergie électrique consommée. Pour le chauffage, les COP moyens sont de 3 pour les thermopompes air/eau et de 4,3 pour les thermopompes eau/eau (ADEME, nertech, Dupret, & Bramkamp, 2025). Ces COP sont influencés par les températures des sources chaudes et froides. Par exemple, une thermopompe air-eau va être moins performante lorsque les températures extérieures sont fortement négatives, comme cela peut être le cas au Québec. Par exemple, la thermopompe air-eau installée dans la ferme conteneur de l'ÉTS a un COP de 5,8 à 20°C, mais seulement de 2,62 à -15°C d'après sa fiche technique (Hydro Solar, 2024).

Une fois la source d'énergie définie, il faut ensuite diffuser la chaleur dans l'espace. Pour cela deux fluides de transport peuvent être utilisés : l'air ou l'eau (Geelen et al., 2021).

Des tuyaux d'eau chaude peuvent parcourir l'espace à chauffer. Ces tuyaux sont positionnés au niveau des plantes et peuvent être sur plusieurs étages. Ils permettent de transporter la chaleur et de la diffuser de façon efficace dans tout l'espace. Il faut cependant faire attention à la température des tuyaux. En effet, une température trop importante proche des plantes peut causer une évaporation importante, ce qui augmente l'humidité et peut causer de la condensation si cet air chaud et humide proche des tuyaux atteint un air plus froid en montant vers le toit (Geelen et al., 2021).

L'autre fluide utilisé est l'air. Le système de chauffage peut directement chauffer l'air à proximité et le souffler dans l'espace. C'est le cas avec la plupart des brûleurs. Le défaut de ce système est qu'il a des performances faibles. En effet seul l'air à proximité du point de chauffage est chaud, ce qui demande plus d'énergie et crée aussi une faible uniformité de température dans l'espace d'AEC. Pour y remédier, des tubes d'air (ou ballon d'air) sont

utilisés. Ce sont des tubes en plastiques percés à intervalles réguliers qui parcourent l'espace de culture. En général un mélange d'air de l'espace d'AEC et d'air extérieur, préalablement réchauffé avec une pompe à chaleur ou un chauffage par combustion), est soufflé dans ces tuyaux. Ils peuvent être placés en hauteur ou au niveau de pied des plantes.

1.3.2.3 Ombrages et toiles occultantes

Le but des systèmes d'ombrage est de limiter la radiation solaire pour éviter les hautes températures. Pour cela, une toile est déployée lorsque la radiation est trop importante. Ces systèmes peuvent être ouverts et fermés soit manuellement soit de façon automatisée selon le type de contrôle choisi. La Figure 1.12 présente un ombrage installé dans une serre.

Il existe aussi des toiles occultantes, qui servent à garder la chaleur pendant la nuit (Castilla, 2013). Elles vont se déployer la nuit pour éviter les pertes radiatives des plantes dans les régions plus froides.



Figure 1.12 Ombrage dans une serre
Tiré de hatice (2022)

1.3.2.4 Déshumidification

La déshumidification peut être régulée de façon passive ou active. La déshumidification passive est réalisée avec des ouvrants, comme présentée plus haut. Dans ce cas, l'air humide (absolue) de la serre est remplacé par de l'air qu'on espère plus sec. Cette méthode est moins gourmande en énergie qu'une solution active. Elle est cependant dépendante des conditions climatiques extérieures. La variation d'humidité dépend alors de la différence entre l'humidité absolue intérieure et l'humidité absolue extérieure (en g/m^3) et du taux de ventilation (en $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$), c'est-à-dire la quantité d'air neuf qui entre par unité de surface de l'ouvrant par heure. Ce taux de ventilation dépend lui-même de la taille d'ouverture de l'ouvrant, de la vitesse du vent et de sa direction et de la différence de température entre la serre et l'extérieur. Plus la différence d'humidité absolue est faible, plus le taux de ventilation doit être fort pour réduire l'humidité intérieure (Geelen et al., 2021).

La déshumidification peut aussi être réalisée de façon active avec des systèmes de chauffage et refroidissement, comme des thermopompes par exemple. Le principe consiste à refroidir l'air en dessous du point de rosée à l'aide d'un premier échangeur de chaleur (batterie froide) pour faire condenser l'eau présente dans cet air. Plus la température de l'air descend en dessous du point de rosée, plus il sera déshumidifié. Il doit cependant ensuite être réchauffé à la température souhaitée dans l'espace à l'aide d'un deuxième échangeur de chaleur (batterie chaude). Cette déshumidification peut être observée sur le diagramme d'air humide Figure 1.13.

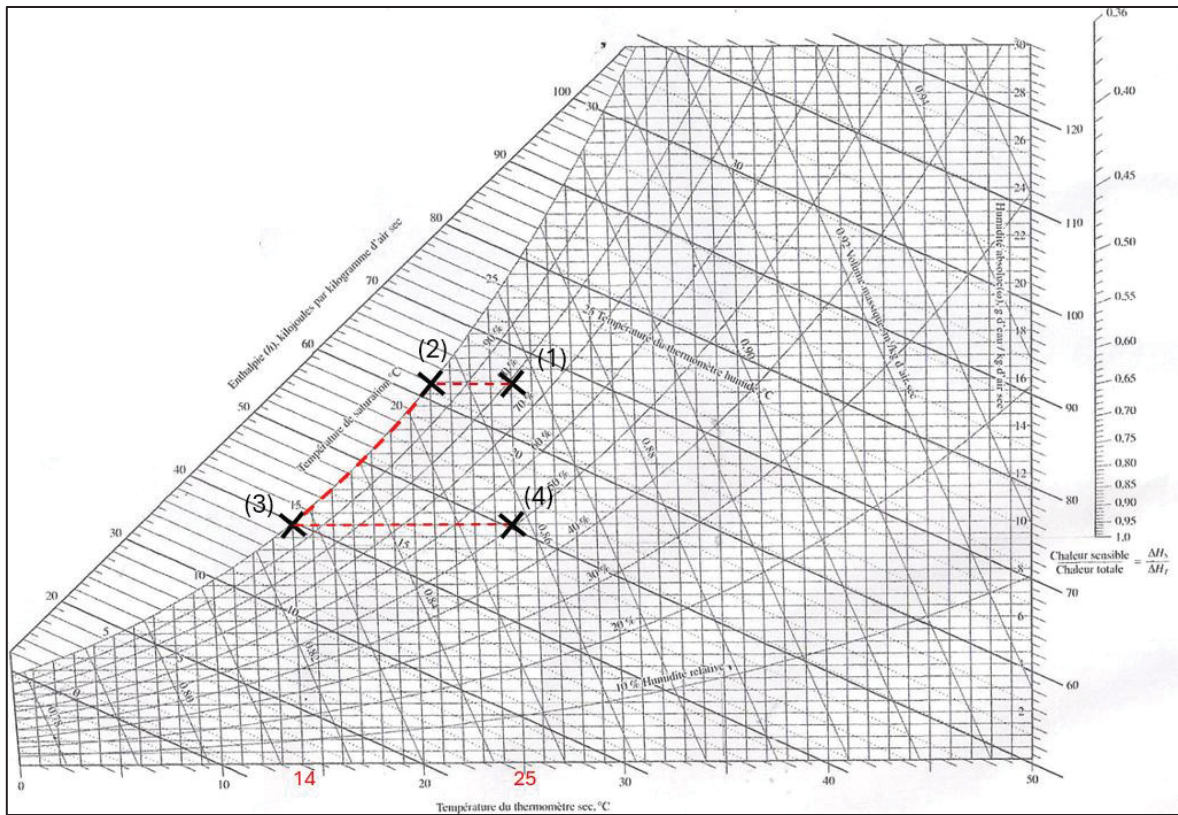


Figure 1.13 Déshumidification sur un diagramme d'air humide

Adapté de ASHRAE (1992)

Admettons que l'espace de culture ait un air à 25°C et 80% d'humidité (point 1). Le premier échangeur fait baisser la température jusqu'au point de rosée (point 2). À ce moment l'air est saturé (100% d'humidité relative). Si la température continue d'être baissée, les caractéristiques de l'air refroidi vont suivre la courbe de saturation. À ce moment l'eau présente dans l'air se condense. Arrivé au point (3), l'air est plus frais et contient une humidité absolue moins grande (mais toujours une humidité relative de 100%). À ce moment-là, la batterie chaude permet d'augmenter sa température à celle de consigne (point 4). Cette variation se fait à humidité absolue constante. L'air est donc de nouveau à 25°C, mais moins humide, avec une humidité relative de 50%. Plus l'air est refroidi, plus le point (3) sera bas sur la courbe de rosée et donc moins l'air sera humide. Cela nécessite cependant une puissance de refroidissement plus importante. De plus, pour de nouveau avoir de l'air à 25°C, celui-ci doit être plus réchauffé, ce qui demande également une puissance de chauffage plus importante.

Cette solution permet un meilleur contrôle de la déshumidification, mais entraîne une consommation énergétique plus importante.

1.3.2.5 Lumière artificielle

Comme expliqué précédemment, le rayonnement est essentiel pour la photosynthèse des plantes et donc pour leur croissance et leur rendement. Il peut ainsi être utile d'installer un éclairage artificiel pour compléter ce rayonnement et donc améliorer le rendement des productions et la durée de la saison. Ces installations sont essentielles dans EPVI, ces espaces ne recevant aucune lumière extérieure.

Il existe plusieurs types de lampes pour créer un éclairage artificiel : au sodium, fluorescentes, HID (décharge à haute intensité) ou à LED par exemple (Chen et al., 2025 ; Conseil des académies canadiennes, 2024 ; Schimelpfenig, 2022b). La technologie préférée aujourd'hui est les lampes à LED. En effet, elles ont l'avantage de consommer moins d'énergie et de chauffer moins, ce qui permet de les installer plus proche des plantes et de pouvoir mettre une plus grande intensité lumineuse. Leur spectre d'émission peut aussi être modifié. Cela est utile, car les différentes parties du spectre n'ont pas le même effet sur les cultures. Par exemple, la lumière bleue augmente le métabolisme, mais engendre des plantes plus petites et compactes. Il est estimé que 5 à 30% du spectre doit être bleu pour la photosynthèse (Schimelpfenig, 2022b). Le rouge, quant à lui, reste la longueur d'onde qui contribue le plus fortement à la photosynthèse. De plus, les diodes rouges possèdent la meilleure efficacité photonique, comme présentée dans le Tableau 1.3. L'efficacité photonique (en $\mu\text{mol}/\text{J}$) représente la capacité d'un éclairage à convertir l'énergie électrique (en J) en énergie lumineuse (en μmol).

Tableau 1.3 Efficacité photonique en fonction de la longueur d'onde
Tiré de Schimelpfenig (2022)

Couleur	Longueur d’onde	Efficacité des photons [μmol/J]
Bleu	450	2,8
	500	2,0
Vert	530	1,3
Orange	620	3,4
Rouge	635	2,5
	660	4,1
	730	3,6
	850	3,0

Un bon ratio entre les lumières rouge et bleu permet d’augmenter le rendement et de minimiser les problèmes de qualité. Par exemple, une étude sur la tomate de serre a démontré qu'un ratio entre le rouge et le bleu de 19 pour 1 permettrait d'obtenir la production de biomasse la plus élevée (hors fruits) (Deram, Lefsrud, & Orsat, 2014).

Dans certains cas, les lampes à sodium peuvent être préférées. En effet, ces lampes chauffant plus, leur utilisation permet de réduire les besoins de chauffage (Conseil des académies canadiennes, 2024).

L’éclairage artificiel est un investissement important. Le prix de l’installation peut aller jusqu’à 50% du prix total des équipements (Schimelpfenig, 2022b). Le retour sur investissement d’une telle technologie dépend du type de plante, du type d’installation, de l’emplacement géographique, des soutiens possibles des services publics au financement ainsi que du coût énergétique et du coût des installations.

Le contrôle de l’éclairage se base sur le Daily Light Integral (DLI), c’est-à-dire l’accumulation totale de lumière en une journée sur une surface donnée, exprimée en mol/m²/jour. Pour cela des capteurs PAR, mesurant le PPFD sont utilisés (la description de ces paramètres a été

réalisée dans la section 1.2.1.1). Pour réaliser le contrôle, un DLI maximal est alors choisi en fonction des besoins et des caractéristiques de la plante et les LED sont contrôlées à l'aide des données récoltées par le capteur. Pour les serres il faut faire attention à prendre aussi en compte le DLI de la lumière naturelle dans le contrôle des lampes.

Il existe différents moyens d'optimiser l'éclairage. Il convient d'abord de privilégier la lumière directe en plaçant l'éclairage au-dessus des plantes, voire dans la canopée, notamment pour les plantes qui poussent en hauteur. Il peut aussi être intéressant, si le système le permet, d'ajuster le spectre des lampes en fonction de la croissance et des besoins de la plante. Il faut aussi veiller à maintenir une uniformité dans l'éclairage. Un système uniforme donne un meilleur rendement, mais demande plus de lampes et donc coûte plus cher. À l'inverse, un système avec moins de lampes donnera un éclairage moins uniforme, mais coûtera moins cher (Schimelpfenig, 2022).

1.3.2.6 Taux de dioxyde de carbone (CO₂)

Comme expliqué au chapitre précédent, le CO₂ est essentiel pour la photosynthèse et donc pour la croissance des plantes. Cependant, cette concentration peut diminuer et passer sous le niveau extérieur à cause de la consommation des plantes lors de la photosynthèse (Badji et al., 2022). De plus, augmenter sa concentration au-dessus de celle naturellement présente dans l'air peut être intéressant, pour augmenter la photosynthèse. Pour cela il existe différentes solutions : la ventilation, le CO₂ stocké et les brûleurs (Geelen et al., 2021).

La ventilation permet de renouveler l'air intérieur de l'espace d'AEC qui s'est appauvri en CO₂ avec de l'air extérieur plus riche en CO₂. C'est la solution la moins chère et la plus simple. Badji et al. (2022) recommandent donc de privilégier au maximum cette méthode. Il est cependant possible d'aller plus loin, en augmentant artificiellement la concentration en CO₂ dans la serre.

Pour cela, du CO₂ pur stocké sous forme liquide dans des bouteilles peut être utilisé (Castilla, 2013). Il passe ensuite dans un système de dépressurisation puis est vaporisé dans la serre. Il faut donc régulièrement acheter du CO₂ liquide pour refaire le stock. L'avantage de cette solution est qu'il est facile de contrôler la quantité de CO₂ injectée dans l'espace ainsi que le moment où il est injecté (Barendregt et al., 2024 ; Castilla, 2013). Cependant, cette solution

est plus coûteuse, notamment à cause de l'achat initial (Barendregt et al., 2024), mais aussi de l'achat régulier de CO₂ liquide (Castilla, 2013). Elle demande également une maintenance régulière (Barendregt et al., 2024). Cette solution convient bien pour de grands espaces (Barendregt et al., 2024).

Une deuxième solution consiste à utiliser des brûleurs à gaz. Le gaz le plus souvent utilisé est le gaz naturel. Il faut prendre des précautions avec ce type de système, car si la combustion n'est pas complète, le brûleur va émettre des gaz toxiques tels que le monoxyde de carbone (Castilla, 2013). Pour éviter cela, il faut assurer un apport d'air extérieur suffisant afin qu'il y ait toujours assez d'oxygène pour la combustion. Cet apport est réalisé directement au niveau du brûleur, généralement au moyen d'un ventilateur dédié. Cela permet de renouveler l'air au niveau du brûleur sans le renouveler dans tout l'espace de culture, ce qui ferait diminuer la concentration de CO₂ et serait donc contre-productif. Lors de la combustion, il y a la création de vapeur d'eau, ce qui augmente l'humidité de l'espace d'AEC (Barendregt et al., 2024). Il est important de prendre en compte ce paramètre lors du contrôle de l'humidité. L'avantage de cette solution est que ses coûts sont moins élevés que pour le CO₂ en bouteilles (Barendregt et al., 2024). Il existe aussi des versions de petits brûleurs qu'il est possible d'installer directement dans l'espace d'AEC (Castilla, 2013). Ces systèmes sont faciles à mettre en place, mais il est plus difficile de contrôler précisément la quantité de CO₂ injectée dans la serre.

Enfin, si la serre utilise un système de chauffage à combustible ou qu'un bâtiment proche possède ce type d'équipement, il est possible de récupérer les gaz d'échappement de cette unité et de les réinjecter dans la serre (Castilla, 2013). Ces brûleurs sont généralement assez grands, il est donc plus facile de contrôler la quantité de CO₂ injectée dans l'espace (Castilla, 2013).

1.3.2.7 Irrigation

L'irrigation et l'apport en nutriments sont essentiels pour les plantes. Il est donc intéressant de réguler ces apports efficacement, afin de répondre aux besoins des plantes tout en réduisant la consommation en eau et en énergie. Lorsque les plantes sont plantées en terre, l'irrigation peut être réalisée en arrosant la surface ou en passant des tuyaux dans le sol (Badji et al., 2022). D'autres types d'irrigation plus perfectionnés existent avec les tables inondantes ou les NFT (Nutrient Film Technique). Dans les tables inondantes les racines des plantes sont

périodiquement immergées dans un mélange d'eau et de nutriments. Pour les NFT, la solution nutritive circule dans des tuyaux en PVC et nourrit les plantes par les racines (Ponce et al., 2015). Cette solution nutritive est réalisée dans une cuve avec un contrôleur régulant les nutriments, le pH et la conductivité électrique de la solution (Ponce et al., 2015).

1.3.2.8 Tableaux de synthèse

Afin de réguler les différentes variables contrôlables, de nombreux équipements existent. Les principaux ont été répertoriés dans cette partie et sont résumés dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 Principaux équipements présents dans la littérature

Catégorie	Équipement	Variables influencées	Avantages	Inconvénients
Ventilation	Naturelle	Température Humidité CO ₂	Peu cher	Pas de contrôle sur le volume d'air échangé
	Forcée ou mécanique	Température Humidité CO ₂	Contrôle de la quantité d'air renouvelé	Consomme plus d'énergie, coût plus élevé
	Ventilation intérieure	Température feuilles Évaporation Humidité CO ₂	Crée un microclimat actif	
Chauffage et/ou climatisation	Thermopompe	Température Humidité	Pas de gaz à effet de serre	Consommation électrique plus importante
	Générateur à air chaud	Température Humidité CO ₂		Gaz à effet de serre (peut être réutilisé pour la photosynthèse des plantes)

Catégorie	Équipement	Variables influencées	Avantages	Inconvénients
Ombrages		Température	Évite les pertes radiatives la nuit/garde la chaleur la journée selon l'utilisation	
Lumière artificielle	LED	Rayonnement PAR	Consomme peu, chauffe peu, Spectre modifiable	Prix important
	Sodium	Rayonnement PAR		Chauffent (peut être un avantage selon le cadre d'utilisation) Prix important
Injecteur CO₂	Brûleur à gaz	CO ₂ Humidité Température	Coûts moins élevés par rapport à l'autre solution	Attention au monoxyde de carbone Création de vapeur d'eau Contrôle plus difficile Gaz à effet de serre
	CO ₂ liquide en bouteille		Contrôle du CO ₂ simple	Plus coûteux Maintenance régulière
Irrigation et apport en nutriments	Tables inondantes ou NFT	Irrigation Nutriment	Contrôle précis et automatisé de l'apport en nutriment	Installation plus complexe que pour des cultures classiques en sol

Maintenant que les paramètres contrôlables et les équipements permettant de les influencer sont identifiés, il faut mettre en place un contrôleur et une stratégie de régulation, afin d'envoyer des consignes aux équipements en fonction des mesures effectuées.

1.3.3 Stratégie de contrôle des espaces d'AEC

Les contrôleurs sont les appareils récoltant les données des capteurs, prennent des décisions en fonction de ces données, puis envoient des consignes de fonctionnement aux différents équipements. La précision des consignes dépend de celle des capteurs et des algorithmes choisis. Ils fonctionnent généralement en boucle fermée. Il existe une grande variété de contrôleurs, ayant des stratégies de contrôle différentes. Badji et al. (2022) et Chen et al. (2025) ont répertorié les principales stratégies présentes dans la littérature. Elles peuvent être classées en trois catégories : le contrôle classique, le contrôle avancé utilisant des modélisations du système à contrôler et le contrôle intelligent utilisant l'intelligence artificielle (Badji et al., 2022). Les principales stratégies sont listées dans le Tableau 1.5 et sont détaillées par la suite.

Tableau 1.5 Principales stratégies de contrôle d'espaces d'AEC

Tiré de Badji et al. (2022)

Type de contrôle	Stratégie de contrôle
Contrôle classique	ON/OFF
	Contrôle PID
Contrôle avancé	Modèle prédictif (MPC)
Contrôle intelligent	Contrôle à logique floue (FLC)
	Réseau neuronal artificiel (ANN)

Pour réaliser le contrôle du climat d'un espace d'AEC, il y a plusieurs points importants à prendre en compte, qui peuvent complexifier le contrôle. Premièrement, les perturbations comme le climat extérieur exercent une grande influence sur le climat intérieur et donc sur les paramètres contrôlés. De plus, comme expliqués précédemment, les différents paramètres contrôlés ont des corrélations fortes. Lorsque l'on régule un paramètre, d'autres vont être

modifiés, il faut donc être attentifs à tous les effets provoqués par les équipements. Ensuite le climat est complexe et donc difficile à modéliser précisément, ce qui joue sur les stratégies à appliquer et l'efficacité de celles-ci, lorsqu'elles utilisent ces modèles. Enfin, contrairement à la majorité des hypothèses réalisées lors du contrôle du climat des espaces d'AEC, celui-ci n'est pas homogène dans l'ensemble de l'espace (Rodríguez et al., 2015).

1.3.3.1 Contrôle ON/OFF

Le contrôle ON/OFF (tout ou rien) est le contrôle le plus simple à mettre en place. Il est basé sur les équations (1.7) et (1.8), avec Er l'erreur, c'est-à-dire la différence entre la valeur mesurée et la valeur consigne et U la consigne envoyée à l'équipement (0 pour l'éteindre éteint et 1 pour l'allumer).

$$Er = x - x_{cons} \quad (1.7)$$

$$\begin{cases} Si\ Er < 0\ alors\ U = 0 \\ Si\ Er \geq 0\ alors\ U = 1 \end{cases} \quad (1.8)$$

Des valeurs de consignes sont définies et, lorsque le paramètre à contrôler passe en dessous ou au-dessus de cette valeur, l'équipement s'allume ou s'éteint. Ce contrôle peut être amélioré en mettant en place une hystérésis. Cela permet de limiter les changements d'état des équipements lorsque le paramètre à contrôler oscille autour de la valeur de consigne. Par exemple, le chauffage s'allume si la température passe sous les 18°C, mais ne s'arrête que si la température passe au-dessus de 20°C. Ce contrôle n'est cependant pas précis (Badji et al., 2022), à cause de son fonctionnement binaire. En effet il ne permet pas de réguler la puissance de l'équipement en fonction des conditions climatiques, ce qui limite ses performances et engendre une consommation non optimisée.

1.3.3.2 Contrôle Proportionnel Intégral Dérivé (PID)

Le contrôle Proportionnel Intégral Dérivé (PID) est un type de contrôle très utilisé dans les espaces d'AEC. C'est un contrôle en boucle fermée basé sur les formules suivantes (Rodríguez et al., 2015):

$$U(t) = c_{kp}Er(t) + \frac{c_{kp}}{c_{Ti}} \int_0^T Er(\eta)d\eta + c_{kp}c_{Td} \frac{dEr(t)}{dt} \quad (1.9)$$

$$P = c_{kp}Er(t) \quad (1.10)$$

$$I = \frac{c_{kp}}{c_{Ti}} \int_0^T Er(\eta)d\eta \quad (1.11)$$

$$D = c_{kp}c_{Td} \frac{dEr(t)}{dt} \quad (1.12)$$

Ici $U(t)$ est le signal de contrôle envoyé aux équipements, $Er(t)$ est le signal d'erreur, c'est-à-dire la différence entre la valeur de consigne du paramètre contrôlé et la valeur mesurée, c_{kp} est le gain proportionnel, c_{Ti} et c_{Td} sont des constantes de temps dites intégrale et dérivée. Enfin $\frac{1}{c_{Ti}} \int_0^T E(\eta)d\eta$ et $c_{Td} \frac{dE(t)}{dt}$ sont les intégrateur et dérivateur. Ce contrôle est donc composé de trois fonctions. La Figure 1.14 présente l'influence des différents paramètres sur la réponse $y(t)$ à un échelon unitaire. Cette figure est discutée par la suite.

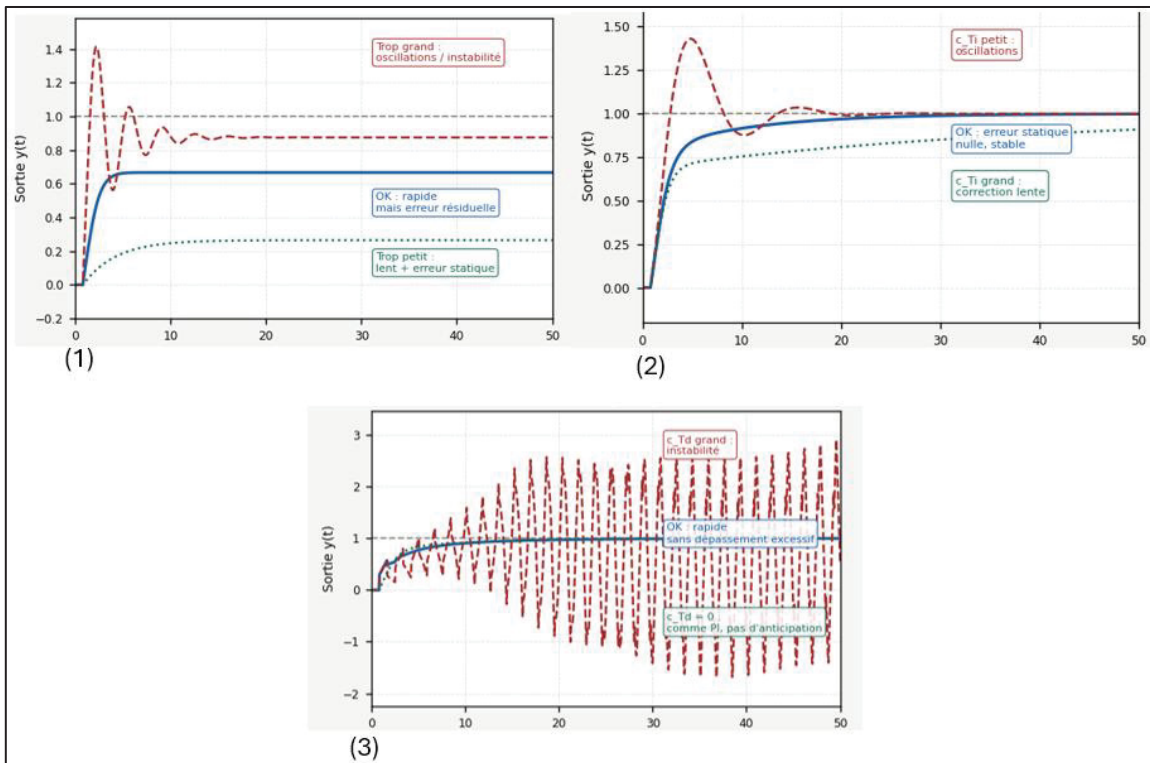


Figure 1.14 Influence des paramètres d'un correcteur PID à un échelon unitaire

Le correcteur proportionnel (P) sert à corriger l'erreur actuelle en créant une sortie proportionnelle à l'entrée en choisissant le gain c_{kp} (1). Si le gain est trop grand la réponse est rapide, mais il y a un dépassement et des oscillations. S'il est trop petit, la réponse est lente. Après une correction proportionnelle, une erreur résiduelle peut rester. Le correcteur intégral (I) corrige cette erreur persistante en accumulant les erreurs passées et en les intégrant dans le temps (2). Elle permet donc d'atteindre la consigne. Elle se règle en adaptant le gain c_{Ti} . Une valeur trop importante entraîne une action faible et donc une erreur persistante importante. À l'inverse, une valeur trop petite peut entraîner des oscillations et un dépassement. Enfin le correcteur dérivé (D) anticipe les erreurs futures en observant la vitesse de changement de l'erreur (3). Cela permet d'atteindre plus rapidement la consigne et de limiter les oscillations. Il se règle en adaptant le gain c_{Td} . Une valeur trop grande va cependant entraîner une commande et donc une réponse instable. Les paramètres du PID sont calculés de manière à minimiser l'erreur, avoir un temps de réponse rapide et limiter les dépassements ainsi que l'oscillation du système (Rodríguez et al., 2015).

Tout comme le contrôle tout ou rien, le contrôle PID est un contrôle simple à mettre en place et robuste (Badji et al., 2022 ; Chen et al., 2025), ce qui justifie son utilisation importante. Il ne nécessite notamment pas de modèle numérique pour fonctionner. Cependant ce type de contrôle ne se base que sur la mesure du paramètre à contrôler et pas sur les mesures des paramètres perturbateurs, comme les conditions extérieures, ce qui peut limiter les performances (Chen et al., 2025) par rapport à d'autres contrôles présentés après. De plus, il y a des risques de perte de contrôle et d'avoir un temps de réponse long lorsque la variable à contrôler s'éloigne de la consigne, ce qui le rend inutilisable dans certains cas, notamment quand les paramètres régulés varient fortement (Badji et al., 2022). Enfin ce type de régulateur ne peut prendre qu'une entrée et une sortie à la fois. Par exemple, si l'on veut réguler la température et l'humidité il faudra créer deux régulateurs, ce qui peut poser des problèmes lors de la mise en place, ces paramètres étant liés physiquement. La partie importante lors de la mise en place de ce contrôleur est d'identifier les bons paramètres du PID afin d'avoir une erreur nulle, un temps de réponse rapide et d'éviter l'instabilité. Une méthode de réglage sera présentée au chapitre 5.3.1.

Pour prendre en compte les perturbations, il est possible d'ajouter un contrôleur de planification des gains (Rodríguez et al., 2015). Ce contrôleur modifie les gains du PID en fonction des conditions climatiques extérieures. Pour cela il utilise une base de données contenant des valeurs de gains déjà prédéfinies en fonction des paramètres extérieurs (Rodríguez et al., 2015).

1.3.3.3 Contrôle prédictif

Le contrôle prédictif ou MPC (Model Predictive Control) en anglais est une stratégie de contrôle basée sur un modèle numérique du système à contrôler (Badji et al., 2022). Ce contrôle est découpé en plusieurs étapes, présentées Figure 1.15 et décrites par la suite.

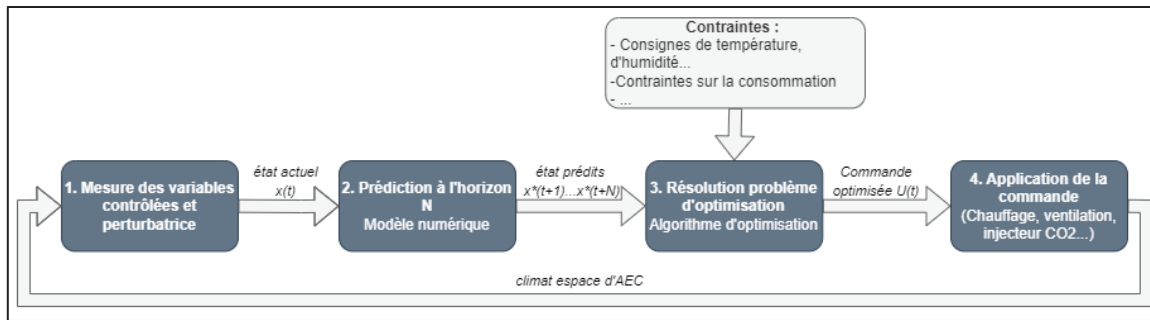


Figure 1.15 Principe de fonctionnement du contrôle prédictif

La première étape est de mesurer les variables contrôlées et perturbatrices. Cela donne l'état actuel des conditions climatiques $x(t)$. Puis, à l'aide d'équations physiques, un modèle numérique décrivant le système est écrit (Hamza & Ramdani, 2020). Ce modèle numérique permet de prédire les variables futures des paramètres climatiques jusqu'à l'horizon N ($x^*(t+1)$, $x(t+2)$, ..., $x(t+N)$) à partir de l'état actuel de ces variables ($x(t)$). Ces prédictions sont ensuite utilisées dans un nouveau bloc. Ce bloc prend en entrée les prédictions sur le climat, les consignes de contrôle (par exemple maintenir une température de 20°C) ainsi que les contraintes sur les équipements (par exemple privilégier l'économie d'énergie ou le climat idéal pour les plantes). À l'aide de ces données, un algorithme d'optimisation va permettre de déterminer la meilleure solution, c'est-à-dire la meilleure consigne $U(t)$ à envoyer aux équipements, afin de répondre aux contraintes de contrôle. Pour cela, un problème d'optimisation est défini. Il doit permettre de trouver la consigne de contrôle idéale à partir des prédictions et des contraintes du système. L'algorithme va alors chercher dans l'ensemble des solutions possibles, la réponse répondant au mieux aux contraintes. Quelques algorithmes d'optimisation sont présentés dans la partie 1.4.2. Ces commandes sont ensuite envoyées aux équipements, qui vont influencer le climat. La démarche est ensuite réalisée à l'instant $t+1$, avec les nouvelles conditions climatiques (Rodríguez et al., 2015).

Cette stratégie de contrôle comporte de nombreux avantages. Elle permet une optimisation plus importante des variables contrôlées, dans le cadre de problèmes multifactoriels, par rapport à un contrôle PID. En effet, cet algorithme permet de prendre en compte les relations entre les paramètres. Il peut aussi permettre d'ajouter des contraintes de contrôle, sur la consommation

d'énergie ou sur les valeurs maximales et minimales possibles pour les actions de commande par exemple (Hamza & Ramdani, 2020).

Cependant ce contrôle demande beaucoup de ressources de calcul (Badji et al., 2022 ; Chen et al., 2025). De plus, il requiert un modèle mathématique du système précis, la précision des prédictions dépendant de ce modèle (Badji et al., 2022 ; Chen et al., 2025). La création du modèle mathématique et de l'algorithme d'optimisation rend aussi sa mise en place plus complexe qu'un contrôleur PID.

1.3.3.4 Contrôle à logique floue

La logique floue est utilisée quand il y a des incertitudes dans le modèle du système ou que celui-ci est complexe (Ponce et al., 2015). Le but est d'utiliser un principe de contrôle qui n'est pas basé sur un modèle mathématique, mais inspiré du raisonnement. Les paramètres à contrôler et perturbateurs sont pris en entrée et définis avec des termes linguistiques appelés ensembles flous. Par exemple la température dans un espace d'AEC pourra être définie comme « très froide », « froide », « chaude » ou « très chaude ». La même démarche est réalisée pour les variables de sortie. Par exemple il pourra avoir « chauffage fort », « chauffage faible », « neutre », « ventilation faible », « ventilation forte ». Les paramètres sont liés à leurs termes linguistiques par des fonctions d'appartenance, qui sont souvent triangulaires ou trapézoïdales. Par exemple la température « froide » pourra être définie par une fonction triangle de valeur maximum 1 pour une température de 5°C, nulle pour une erreur inférieure à -10°C ou supérieure à 20 °C, comme définie dans la Figure 1.16.

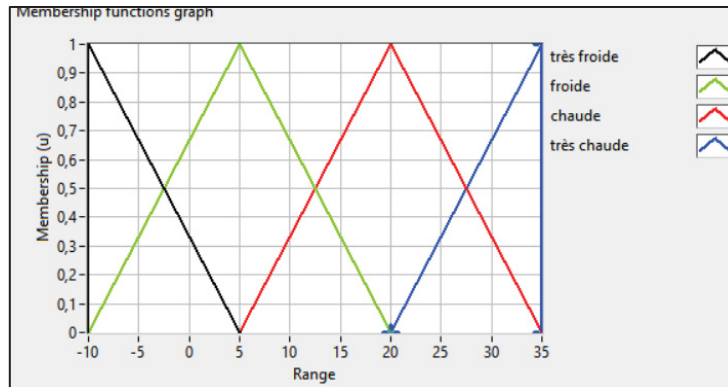


Figure 1.16 Exemple de fonctions d'appartenance pour la température dans un contrôle à logique floue

Ensuite, des règles de logiques floues de la forme « SI-ALORS » sont écrites. On aura par exemple : « SI température est Très froide ALORS chauffage est Fort ». Le schéma de principe du contrôle est présenté Figure 1.17.

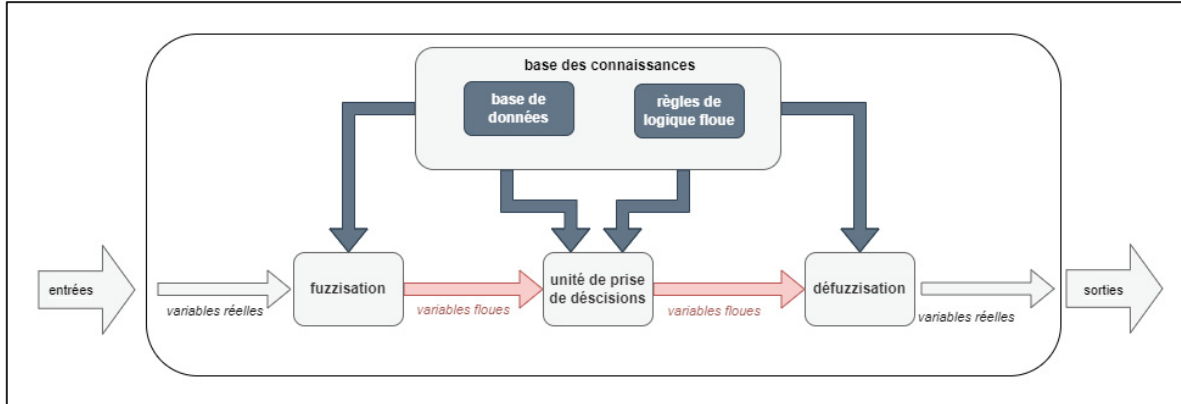


Figure 1.17 Schéma de principe du contrôle à logique floue

Un système de contrôle à logique floue est constitué de cinq blocs.

Le premier bloc contient l'ensemble des règles de logiques floues du système, écrites comme celle présentée précédemment (base de règle). Il y a ensuite un bloc contenant la base de données, c'est-à-dire l'ensemble des ensembles flous et des fonctions d'appartenances. Le contrôleur procède alors comme suit :

1. La première étape (fuzzification) consiste à transformer les valeurs réelles mesurées en valeurs floues à l'aide des fonctions d'appartenance. Par exemple une température de

10°C pourra être définie comme chaude à 33% et froide à 66%, comme présenté Figure 1.16.

2. Ensuite, les sorties floues sont déduites à partir des règles de logique floues. Pour cela, chaque règle de logique à un degré d'appartenance, déterminée par le degré d'appartenance des valeurs d'entrées.
3. Enfin, la valeur numérique de la sortie est déduite (defuzzification) (Badji et al., 2022 ; Ponce et al., 2015 ; Rodríguez et al., 2015). Pour cela, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. La plus courante est la méthode du centre de gravité. Elle est basée sur la formule présentée équation (1.13)

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (1.13)$$

Avec x la valeur nette de sortie, x_i sa valeur dans l'ensemble flou et $\mu(x_i)$ son degré d'appartenance dans la fonction floue.

Prenons un exemple avec le contrôle flou de la température à l'aide d'un chauffage. La variable d'entrée est la température qui peut être très froide, froide, chaude ou très chaude, comme dans la figure 1.7. La variable de sortie est le chauffage qui peut être éteint, faible, moyen, fort. Les règles de logique pourraient être (forme naïve) :

- Si température très froide, alors chauffage fort
- Si température froide, alors chauffage moyen
- Si température chaude, alors chauffage faible
- Si température très chaude, alors chauffage éteint

Une température de 10°C est chaude à 33% et froide à 66%. La règle 3 a donc un degré d'appartenance de 33% et la règle 2, un degré d'appartenance de 66%. À l'aide de ces degrés d'appartenance et des valeurs des ensembles flous caractérisant le chauffage, une puissance de sortie du chauffage est calculée à l'aide de la méthode du centre de gravité. Cette méthode de défuzzification consiste à superposer les fonctions obtenues d'appartenance de sortie, chacune pondérée par son degré d'appartenance respectif, puis à calculer le centre de gravité de l'aire

résultante afin d'obtenir une valeur numérique unique et précise, utilisable comme consigne de fonctionnement pour l'équipement.

Ce contrôle est utile quand la modélisation du système est difficile à faire, notamment lorsque les relations entre les paramètres (température, humidité, chauffage, etc) sont non linéaires, c'est-à-dire qu'elles ne suivent pas une relation proportionnelle mais évoluent de façon complexe selon les conditions. En effet, il a l'avantage d'être très flexible et ne nécessite pas de modèle précis (Chen et al., 2025). De plus, il permet de réguler plusieurs paramètres à la fois. Cependant il demande une grande connaissance de l'entièreté des états de fonctionnement du système (Badji et al., 2022). Enfin, le nombre de règles logiques augmente exponentiellement lorsque l'on veut augmenter la fiabilité du système (Badji et al., 2022). Ce sont ces règles qui contraignent les performances du système (Chen et al., 2025). Cette approche, qui repose sur des règles écrites par des experts, présente également l'avantage de pouvoir expliquer les actions de régulation entreprises (explicabilité).

1.3.3.5 Réseaux de neurones

Un réseau neuronal artificiel est constitué de plusieurs « unités élémentaires de calcul » (neurones). Chaque neurone possède plusieurs entrées (x_i) qui sont des données provenant d'autres neurones. Le neurone commence par récupérer ces données et donne un poids (ω_i) à chacune. Puis il réalise la somme pondérée (z) de ces entrées (équation 1.14).

$$z = \sum_{i=1}^N x_i \cdot \omega_i \quad (1.14)$$

Ensuite la sortie du neurone $y=f(z)$ est calculée grâce à une fonction d'activation. Il existe plusieurs fonctions d'activation dont voici deux exemples (équations 1.15 et 1.16). Cette fonction permet d'introduire de la non-linéarité, afin de pouvoir résoudre des systèmes complexes et non linéaires. La valeur de sortie est ensuite envoyée à l'entrée d'un autre neurone.

$$y = \max(0, z) \quad (1.15)$$

$$y = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1.16)$$

Ces neurones sont répartis en trois parties : la couche d'entrée, les couches cachées et la couche de sortie, comme présenté à la Figure 1.18 (Ding, Tu, Zang, Huang, & Zhou, 2018 ; Rodríguez et al., 2015).

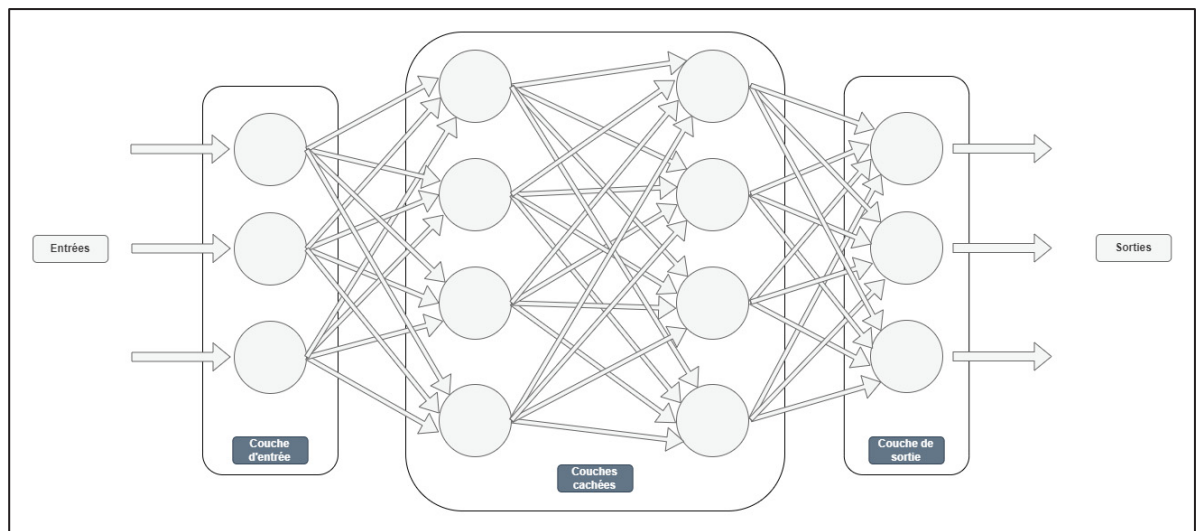


Figure 1.18 Schéma de principe d'un réseau de neurones

Le réseau de neurones peut servir de contrôleur en sortant les consignes de pilotage. Il peut aussi remplacer le modèle numérique dans une MCP par exemple, en prédisant les paramètres climatiques futurs. Dans ce cas il peut être appelé jumeau numérique. Dans les deux cas, il prend en entrée les variables contrôlées et les variables perturbatrices du système. Pour que le réseau de neurones renvoie les bonnes données, il faut d'abord l'entraîner, à partir de données réelles. En effet, c'est un outil de régression qui apprend à partir d'exemples. À partir de données actuelles sur les conditions climatiques et sur l'état des équipements, il va calculer la consigne de sortie. En fonction de la différence entre le résultat attendu (mesure) et la valeur obtenue (prédiction), le réseau va optimiser les poids dans les neurones afin de réduire l'erreur. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que l'erreur soit minimale.

Une fois la phase d'apprentissage terminée, les réseaux de neurones sont capables de prédire avec beaucoup de précision le comportement des paramètres étudiés, même lorsque le système est non linéaire, grâce aux fonctions d'activation (Ding et al., 2018). Ils peuvent fonctionner dans des espaces de grandes dimensions et ont un temps de réponse rapide (Rodríguez et al., 2015). Ils ont aussi l'avantage de pouvoir coupler la régulation de plusieurs paramètres. Pour améliorer la précision, il faut entraîner l'algorithme avec des données du système ou d'un modèle numérique de ce système, mais cela augmente le temps d'apprentissage. À l'inverse, s'il n'y a pas assez de données, le système sera peu précis (Rodríguez et al., 2015). Il y a donc un compromis à trouver. Comme évoqué plus haut, le réseau de neurones peut aussi permettre de créer un jumeau numérique, qui est une copie virtuelle du système, utilisable pour un contrôle prédictif par exemple.

1.3.3.6 Tableaux de synthèse

Il existe donc plusieurs stratégies de contrôle des espaces d'AEC. Les cinq types principalement retrouvés dans la littérature sont : les contrôles ON/OFF, PID, prédictif, à logique floue et les réseaux de neurones. Ces contrôles ont des avantages et d'inconvénients, détaillés dans le Tableau 1.6.

Tableau 1.6 Avantages et limites des différents types de contrôle

Type	Avantages	Limites
ON/OFF	- Simple à mettre en place (Badji et al., 2022)	- Contrôle limité (Badji et al., 2022) - Démarrages et arrêts fréquents (Castilla, 2013)
PID	- Structure simple et facile d'utilisation (Chen et al., 2025) - Simple et robuste (Badji et al., 2022) - Grande répétabilité (Badji et al., 2022) - Contrôle précis (Johnson, 2013)	- Difficulté à contrôler plusieurs variables en même temps (Chen et al., 2025) - Ne prend pas en compte la mesure des paramètres extérieurs (Badji et al., 2022) - Possibilité de perte du contrôle lors de changements trop forts du point de consigne (Badji et al., 2022)
Prédicatif	- Prédit la dynamique future du système (Chen et al., 2025) - Possibilité d'optimiser des systèmes multicontraintes (Chen et al., 2025) - Minimise les effets des perturbations (Rodríguez et al., 2015)	- Complexité informatique, demande beaucoup de ressources de calcul (Badji et al., 2022 ; Chen et al., 2025) - Précision fortement dépendante de la qualité du modèle (Badji et al., 2022 ; Chen et al., 2025)
Logique floue	- Pas besoin de modèle précis (Chen et al., 2025) - Peut contrôler des systèmes complexes avec plusieurs entrées/sorties, qui varient dans le temps (Chaudhary, Kaur, Mehta, & Tewani, 2019) - Bon contrôle des systèmes non linéaires (Chen et al., 2025) - Performances supérieures au PID (Nour, Ooi, & Chan, 2007)	- Faibles performances en temps réel (Chen et al., 2025) - Contraint par les règles de base (Chen et al., 2025)
Réseau de neurones	- Capacité d'autoapprentissage (Chen et al., 2025) - Traitement des données en temps réel (Chen et al., 2025) - Réponse rapide (Rodríguez et al., 2015) - Capacité à interpoler (Rodríguez et al., 2015) - Flexibilité pour décrire les fonctions non linéaires (Rodríguez et al., 2015) - Fonctionne avec des espaces de grandes dimensions (Rodríguez et al., 2015)	- Demande beaucoup de données, temps d'entraînement et ressources informatiques (Chen et al., 2025)

Il convient toutefois de souligner que ces différentes approches ne sont pas mutuellement exclusives et sont souvent combinées au sein d’une même architecture de contrôle. Par exemple, un réseau de neurones peut être utilisé comme modèle prédictif (boîte noire) d’une EPVI dans le cadre d’une commande prédictive de type MPC. De même, les stratégies de haut niveau, qu’elles reposent sur un MPC ou un réseau de neurones, ne pilotent généralement pas directement les actionneurs. Elles produisent plutôt des consignes (température, débit, ouverture de vanne, etc.) qui sont ensuite suivies par des régulateurs de bas niveau, le plus souvent de type PID, chargés d’assurer la commande rapide et robuste des équipements.

Maintenant que le principe de contrôle des espaces d’AEC a été décrit, différentes études de cas seront analysées, afin de savoir comment ces stratégies de contrôle sont mises en œuvre.

1.4 Études de cas

1.4.1 Sélection des articles

Afin de compléter l’étude du contrôle des espaces d’AEC, des études de cas de mise en place de stratégies de contrôle ont été analysées. Pour sélectionner les études, des recherches ont été réalisées à l’aide de la base de données Compendex. Des recherches avec les mots-clés (« greenhouse » AND « control* »), (« vertical farm* » AND « control* ») puis (« container farm* » AND « control* ») ont été réalisées afin de quantifier le nombre d’études sur le contrôle pour les trois types d’espaces d’AEC. Le Tableau 1.7 recense le nombre de résultats par type d’espace.

Tableau 1.7 Nombres d’études sur le contrôle selon le type d’espace d’AEC

Type d’espace	Nombre d’études (en février 2026)
Serres	62 248
Fermes verticales	348
Fermes conteneurs	10

Un très grand nombre d’études ont été réalisées sur les serres. Il y a aussi de nombreuses études sur le contrôle des fermes verticales. Enfin seules dix études abordent le contrôle de fermes

conteneurs. Cela met en valeur le fait que les fermes conteneurs sont encore peu étudiées, par rapport aux autres types d'espaces. Afin d'affiner les résultats, la recherche se borne maintenant aux articles dont les termes apparaissent dans le titre, le sujet ou le résumé et publiés dans les 20 dernières années (depuis 2005). Ils sont ensuite triés selon le type de contrôle. La Figure 1.19 présente les résultats obtenus pour les serres selon le type de contrôle.

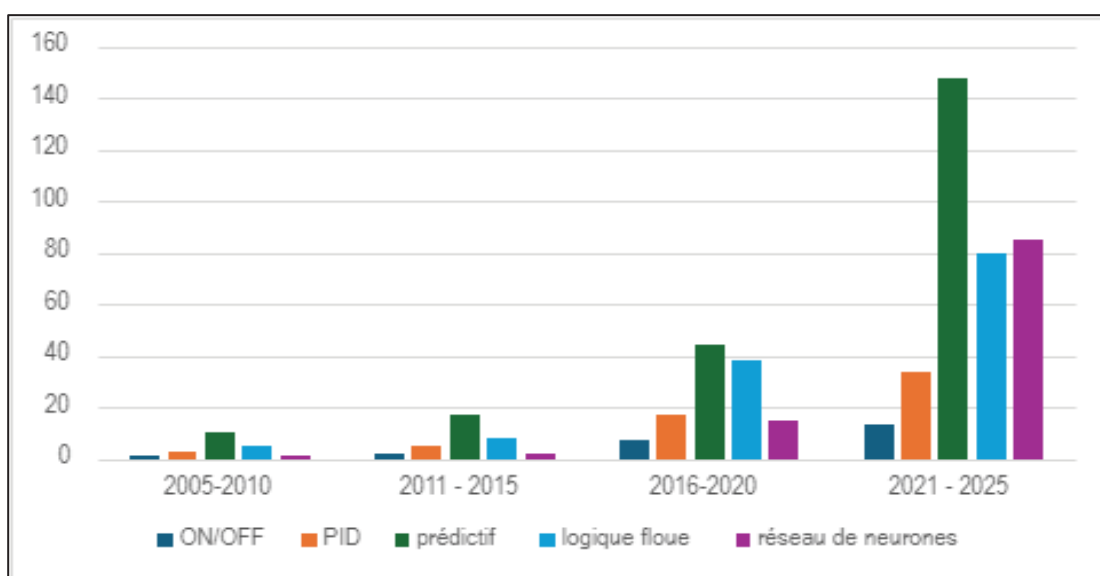


Figure 1.19 Nombre d'articles sur le contrôle des serres en fonction du type de contrôle et de l'année

Il est observé que les recherches sur le contrôle des serres se développent énormément ces dernières années. Actuellement la majorité des recherches sont réalisées sur les technologies de contrôle les plus poussées, avec le contrôle prédictif, la logique floue et les réseaux de neurones.

Le Tableau 1.8 présente lui les résultats obtenus pour les fermes verticales.

Tableau 1.8 Nombre d'articles selon le type de contrôle pour les fermes verticales entre 2005 et 2025

Type de contrôle	Nombre d'articles
ON/OFF	0
PID	2
Prédictif	5
Logique floue	0
Réseau de neurones	0

Les études sur un contrôle en particulier sont encore peu nombreuses pour les fermes verticales. Seules des études sur des contrôles prédictifs et PID ont été recensées.

Aucune des études sur les fermes conteneurs ne se focalise sur la mise en place d'un contrôle en particulier, ce qui fait qu'en effectuant les recherches par type de contrôle, il n'y a plus de résultats.

Afin de réaliser une sélection finale d'articles à étudier, seules les études parues après 2023 seront retenues, Chen et al. (2023) ayant déjà réalisé une revue de littérature d'articles jusqu'à 2023. Les études sélectionnées doivent avoir une description des différents équipements de l'espace, en précisant, si possible, la puissance de ces équipements. Comme il reste toujours beaucoup d'études, les articles sont sélectionnés afin de couvrir différentes stratégies de contrôle, différents espaces et différents objectifs (améliorer la précision du contrôle ou diminuer la consommation énergétique). Les études sélectionnées sont décrites et analysées dans la suite.

1.4.2 Analyse et discussion

Les articles sélectionnés sont résumés dans le Tableau 1.9 puis détaillés par la suite.

Tableau 1.9 Récapitulatif des études de cas

Type d'espace	Contrôle	Paramètres contrôlés	Équipements	Résultats de l'étude	Source
Serre (4 000 m³)	Réseau de neurones Logique floue Algorithme génétique PI	Température Humidité	Chauffage (300 à 700W) Brumisateur (16,7 à 116,7 10 ⁻³ kg/s)	Augmentation temps de réponse 10 à 12% de consommation énergétique en moins par rapport à un contrôle standard Meilleures prises de décisions sur les équipements	(Dudnyk et al., 2025)
Serre (24x90m)	PID DBO-floue	Température et humidité au niveau des NFT	Thermopompe (49.8 kW) NFT	Amélioration du temps de réponse, diminution du dépassement par rapport à un PID simple Plus rapide et plus stable	(Cai et al., 2025)
Serre (4x3,74x3,02 m²)	Logique floue	Température Humidité	Chauffage (thermopompe) Refroidissement (ventilation) Humidificateur Déshumidificateur	Erreur en régime permanent faible Diminution de l'erreur en prenant aussi la température et l'humidité extérieures en entrée	(Riahi, Nasri, Mami, & Vergura, 2024)
Serre (170x30x4 m)	Logique floue Contrôle prédictif	Température Humidité CO ₂	Chauffage (150 kW) Refroidissement (170 kW) Générateur CO ₂ (200 kW) Ventilation forcée (15 kW) Déshumidificateur (50 kW)	Économie de 36% d'énergie par rapport à un contrôle classique	(Rizwan, Khan, Ahmad, & Kim, 2023)
Ferme verticale	Modèle dynamique PID	Irrigation	Système d'irrigation	Contrôle robuste, stabilise le processus d'irrigation, distribution uniforme de l'humidité dans le sol	(Daniels, Fink, & Wollherr, 2024)
Serre	Contrôle prédictif avec particule swarm optimization Modèle prédictif	Température Humidité Éclairage	Chauffage (brûleur) Lumières Ventilation du toit	Meilleures performances énergétiques qu'un contrôle classique et meilleures productions	(Gong, Yu, & Kollias, 2023)
Serre (90x45x6)	Modèle prédictif	Température Humidité Lumière Irrigation	Fan (7,1kW) pads (1 kW) Brumisateur (5 kW) Système d'irrigation (1 kW pompe, 2kW stockage) LED (0,5 kW)	Diminution de 5,3% de l'erreur absolue du contrôle, de 7,1% des dépendances en énergies et de 17,3% des coûts de l'électricité	(Biswal, Choudhury, Panda, & Mishra, 2025)

Ces études sont en grande majorité réalisées à l'aide de simulations numériques, souvent basées sur des données de serres réelles. C'est le cas de Dudnuk et al. (2025), Riahi et al. (2024), Rizwan et al. (2023), Daniels et al. (2024), Gong et al. (2023) et Biswal et al. (2025). Parfois, ces contrôles sont ensuite testés sur des systèmes réels, comme pour les travaux de Dudnuk et al. (2025) et de Cai et al. (2025).

La plupart des articles étudient le contrôle de la température et de l'humidité. Dans l'échantillon étudié, c'est le cas de 6 études sur les 7. Il y a aussi des études sur le contrôle des différents équipements présents dans les espaces d'AEC, tels que les systèmes d'injection de CO₂, l'irrigation ou l'éclairage.

Dans l'ensemble des articles étudiés, les contrôleurs PID ne sont jamais utilisés seuls. Ils sont systématiquement couplés avec d'autres stratégies de contrôle. Par exemple, Dudnyk et al. (2025) utilisent un contrôleur PI couplé avec un réseau de neurones, de la logique floue et un algorithme génétique pour réguler la température et l'humidité dans une serre. Le contrôleur PI sert à contrôler les équipements en temps réel. Les paramètres du contrôleur PI sont déterminés par logique floue à l'aide d'une prédiction des perturbations réalisée par un réseau de neurones. Enfin, l'algorithme génétique est utilisé pour optimiser le choix des paramètres, afin de maintenir les conditions climatiques (température et humidité) tout en diminuant la consommation d'énergie et les dépassements de consigne. Cet algorithme est présenté à la fin de cette partie. Ils ont alors obtenu une réduction de la consommation énergétique des équipements de 10 à 12% tout en améliorant le temps de réponse et en améliorant la stabilité, même lors de changements imprévisibles de la météo. Cai et al. (2025) ont utilisé un contrôleur PID couplé à de la logique floue pour modifier en temps réel les paramètres du PID. Un algorithme d'optimisation DBO (Dung Beetle Optimizer) est ensuite utilisé. Le principe de fonctionnement de cet algorithme est également présenté à la fin de cette partie. Son objectif est de choisir les fonctions optimales de fuzzification et de défuzzification des variables du PID dans le but d'améliorer la stabilité et la robustesse du système. Ce contrôleur permet de réguler la température dans des NFT. Une simulation sur Matlab a permis de tester ses performances. Pour cela, un échelon de 25°C a été appliqué au contrôle complet, ainsi qu'à un

PID simple et un PID couplé seulement à de la logique floue. Les résultats ont donné un temps de réponse de 35,23 secondes, soit une réduction de 165,13 secondes par rapport à un PID simple et de 123,19 secondes par rapport à un PID couplé à de la logique floue sans optimisation. De plus, la simulation de ce contrôleur a permis d'obtenir une erreur de température en régime permanent de $0,009^{\circ}\text{C}$ avec un dépassement de 2,18%. Cependant, une telle précision n'est pas forcément utile, les capteurs utilisés dans les espaces d'AEC dépassant rarement une précision de $0,2^{\circ}\text{C}$.

Il apparaît aussi que, dans les cas étudiés, utiliser un contrôle prédictif permet de réduire la consommation énergétique. Par exemple, Gong et al. (2023) ont utilisé un contrôle prédictif avec un algorithme d'optimisation (Particle Swarm Optimization (PSO)) afin de réguler la température, l'humidité et la lumière d'une serre (cet algorithme est présenté à la fin de cette partie). Le problème d'optimisation est de trouver les consignes de contrôle optimales du chauffage, de la ventilation et de l'éclairage afin de maximiser le rendement des cultures tout en minimisant la consommation énergétique. À partir de cette étude, Gong et al. (2023) ont déduit que ce type de contrôle permettait d'augmenter les rendements de production et de diminuer la consommation énergétique. En effet, ils ont comparé ce contrôle à un contrôle de serre classique et a pu augmenter la production de $219,80 \text{ mg/m}^2$ à $481,12 \text{ mg/m}^2$. De plus, la consommation est passée de $14,7 \text{ MJ/m}^2$ à $9,7 \text{ MJ/m}^2$ sur une période de 41 heures. Ensuite, Biswal et al. (2025) ont utilisé un modèle prédictif pour réguler la température, l'humidité, la lumière et l'irrigation dans une serre. L'objectif de ce contrôle est de diminuer la consommation énergétique tout en maintenant les conditions climatiques. Les tests ont été réalisés sur une année et ont permis de mettre en avant une diminution de 7,1% de la dépendance en énergie et de 17,3% des coûts d'électricité.

Dans ces études, plusieurs algorithmes d'optimisation ont été utilisés. Le premier est l'algorithme génétique. Il recherche la solution optimale dans l'ensemble des solutions (appelé population) en imitant la sélection naturelle. Pour cela, une population est tout d'abord générée de façon aléatoire. Chacun des individus, qui représente une solution potentielle, « porte » un jeu de valeur de paramètres du problème d'optimisation. Chaque individu est ensuite évalué

afin de sélectionner les plus « performants » au sens du problème d'optimisation. Ces solutions sélectionnées forment les « parents ». En croisant (combinant) deux « parents », on génère deux nouveaux individus dont les génotypes (ie les paramètres) sont des combinaisons linéaires de ceux des parents. Des mutations sont ensuite réalisées sur ces nouvelles solutions, c'est-à-dire que ces solutions sont légèrement modifiées. Ces mutations, qui sont relativement peu fréquentes (1% de la population en moyenne), permettent d'explorer l'espace des paramètres et ainsi d'éviter de converger vers un minimum local. Ce cycle générationnel (sélection, croisement, mutation) est ensuite répété avec la nouvelle population. Au fur et à mesure des boucles, l'algorithme va converger vers la ou les solutions optimales.

Le deuxième algorithme mentionné est l'algorithme d'optimisation DBO pour Dung Beetle Optimizer, basé sur les comportements sociaux des populations de bousiers. La population est divisée en quatre groupes qui imitent chacun un comportement du bousier. Les rouleurs de bouse et les danseurs explorent l'espace de recherche, tandis que les voleurs et les pondeurs utilisent les meilleures solutions trouvées pour les optimiser. À chaque itération, tous les groupes mettent à jour leurs positions. Cet algorithme permet un équilibre entre exploration globale et optimisation locale jusqu'à l'optimum. Explorer globalement permet de rechercher ailleurs dans l'espace d'autres solutions qui pourraient être plus optimales et l'optimisation locale permet d'affiner un optimum local trouvé.

L'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization) est une méthode d'optimisation inspirée du comportement collectif des oiseaux en vol ou des bancs de poissons. Chaque solution est représentée par une particule qui se déplace dans l'espace des solutions. À chaque itération, sa trajectoire est ajustée en fonction de son expérience propre (meilleure solution déjà trouvée) et de celle de l'ensemble de l'essaim (meilleure solution globale). Cet équilibre entre exploration et exploitation permet aux particules de converger progressivement vers une solution optimale.

1.4.3 Synthèse

En résumé, sept espaces d'AEC ont été étudiés au travers d'articles. Parmi ces espaces se trouvent des serres de très petite taille ($45,2 \text{ m}^3$) à grande taille ($4\,000 \text{ m}^3$). Une des études concerne une ferme verticale. La température et l'humidité des espaces sont contrôlées dans cinq cas sur les sept. Des études du contrôle de l'éclairage, de la concentration en CO_2 et de l'irrigation sont aussi présentes. Dans les études analysées, aucun contrôleur PID n'est utilisé seul. Ils sont systématiquement couplés à d'autres stratégies, comme des réseaux de neurones ou de la logique floue, par exemple. Ces couplages permettent de réduire la consommation de 10 à 12% pour l'étude de Dudnyk et al. (2025) et de diminuer les temps de réponse (Cai et al., 2025). De plus, les contrôles plus perfectionnés (prédictif, réseau de neurones et logique floue) sont étudiés dans la majorité des cas. Le contrôle prédictif permet de réduire la consommation énergétique. Gong et al. (2023) ont pu diminuer la consommation de 5 MJ/m^2 en 41h et augmenter la production de $261,32 \text{ mg/m}^2$ par rapport à un contrôle classique de la température, de l'humidité et de la lumière. Ensuite, la logique floue peut être utilisée seule (Riahi et al., 2024) ou couplée à d'autres contrôles. Les réseaux de neurones, quant à eux, sont utilisés couplés avec d'autres types de stratégies. Ils servent alors à prédire les conditions futures du système afin d'optimiser les consignes de contrôle.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectifs de l'étude

Dues à la variété des espaces d'AEC (serre, EPVI), mais aussi de leur équipement (passif ou chauffage et/ou refroidissement, stockage, etc.), les stratégies de contrôles doivent s'adapter aux caractéristiques de l'espace. Il apparaît important d'étudier le contrôle d'espaces d'AEC variés afin de déterminer les stratégies les plus adaptées à chacun d'eux.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser et/ou de mettre en place des stratégies de contrôle à l'échelle d'un espace ou d'un équipement spécifique dans le but commun d'augmenter ou de maintenir les rendements de culture tout en diminuant la consommation énergétique.

Dans ce cadre, trois études de cas sont traitées dans ce mémoire et permettent de formuler trois sous objectifs. Ces sous-objectifs sont présentés dans la Figure 2.1 et détaillés par la suite.

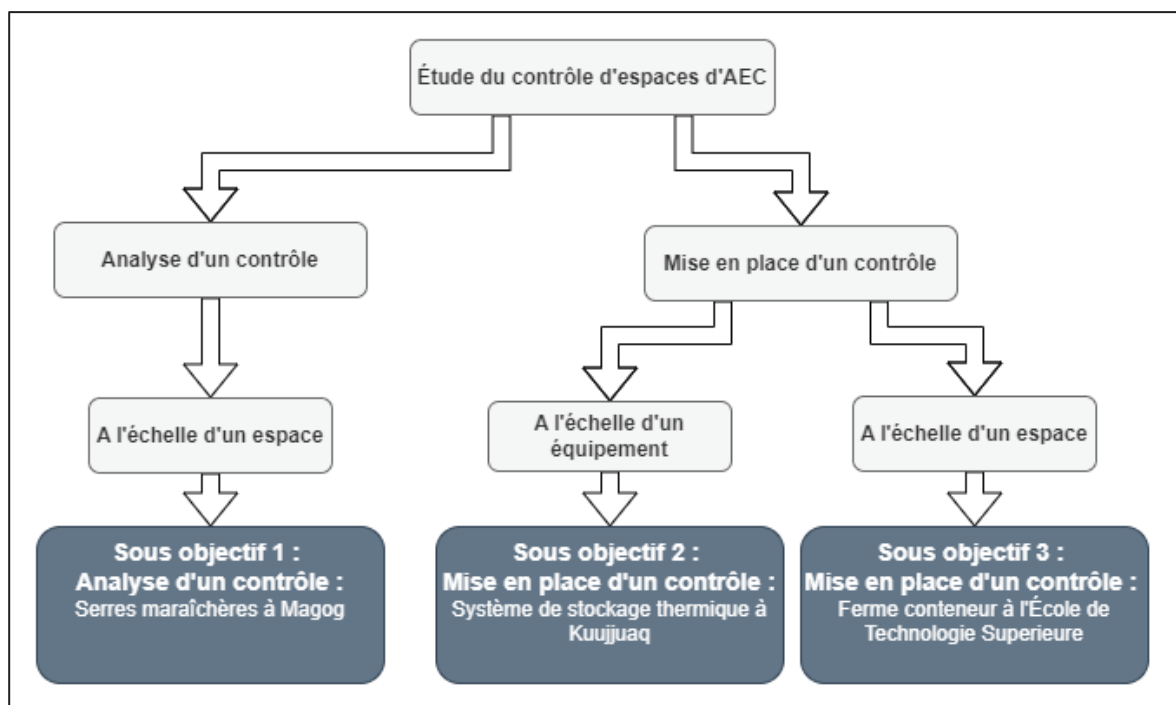


Figure 2.1 Objectifs et sous objectifs du mémoire

La première étude de cas concerne l'étude d'un contrôle déjà existant et implémenté dans un espace : les serres maraîchères à Magog dans le sud du Québec. L'objectif de cette étude est de voir l'impact de cette stratégie sur le maintien des consignes et sur les performances énergétiques de ces serres puis de voir si des améliorations du contrôle pourraient être possibles. Cette étude sera réalisée dans le chapitre 3.

La deuxième étude de cas porte sur la mise en place d'un contrôle spécifique à un équipement : le système de stockage thermique à base de lit de roches installé dans une serre située à Kuujuaq dans le Nunavik, au Nord du Québec. L'objectif est de mettre en valeur les problématiques du contrôle actuel de ce lit de roche et de proposer une amélioration de ce contrôle. Cette étude sera réalisée dans le chapitre 4.

Enfin la troisième étude de cas se concentre sur la mise en place d'un contrôle à l'échelle d'un espace. Ce contrôle doit être implémenté dans la ferme conteneur installée à l'École de Technologie Supérieure à Montréal. Cette ferme doit servir de laboratoire afin d'étudier les performances énergétiques d'un tel espace et de permettre de tester plusieurs technologies innovantes comme des systèmes de stockage thermique ou des panneaux solaires radiatifs par exemple. Pour cela de nombreux équipements vont y être installés : un système CVCA, des systèmes d'irrigation, des LED et un injecteur de CO₂. L'objectif est ici de proposer un contrôle permettant de réguler le système CVCA, afin de maintenir les conditions de température et d'humidité dans l'espace. Cette étude sera réalisée dans le chapitre 5.

2.2 Méthodologie

La méthodologie générale retenue pour l'étude des stratégies de contrôle dans les espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC) est présentée à la Figure 2.2. Elle s'articule autour de quatre étapes, qui sont ensuite adaptées en fonction des spécificités de chaque étude de cas.

La première étape consiste à caractériser l'espace étudié. Elle comprend notamment la description du type d'installation (serre ou enceinte de production végétale intérieure), de son implantation, de ses dimensions, des matériaux constituant son enveloppe, des cultures

présentes, ainsi que des principaux équipements techniques et de l'instrumentation disponible. Cette phase est indispensable pour comprendre les contraintes physiques et les moyens d'action offerts par le système.

La deuxième étape porte sur l'analyse de la stratégie de contrôle. Les variables contrôlées sont identifiées, puis la logique de pilotage est décrite en détaillant les règles de commande, les séquences de fonctionnement ainsi que les différents contrôleurs mis en œuvre (PID, logique booléenne, MPC, etc.).

La troisième étape consiste à évaluer les performances de cette stratégie. L'analyse porte notamment sur la capacité du système à maintenir les consignes climatiques, sur son efficacité énergétique ainsi que sur l'exhaustivité du contrôle, c'est-à-dire la prise en compte ou non de l'ensemble des variables influençant le fonctionnement de l'espace.

Enfin, lorsque cela est possible, une quatrième étape consiste à proposer une stratégie de contrôle améliorée en s'appuyant sur les conclusions des étapes précédentes. Cette étape peut conduire à la définition de nouvelles lois de commande, à l'ajout de variables de contrôle ou à une meilleure coordination des équipements. Elle n'est toutefois pas toujours réalisable, notamment lorsque les systèmes de contrôle sont propriétaires ou insuffisamment documentés, empêchant toute modification de leur fonctionnement.

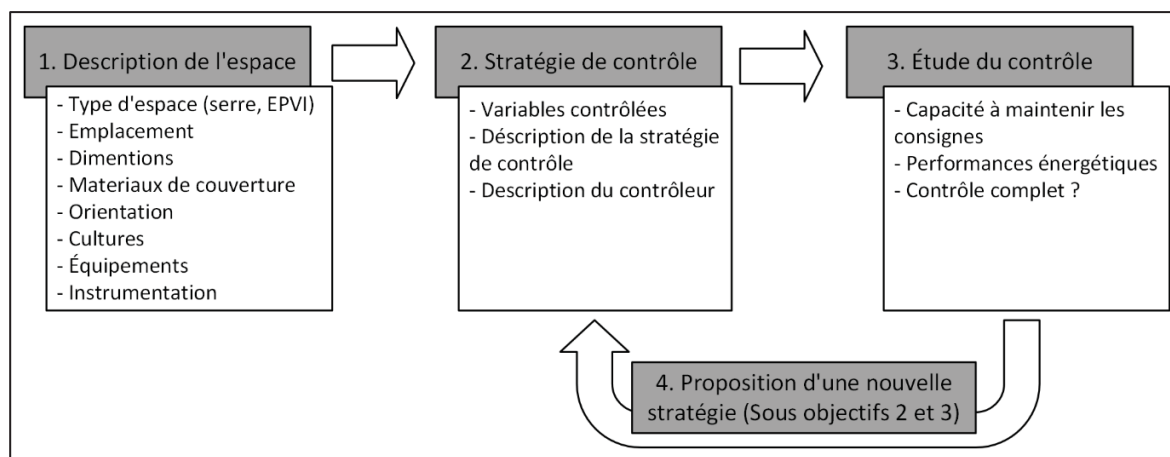


Figure 2.2 Méthodologie générale d'une étude de contrôle d'un espace d'AEC

2.2.1 Analyse d'un contrôle : serres maraîchères à Magog

La première étude de cas consiste à étudier un contrôle existant de serres maraîchères situées à Magog au Québec. Le site est constitué de quatre serres mesurant entre 200 et 270 m² et produisant à l'année des légumes tels que des concombres, des tomates l'été et du mesclun l'hiver. Pour cela un contrôleur régule des équipements afin de maintenir l'humidité et la température.

Afin d'étudier ce contrôle, la première étape consiste à documenter cet espace. Cette documentation commence par une présentation générale en décrivant sa situation géographique, ses dimensions, ses matériaux de couverture, son orientation. Les cultures réalisées sont aussi décrites, en précisant le type de substrat (sol, bancs hydroponiques...). Ensuite, l'ensemble des équipements présents seront décrits, en précisant leurs modèles, leurs puissances et leurs emplacements dans la serre. Enfin l'instrumentation présente sera listée en indiquant le modèle et la précision de chaque capteur.

La deuxième étape vise à expliquer la stratégie de contrôle. Les variables contrôlées seront précisées, ainsi que la stratégie utilisée pour contrôler ces variables.

La troisième étape suivante consiste à étudier les performances de cette stratégie de contrôle. Ces performances sont étudiées selon deux aspects : la capacité du contrôleur à maintenir les consignes ainsi que ses performances énergétiques.

Cette étude permettra de mettre en avant les points positifs et les limites de ce contrôle puis de proposer des recommandations sur l'opération des serres.

Pour ce sous-objectif, aucune nouvelle stratégie de contrôle n'est proposée, car le contrôleur utilisé, de la marque PRIVA, est un système industriel propriétaire fermé, ce qui ne permet pas de modifier sa stratégie de contrôle.

2.2.2 Mise en place d'un contrôle : système de stockage thermique à Kuujjuaq

Un système de stockage thermique a été mis en place dans une serre à Kuujjuaq au Nunavik, dans le Nord du Québec. Ce système permet de baisser les températures maximales et d'augmenter les températures minimales. Cependant le contrôle actuel de cet équipement montre quelques limites. Pour résoudre ces problèmes, la méthodologie de cet objectif est la

suivante. Comme pour le chapitre précédent, cette étude commence par une description de l'espace. Les mêmes paramètres sont présentés : situation géographique, type d'espace, dimensions, matériaux de couverture, orientation, cultures présentes, instrumentation, équipements. En particulier une description détaillée du principe de fonctionnement du lit de roche sera réalisée.

La deuxième partie consiste à décrire la stratégie actuelle du contrôle. Puis une étude de performances énergétiques du système permettra de mettre en avant ses problématiques.

Afin de résoudre les problématiques mises en avant, le contrôleur est remplacé et une nouvelle stratégie de contrôle est proposée. Le fonctionnement du contrôleur et le principe de la stratégie de contrôle améliorée seront décrits et justifiés.

2.2.3 Mise en place d'un contrôle : ferme conteneur à l'École de Technologie Supérieure

Lors de la réalisation de ce mémoire, la ferme conteneur n'est pas encore opérationnelle. Ce chapitre va donc suivre toutes les étapes avant la mise en place des équipements et l'implémentation du contrôle dans le système réel.

Comme pour toutes les études, la première étape est de documenter l'espace. En particulier tous les équipements choisis pour réaliser le contrôle seront décrits, avec leur principe de fonctionnement, leur puissance et une justification de leurs choix.

Une première séquence de contrôle du système CVCA, basé sur des régulateurs PID et des contrôles tout ou rien, est ensuite proposée. Cette stratégie est basée sur une version préliminaire proposée par Alte, l'entreprise ayant dimensionné le système CVCA. Cette version n'est cependant pas complète et ne peut donc pas être implémentée directement. Par conséquent, elle est ensuite analysée afin de proposer des pistes d'amélioration pour arriver à un contrôle fonctionnel et implémentable.

La mise en place de cette stratégie nécessite ensuite une instrumentation adaptée. L'étape suivante est donc de lister l'ensemble des mesures nécessaires à la réalisation du contrôle du système CVCA.

Il faut ensuite concevoir le système d'acquisition et de contrôle, permettant de récolter les données des capteurs, de coder les stratégies de contrôle, et d'envoyer les consignes aux

différents équipements. Cela implique de déterminer comment chaque équipement est piloté, afin de concevoir le contrôleur en conséquence.

L'ensemble de l'acquisition des données et du contrôle sera réalisé à l'aide du logiciel LabVIEW et des cartes Compact DAQ. LabVIEW permettra de créer l'interface utilisateur afin d'observer les données et de les enregistrer en vue de leur analyse, ainsi que de mettre en place l'intégralité du contrôle des équipements. L'implémentation du code et de l'interface utilisateur pour l'acquisition et le contrôle du système CVCA sera réalisée et présentée.

Enfin, l'objectif général étant de réfléchir à des stratégies de contrôle permettant d'optimiser les performances énergétiques du système, une autre stratégie de contrôle de la température sera choisie et conçue, en fonction des résultats de la revue de littérature et des caractéristiques de l'espace. Cette stratégie sera elle aussi implémentée sur LabVIEW.

CHAPITRE 3

ANALYSE D'UN CONTRÔLE : SERRES MARAÎCHÈRES À MAGOG

L'objectif de ce chapitre est d'étudier un contrôle de serres déjà existant et proposé dans le marché, afin de comprendre son fonctionnement et d'étudier son impact sur le maintien des consignes. Dans ce cadre, ce chapitre commence par une description des serres étudiées, des paramètres contrôlés, de l'instrumentation correspondante et des équipements installés puis enchaînera sur une présentation de la stratégie de contrôle. Il se terminera par une étude de ce contrôle sur différentes périodes puis par une discussion sur certains points du contrôle complexe à réaliser.

3.1 Description des serres

3.1.1 Taille et utilité de la serre

L'étude est réalisée sur les serres de La boîte à Légume, une ferme maraîchère située à Magog au Québec et constituée de 4 serres. Des légumes y sont produits à l'année pour ensuite être vendus, sous forme de paniers, dans un kiosque présent à la ferme ou lors de marchés. La première serre (appelée serre 1) est orientée Est-Ouest, les trois autres (appelées serres 2,3 et 4) sont orientées Nord-Sud. Plus particulièrement, l'étude va se focaliser sur les serres 1 et 3, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques des serres étudiées

	Serre 1	Serre 3
Dimensions	27,4 x 7,6m	27,4 x 9,7m
Orientation	Est-Ouest	Nord-Sud
Date de construction	2020	2024
Légumes produits	Été : concombres Hiver : mesclun	Été : tomates et poivrons Hiver : mesclun
Matériaux de recouvrement	Polycarbonate (E et O) Polyéthylène (N et S)	Polyéthylène (S, E et O)

La Figure 3.1 présente une photo de la serre 1 (à gauche) et de la serre 3 (à droite).



Figure 3.1 Serres étudiées

Ces deux serres ont été choisies pour l'étude, car elles ont été construites à deux périodes différentes. En effet la serre une a été construite en 2020 et la serre 3 en 2024. Cela fait que, bien qu'elles possèdent les mêmes équipements, leur fonctionnement est légèrement différent. En effet, la serre 3 a été mise en place en essayant de répondre à certaines problématiques soulevées dans la serre 1. Ces problématiques seront présentées par la suite.

3.1.2 Paramètres à contrôler et instrumentation

Dans chaque serre, un contrôleur de la marque PRIVA permet de contrôler la température et l'humidité. Les autres paramètres définis dans la littérature, tels que le rayonnement et le CO_2 ne sont pas régulés. L'irrigation est quant à elle réalisée manuellement par les opérateurs des serres. Pour contrôler ces deux paramètres, les serres 1 et 3 sont équipées de l'instrumentation résumée dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Mesures réalisées dans les deux serres et à l'extérieur

Mesures	Précision recommandée (Coudret, 2021)	Capteurs utilisés	Précision des capteurs
Température serre	$\pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Mesures bulbe sec et bulbe humide	0,3°C
Humidité serre	$\pm 5 \text{ } \%$		3 %
Température extérieure	$\pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$	PRIVA weather station WSC11	1°C
Humidité relative extérieure	$\pm 5 \text{ } \%$		10 %
Vitesse du vent	$\pm 5 \text{ } \%$		5 %
Direction du vent	$\pm 3 \text{ }^{\circ}$		10 °
Rayonnement solaire	$\pm 5 \text{ } \%$		10 %
Détecteur de pluie	/		/
Enregistreur	/	PRIVA	/
Stockage des données	/	PRIVA	/

Les serres sont équipées de mesures de température et d'humidité. Le boîtier contenant les capteurs est présenté sur l'image de gauche de la Figure 3.2. Une station météo avec des mesures de la vitesse du vent, de l'humidité extérieure, de la température et du rayonnement est aussi présente (Figure 3.2, image de droite). Cette station météo possède aussi un détecteur de pluie, qui permet de savoir quand il pleut, mais pas de mesurer la quantité d'eau tombée. L'entièreté des mesures de la station météo, hormis la mesure d'humidité relative, est utilisée par le contrôleur pour réguler la température et l'humidité. L'utilisation de ces mesures est détaillée dans la section 3.2.



Figure 3.2 Boîtier avec les sondes de température et d'humidité et station météo sur son mât

Les capteurs de température et d'humidité sont placés dans un boîtier ventilé situé au centre de la serre, au niveau de la canopée. Leur fonctionnement est basé sur la mesure de deux températures à l'aide de deux sondes. Une première sonde mesure la température sèche et une seconde, plongée dans un récipient d'eau placé dans le boîtier, mesure la température humide. Le récipient d'eau permet d'avoir un air saturé au niveau de la sonde. Comme il n'y a pas d'apport d'énergie, l'augmentation de l'humidité entraîne une diminution de la température à enthalpie constante jusqu'à atteindre la courbe de rosée, au niveau du point de température humide. La mesure de ces deux températures permet de déterminer l'humidité relative. La station météo est installée sur un mât, au-dessus de la serre 3.

Afin de pouvoir étudier l'ensemble des paramètres nécessaires à la croissance des plantes, une sélection de capteurs supplémentaires a été réalisée pour mesurer le CO_2 , la température du sol, le rayonnement PAR et le débit d'irrigation dans les serres. Le choix des mesures à réaliser, des capteurs, de leur précision et de leur emplacement dans les serres s'est basé sur les résultats de la revue de littérature. Ces sondes ont ensuite été installées dans les serres 1 et 3 lors d'une visite terrain réalisée le 1er juin 2025. Ces mesures supplémentaires permettent de couvrir l'ensemble des paramètres essentiels à la croissance des plantes identifiés dans la revue de littérature, dans le but d'être utilisées dans de prochaines études.

L'instrumentation des serres nécessaire au contrôle est constituée d'une sonde de température et d'humidité dans chacune d'elles, ainsi que d'une station météo. Cette instrumentation permet de récolter les données nécessaires au contrôle des équipements, qui sont décrits dans la section suivante.

3.1.3 Équipements

Plusieurs équipements sont installés dans les serres. Ils sont listés et décrits ci-dessous.

Premièrement, la ventilation est réalisée de façon mécanique à l'aide d'un ventilateur à pression positive situé en haut des serres et d'ouvrants automatiques.

Le ventilateur permet de faire entrer de l'air neuf. Cet air circule dans un ballon d'air traversant toute la serre au niveau du toit. Il est percé régulièrement afin d'homogénéiser l'apport en air neuf. Le ventilateur et le ballon sont présentés Figure 3.3.

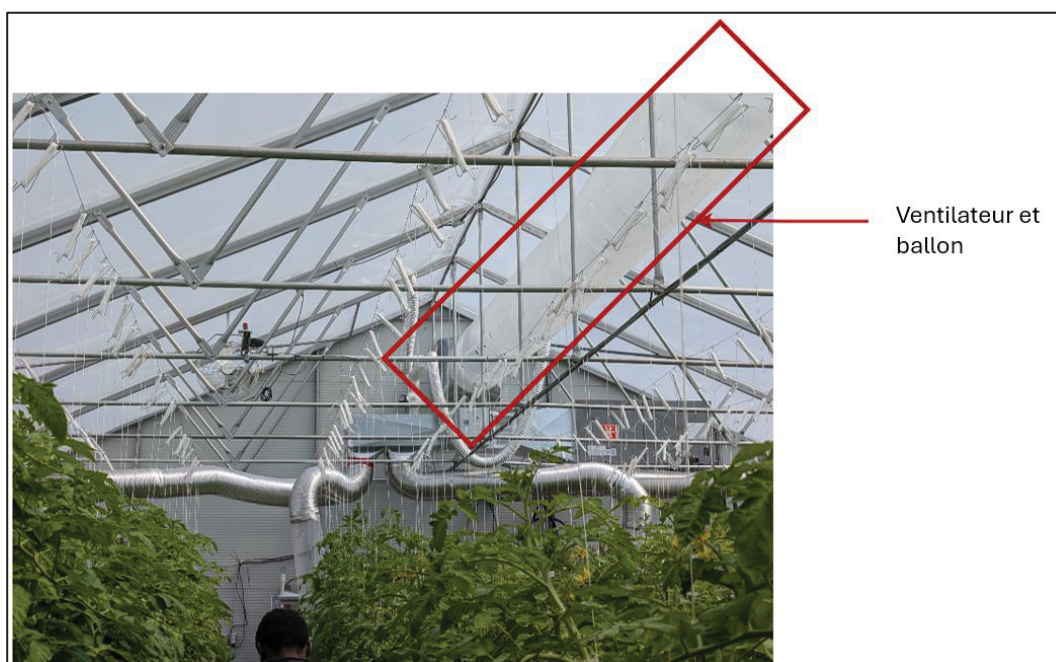


Figure 3.3 Ventilateur et ballon dans la serre 3

L'air ressort ensuite par des ouvrants automatiques, situés de chaque côté des serres c'est-à-dire sur les faces nord et sud de la serre 1 et est et ouest de la serre 3. Ils sont constitués de

rouleaux de polyéthylène qui s'enroulent ou se déroulent à l'aide d'un moteur, comme montré sur la Figure 3.4.

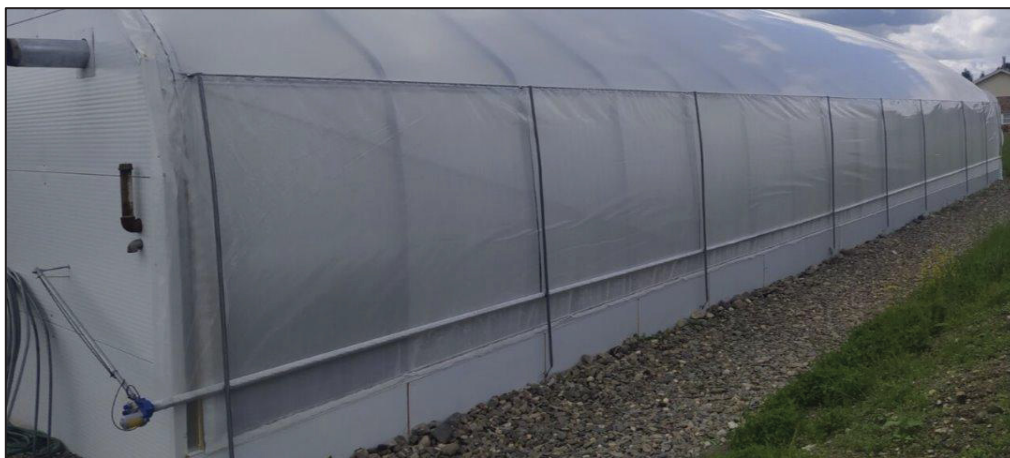


Figure 3.4 Ouvrant de la face ouest de la serre 3

Ensuite, les serres sont équipées de ventilation intérieure, comme présenté Figure 3.5. Les ventilateurs sont répartis uniformément au-dessus de la canopée. La serre 1 en possède 4 et la serre 3 en possède 5. Ils servent à faire circuler l'air dans les espaces de culture afin d'homogénéiser le climat interne et de créer un microclimat actif autour des plantes.



Figure 3.5 Ventilateur dans la serre 1

Les serres sont ensuite équipées de trois systèmes de chauffage. Ces systèmes sont schématisés Figure 3.6 et expliqués par la suite.

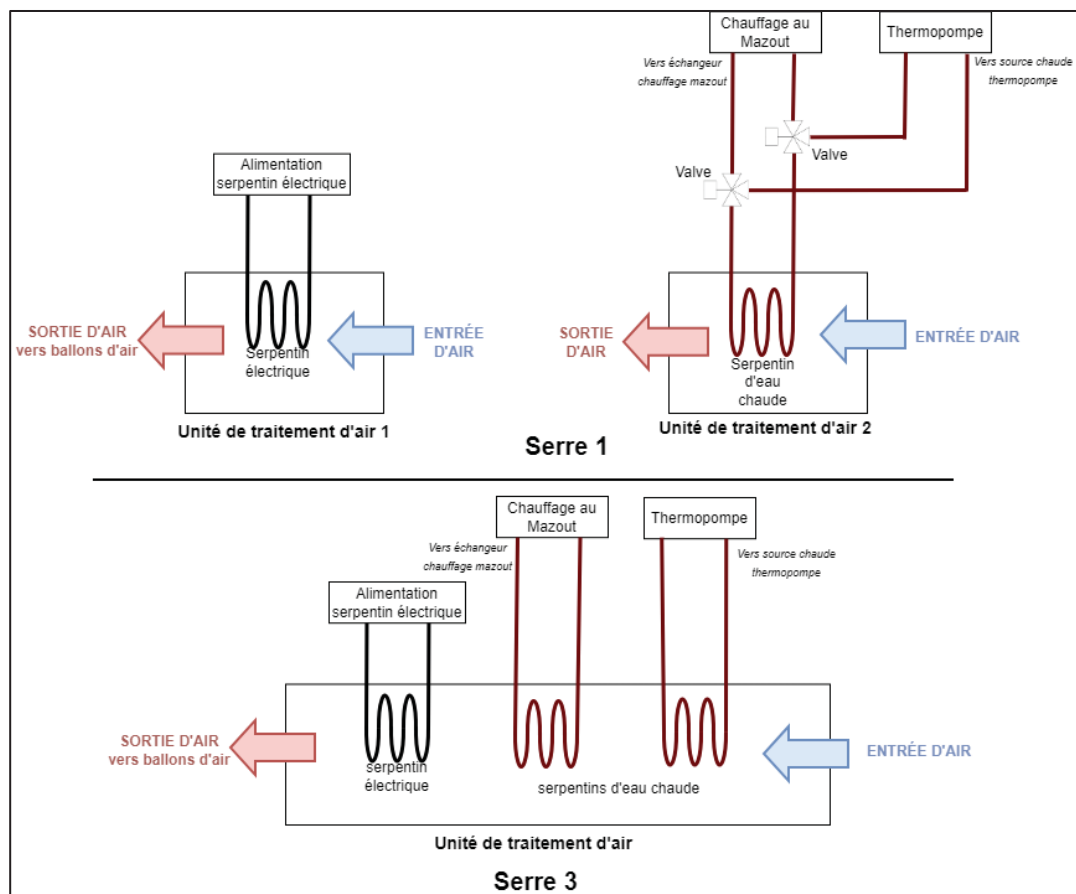


Figure 3.6 Schémas des systèmes de chauffage des serres 1 et 3

Les serres sont équipées de thermopompes air-eau avec une batterie chaude. D'après la documentation, pour une température extérieure de $8,3^{\circ}\text{C}$, la thermopompe de la serre 1 a une puissance thermique de $16,7\text{kW}_{\text{th}}$ et un COP de 2,92 et celle de la serre 3 a une puissance thermique de $17,3\text{kW}_{\text{th}}$ et un COP de 3,42. Du côté de la source chaude, l'eau circule dans des serpentins de la batterie chaude. L'air de la serre est ensuite circulé dans l'unité de traitement d'air où est située la batterie chaude, ce qui va réchauffer l'air. Dans la serre 3, l'air réchauffé est ensuite circulé au pied des plantes grâce à des ballons d'air. Dans la serre 1, l'air est directement soufflé dans la serre. La thermopompe, l'unité de traitement d'air et les tuyaux chauds de la serre 3 sont présentés Figure 3.7.



Figure 3.7 Thermopompe, unité de traitement d'air et ballons d'airs chauds (serre 3)

Les deux serres sont aussi équipées de serpentins électriques. Dans la serre 1, ils permettent de réchauffer de l'air qui est ensuite circulé dans les ballons chauds au pied des plantes. Dans la serre 3, ce serpentin chauffe l'air dans la même unité de traitement d'air que pour la thermopompe. Ils ont des puissances thermiques de 30kW_{th} d'après l'application de contrôle. Cette valeur est plus élevée que les puissances des thermopompes. En effet les thermopompes sont dimensionnées pour répondre aux besoins de chauffage la majorité du temps (hors période de grand froid). Les serpentins électriques sont eux dimensionnés pour apporter le complément de puissance nécessaire, en prenant en compte les moins bonnes performances des thermopompes par temps très froid.

Enfin les deux serres sont équipées de systèmes de chauffage au Mazout (générateur à air chaud). Ils ont des puissances thermiques de 40kW_{th} chacun d'après l'application de contrôle. Comme observé sur la Figure 3.6, dans la serre 1, le système est branché sur le même circuit d'eau que la thermopompe, les deux équipements ne peuvent donc pas fonctionner en même temps. Un interrupteur permet de passer d'un type de chauffage à un autre à l'aide de valves, lors de périodes de délestage d'Hydro-Québec par exemple.

Dans la serre 3, le système a été amélioré afin de pouvoir utiliser les deux types de chauffage en même temps. Le système au Mazout peut donc fonctionner en complément de la thermopompe lors de périodes de grand froid où les autres chauffages ne sont pas suffisants.

L'ensemble des caractéristiques des équipements est résumé dans le Tableau 3.3. Pour les serpentins électriques, le complément au mazout et les thermopompes, les puissances indiquées sont les puissances thermiques fournies à l'espace de culture. Les puissances des ventilateurs et des ouvrants automatiques sont les puissances électriques consommées lors de leur fonctionnement.

Tableau 3.3 Modèle et puissance des équipements

Équipements	Modèle	Puissance
Ventilateur à pression positive	Non connu	Non connue
Ouvrants automatiques	Non connu	Environ 100 W _e
Ventilateur	CANARM LF18HVW ou équivalent	127 W _e
Thermopompe avec serpentins	Serre 1 : Haxxair HVHD-60E2D Serre 3 : Moovair DMA60HOS20230E7	Serre 1 : 16,7 kW _{th} Serre 3 : 17,3 kW _{th}
Serpentins électriques	Non connu	30 kW _{th}
Complément au Mazout	Dettson AMT300	40 kW _{th}

Une fois l'espace d'AEC décrit puis les paramètres contrôlés, l'instrumentation et les équipements présentés, la prochaine étape consiste à mettre en place une stratégie de contrôle.

3.2 Stratégie de contrôle des serres

Les serres sont équipées d'un contrôleur de la marque PRIVA. Ce contrôleur sert à réguler la température et l'humidité. Pour cela il se base sur les mesures d'humidité et de température prises au niveau du centre des espaces de culture au niveau de la canopée, comme présenté Figure 3.8, et contrôle les différents équipements à l'aide de stratégies de contrôle tout ou rien et PID. Un site internet associé ainsi qu'une application permettent d'accéder aux différentes données des capteurs, points de consignes et aux états des équipements. L'étude de ces données et des discussions avec le gérant des serres ont permis de comprendre le fonctionnement du contrôle.

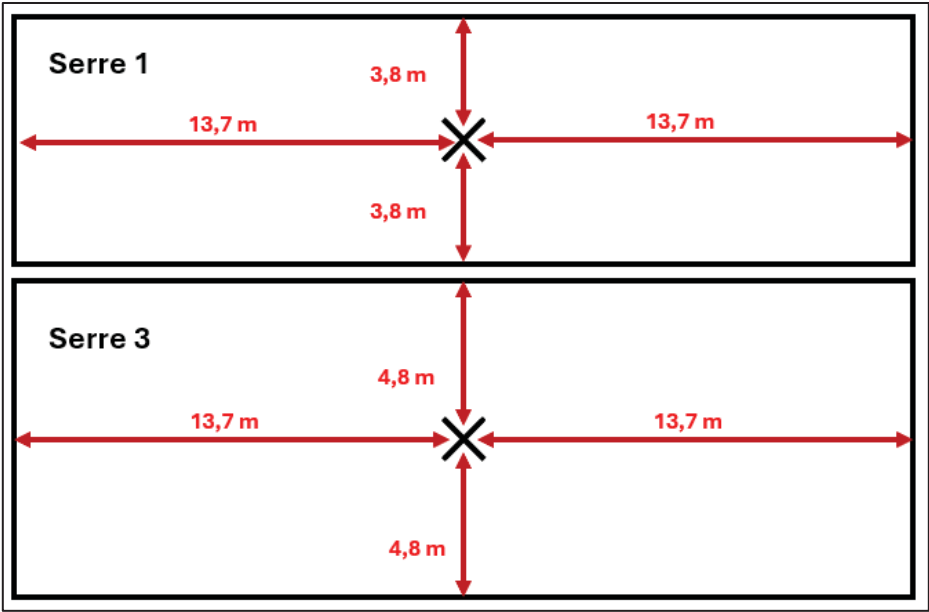


Figure 3.8 Emplacement des sondes de températures et d'humidité dans les serres vue de dessus

3.2.1 Contrôle de la température

Le contrôle de la température est basé sur des points de consigne définis comme dans la Figure 3.9, tirée du logiciel de contrôle.

t*	P1 matin	P2 jour	P3 pré-nuit	P4 nuit
heure début - contrôle de température 1	4:44	↑ 9:44	↑ 12:52	↓ 17:52
durée de la période de rampe - contrôle de température 1	1:45	1:45	1:30	1:30
température refroidissement - contrôle de la température de refroidissement 1	19.5 °C	⌢ 18.5 °C	⌢ 18.5 °C	⌢ 18.5 °C
température chauffage - contrôle de la température de chauffage 1	17 °C	⌢ 17 °C	⌢ 17 °C	⌢ 17 °C

Figure 3.9 Points de consigne pour le contrôle de la température l'été

Le contrôle est divisé en quatre périodes : le matin de 4h44 à 9h44 (P1), le jour de 9h44 à 12h52 (P2), la pré-nuit de 12h52 à 17h52 (P3) et la nuit de 17h50 à 4h45 (P4). Ces périodes restent identiques tout au long de l'année. Pour chaque période, des points de consignes en température de refroidissement et de chauffage sont définis. Ces points de consigne servent de référence pour le contrôle présenté dans la suite. Lorsque la température mesurée passe au-dessus de la température de refroidissement, le contrôle du refroidissement se met en route. À

l'inverse, si elle passe en dessous de la température de chauffage, le contrôle du chauffage se met en route.

Ces températures de consignes sont ensuite adaptées en temps réel en fonction de l'irradiance (en W/m^2) et de l'accumulation lumineuse (en J/m^2), comme montré Figure 3.10 et expliqué par la suite. Avec ce contrôleur, l'accumulation lumineuse à l'instant t est calculée en faisant l'intégrale entre le début de la journée et l'instant t de l'irradiance. Elle est en J/m^2 et non en $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ comme le DLI. Le but de cette mesure est d'ailleurs différent de la mesure de DLI. En effet, dans ce cas, cette mesure permet d'adapter les consignes de chauffage et de refroidissement et non de réguler la quantité de lumière journalière reçue par les plantes, ce qui est généralement l'objectif d'une mesure de DLI. Le choix de modifier les températures de consignes en fonction du rayonnement sert à optimiser l'effet de la photosynthèse. En effet, plus le rayonnement est important, plus la température idéale pour la photosynthèse est élevée. La Figure 3.10 montre l'évolution des températures de chauffage et de refroidissement consignes adaptées (appelées températures calculées) en fonction de l'irradiance et l'accumulation lumineuse les 1 et 2 septembre 2025 pour la serre 3.

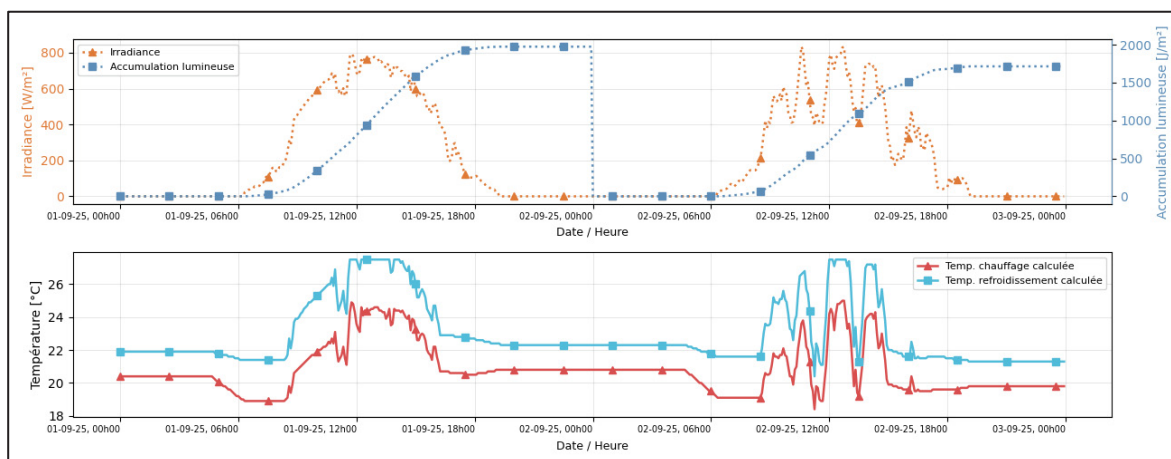


Figure 3.10 Irradiance et accumulation lumineuse ainsi que températures de chauffage et refroidissement les 1 et 2 septembre 2025

Il est observé que lorsque l'irradiance augmente, les points de consigne de chauffage (Temp chauffage calculée) et de refroidissement (Temp refroidissement calculée) augmentent aussi. Les températures de consignes sont aussi augmentées en fonction de l'accumulation lumineuse. Cela explique que les températures nocturnes sont au-dessus des consignes définies

dans la figure 3.7. Les consignes sont adaptées à l'aide de règles de logique rédigées sur l'interface de contrôle sous la forme :

« Si *intensité lumineuse extérieure* se situe entre 200 W/m^2 et 600 W/m^2 , régler température de chauffage jusqu'à 4°C pour la période 1 ».

Cette règle de logique signifie que la température de chauffage consigne (telle que définie dans la Figure 3.8) est augmentée linéairement de 0 à 4°C pour des intensités lumineuses allant de 200 W/m^2 à 600 W/m^2 , c'est-à-dire que si l'irradiance est de 600 W/m^2 , le point de consigne de chauffage est augmenté de 4°C . Des règles similaires sont écrites pour l'intensité lumineuse et pour la température de refroidissement.

Enfin une limite est définie pour l'augmentation des températures de chauffage et de refroidissement. La température de chauffage ne peut pas être augmentée de plus de 9°C supplémentaires par rapport à la température définie initialement et la température de refroidissement ne peut pas augmenter de plus de 8°C .

Ainsi, avec une température de refroidissement initiale de $18,5$ ou $19,5^\circ\text{C}$ selon la période (Figure 3.9) et une température initiale de chauffage de 17°C , la plage de température possible pour la serre 3 est comprise entre 17°C et $27,5^\circ\text{C}$ ($19,5$ plus les 8°C supplémentaires maximum possible). Cela correspond à la page de température idéale pour les tomates, produites dans cette serre, définie dans le Tableau 1.2 de la revue de littérature.

À partir de la comparaison entre les températures de consignes et la température réelle, des besoins en chauffage et en refroidissement sont calculés à l'aide de deux contrôleurs PID, dont les paramètres sont écrits Tableau 3.4 et discutés par la suite.

Tableau 3.4 Paramètres des contrôleurs PID

	Chauffage	Refroidissement
P	20 %	10 %
I	0,5 %	1 %
D	5 %	0 %

Le PID de chauffage compare la température de consigne de chauffage et la température réelle pour renvoyer le besoin de chauffage en pourcentage. Le PID de refroidissement compare la température de consigne de refroidissement à la mesure de température et renvoie le besoin de refroidissement en pourcentage. Dans le contrôleur les paramètres sont écrits en pourcentage.

La relation entre ces valeurs et les gains définis dans le Chapitre 1 est présentée dans les équations (3.1) à (3.3).

$$C_{Kp} = \frac{100}{P[\%]} \quad (3.1)$$

$$C_{Ti} = I[\%].T_{ref} \quad (3.2)$$

$$C_{Td} = D[\%].T_{ref} \quad (3.3)$$

T_{ref} est un temps de référence. Cette valeur n'a cependant pas été trouvée dans la documentation.

Un gain proportionnel de 20% signifie que la bande proportionnelle du contrôleur est de 20%. C'est-à-dire que pour une erreur sur la consigne de 20%, la sortie du PID sera un besoin de chauffage de 100%. Cela correspond à un gain proportionnel C_{Kp} de 5.

Le besoin de chauffage contrôle le fonctionnement de la thermopompe, du serpentin électrique et du chauffage au mazout. Le contrôleur de la serre n'étant pas compatible avec le contrôleur interne de la thermopompe, celle-ci est contrôlable uniquement en tout ou rien. Afin d'éviter les mises en marche et arrêts trop rapprochés et nombreux, la thermopompe doit être en fonctionnement pendant un minimum 60 secondes et à l'arrêt pendant un minimum de 60 secondes également. De plus le temps d'un cycle marche-arrêt complet doit durer au minimum 5 minutes. Ces constantes de temps sont définies dans le contrôleur PRIVA. Les points de lancement et d'arrêts des différents équipements sont résumés dans la Figure 3.11.

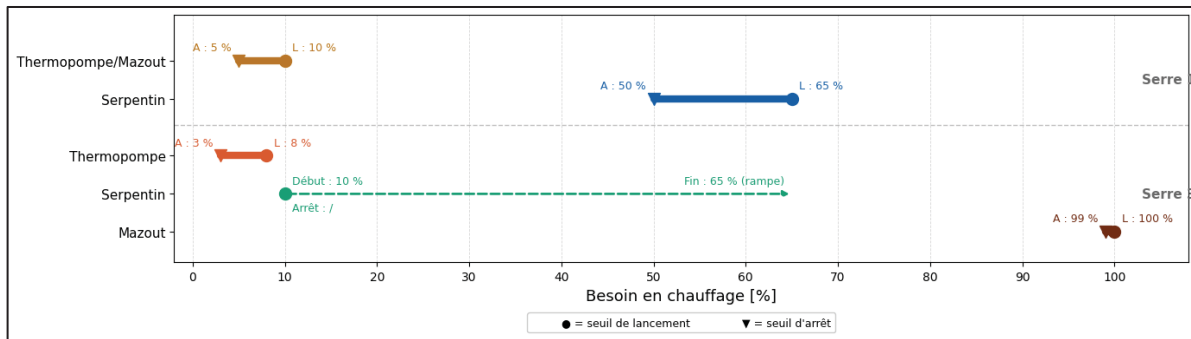


Figure 3.11 Valeurs de lancements et d'arrêts des équipements en fonction du besoin de chauffage

Tous les équipements, sauf le serpentin de la serre 3 sont actionnés avec un contrôle tout ou rien à hystérésis. Les équipements lancés en premier sont les thermopompes avec un démarrage pour un besoin de chauffage de 10% pour la serre 1 et une mise en route pour un besoin de 8% pour la serre 3. Elles se stoppent ensuite pour des besoins de 5% et de 3 % respectivement. Si le besoin en chauffage augmente malgré tout, les serpentins électriques sont ensuite lancés. Celui de la serre 1 fonctionne en tout ou rien, il est donc démarré pour un besoin de 65% et arrêté pour un besoin de 50%. Le serpentin de la serre 3 étant réglable en puissance, il est démarré à sa puissance minimale pour un besoin de 10% puis sa puissance est augmentée linéairement pour arriver à sa puissance maximale pour un besoin de chauffage de 65%. Enfin, le chauffage au mazout à un fonctionnement différent pour les deux serres. Pour la serre 1 il remplace la thermopompe à l'aide d'un switch. Pour la serre 3 il est indépendant de la thermopompe, ce qui permet de l'utiliser en complément, avec un démarrage pour un besoin de chauffage de 100% et un arrêt pour un besoin de 99%. Il sert alors dans cette serre de complément pour les périodes de grand froid, où les autres types de chauffage ne sont plus suffisants.

Ensuite, le besoin de refroidissement contrôle le ventilateur à pression positive et les ouvrants. À partir d'un besoin minimal de chauffage, les ouvrants s'ouvrent en position minimale. L'ouverture est ensuite linéaire avec le besoin en refroidissement.

Le contrôle observé combine ainsi deux des stratégies présentées dans la revue de littérature du chapitre 1 : un contrôle tout ou rien à hystérésis, utilisé pour les équipements à

fonctionnement binaire comme la thermopompe, et un contrôle PID, utilisé pour moduler en continu les besoins de chauffage et de refroidissement.

3.2.2 Contrôle de l'humidité

Le contrôle de l'humidité est basé sur le déficit d'humidité, défini comme suit :

$$D_{hum}[g/m^3] = \frac{\omega_{sat} - \omega}{V} * 1000 \quad (3.4)$$

Avec D_{hum} le déficit d'humidité en g/m^3 , ω_{sat} l'humidité spécifique à saturation en kg d'eau par kg d'air sec à la température de la serre, ω l'humidité à la température de la serre et V le volume spécifique (ou volume massique) à la température de la serre en m^3/kg . Le volume spécifique représente le volume en m^3 occupé par l'air pour un kg de cet air sec. Cette donnée est lisible sur le diagramme d'air sec. Enfin, le facteur 1000 permet de passer des kg/m^3 aux g/m^3 .

Le contrôle de l'humidité basé sur le déficit d'humidité est beaucoup utilisé dans l'horticulture. Il représente la quantité d'eau qui peut encore être absorbée par l'air. Cette donnée permet donc d'observer « l'espace d'évaporation » disponible pour la plante (Geelen et al., 2021).

Un déficit d'humidité limite est défini pour les différentes périodes de la journée, tel que présenté Figure 3.12. Les périodes sont les mêmes que pour le contrôle de la température.

t^*	P1 matin	P2 jour	P3 pré-nuit	P4 nuit
heure début - contrôle de température 1	4:44	9:44	12:52	17:52
durée de la période de rampe - contrôle de température 1	1:45	1:45	1:30	1:30
purger si humidité relative dépasse - contrôle d'humidité 1	0%	0%	0%	0%
purger si humidité déficit tombe au-dessous - contrôle d'humidité 1	3.5 g/m ³	3 g/m ³	3 g/m ³	2.2 g/m ³

Figure 3.12 Points de consigne de déficit d'humidité

À 22°C, un déficit d'humidité de 3 g/m³ correspond à une humidité relative de 84% environ. L'humidité relative maximum idéale pour les tomates est de 90% pour la revue de littérature. La valeur de déficit choisi est donc cohérente pour des températures aux alentours de 22°C. À intervalles réguliers le déficit d'humidité de la serre est calculé à l'aide des mesures de température et d'humidité. Il est ensuite comparé au déficit d'humidité de consigne.

Lorsque le déficit d'humidité passe sous la valeur de consigne, cela signifie que l'air de la serre est trop humide et qu'il y a alors un besoin de déshumidification. Celle-ci est réalisée en faisant des cycles de purge de 20 minutes avec une heure entre chaque cycle, tel que montré Figure 3.13. Cette figure représente les déficits d'humidité de la serre et consigne ainsi que les états de la purge.

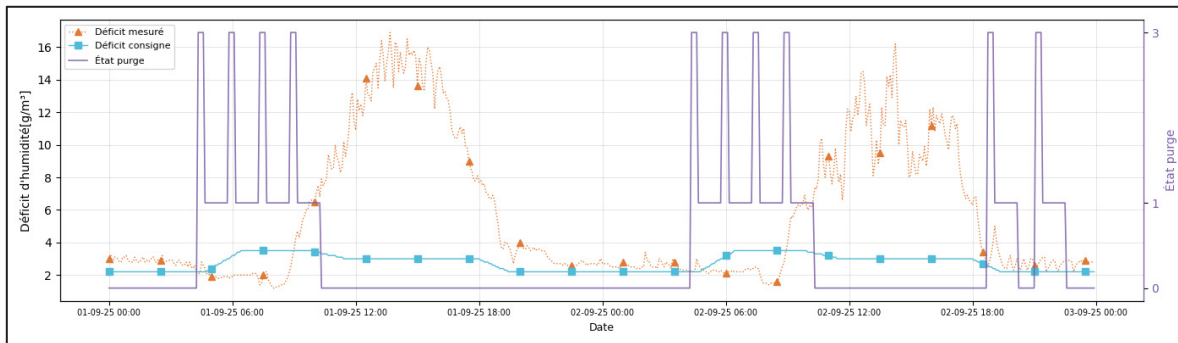


Figure 3.13 Déficit d'humidité réel, limite et cycles de purge

Lorsque l'état de la purge est à 0, cela signifie qu'il n'y a pas besoin de purge. Si la purge est à 1 ou 3, il y a un besoin de déshumidification. Un état de 3 signifie qu'un cycle de purge est en cours. Un état de 1 signifie que le système est en attente entre deux purges. La purge est réalisée en lançant le chauffage pendant un certain temps puis en activant le ventilateur à pression positive et les ouvrants. Chauffer l'air permet de faire diminuer son humidité relative. Il peut alors contenir plus d'humidité, ce qui peut lui permettre notamment d'absorber la condensation sur les parois. La serre est ensuite ventilée pour remplacer l'air humide par de l'air plus sec venant de l'extérieur. Le pourcentage d'ouverture des ouvrants lors de la purge dépend de la température extérieure, de la vitesse du vent et de la pluie. Plus il va faire froid dehors, moins les ouvrants vont s'ouvrir lors de la purge. Les ouvrants vont aussi être bloqués à un pourcentage d'ouverture maximal s'il pleut ou s'il y a trop de vent. Cependant le contrôle n'est pas basé sur la mesure de l'humidité extérieure. Ce contrôle de l'humidité est donc un contrôle tout ou rien, basé sur la comparaison d'une mesure à une valeur seuil.

3.2.3 Gestion des serres à l'année

Les points de consignes en température sont différents selon la période de l'année. Figure 3.14 permet d'observer les températures médianes, minimales et maximales pour les serres 1 et 3 et de les comparer aux conditions extérieures.

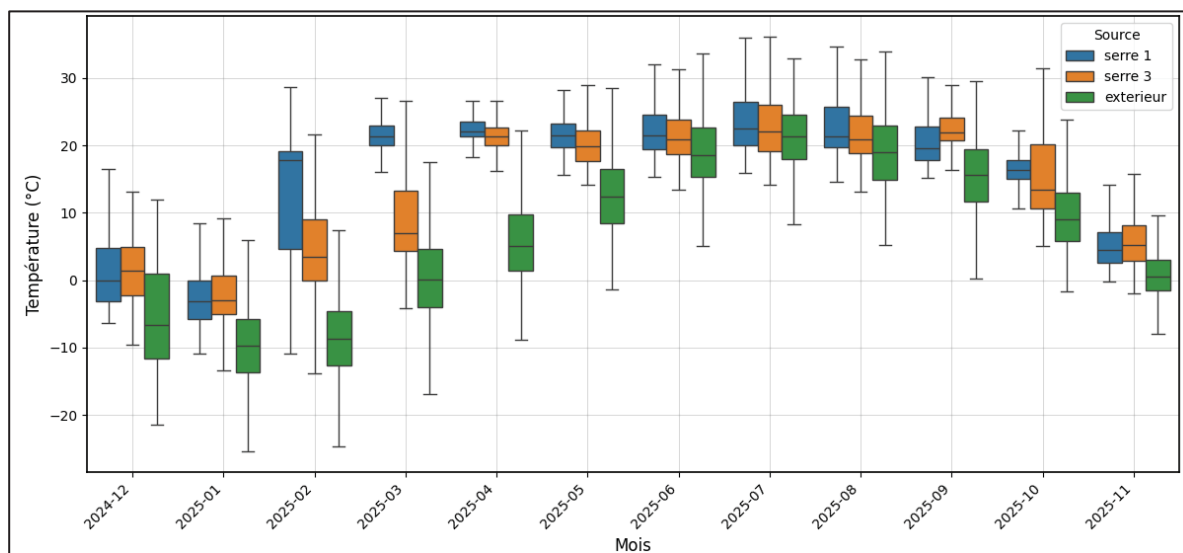


Figure 3.14 Évolution de la température dans les serres 1 et 3 et à l'extérieur sur une année

Cette figure permet de mettre en valeur plusieurs phases dans la saison de culture. La première est l'été (d'avril à septembre environ), avec des températures dans les serres aux dessus des 20°C. Il y a ensuite une phase l'hiver (de novembre à fin janvier) où l'objectif est de maintenir les températures proches des 0°C. Cela permet de produire des légumes d'hiver, moins sensibles au gel. Il y a ensuite deux périodes de transitions, au printemps et à l'automne, où les températures des serres passent des valeurs d'hiver aux valeurs d'été puis des valeurs d'été aux valeurs d'hiver. Enfin, ce graphique met en valeur le fait que la saison de culture est augmentée dans la serre 1, avec un passage aux valeurs d'été un mois plus tôt que la serre 3.

Maintenant que le principe de contrôle des serres a été décrit, une étude plus détaillée de ce contrôle est réalisée. Cette étude est réalisée sur les différentes saisons, afin de pouvoir

observer les consignes données par le contrôleur aux équipements et d'observer comment celui-ci réagit dans différentes conditions climatiques.

3.3 Étude du contrôle des serres

Afin d'analyser les prises de décision du contrôleur, une étude de son fonctionnement est réalisée en analysant les courbes des différents paramètres climatiques, des consignes de contrôle et d'état des équipements. Ces courbes sont réalisées en utilisant les données de contrôle de la serre 3. Cette serre présente en effet le contrôle le plus complet, avec les trois systèmes de chauffage contrôlables indépendamment et les serpentins réglables en puissance. Cette étude est réalisée sur plusieurs périodes de l'année, à l'aide des Figure 3.15 à 3.17 :

- En été du 10 au 14 août 2025
- En automne du 4 au 7 octobre 2025
- En hiver du 23 au 26 janvier 2026
- Au printemps du 28 avril au 1^{er} mai 2025

Pour chaque figure, le premier graphique montre l'évolution de la température extérieure ainsi que du rayonnement. Le deuxième permet d'observer la température dans la serre ainsi que les températures consignes de refroidissement et de chauffage. Le troisième représente les besoins de chauffage et de refroidissement calculés à partir des contrôleurs PID, basés sur les températures de consigne et la température dans la serre. Le quatrième graphique représente les déficits d'humidité consignes et mesurés dans la serre ainsi que les humidités absolues dans la serre et à l'extérieur. Le cinquième montre les phases de purge. Enfin les deux dernières figures montrent les états des équipements : le pourcentage d'ouverture des ouvrants, l'état de la thermopompe (éteinte lorsque son état est à 0% et allumée lorsque son état est à 100%), la puissance des serpentins et l'état du chauffage au mazout (éteinte lorsque son état est à 0% et allumée lorsque son état est à 100%).

La Figure 3.15 montre le contrôle de la serre l'été entre le 10 et le 14 août 2025.

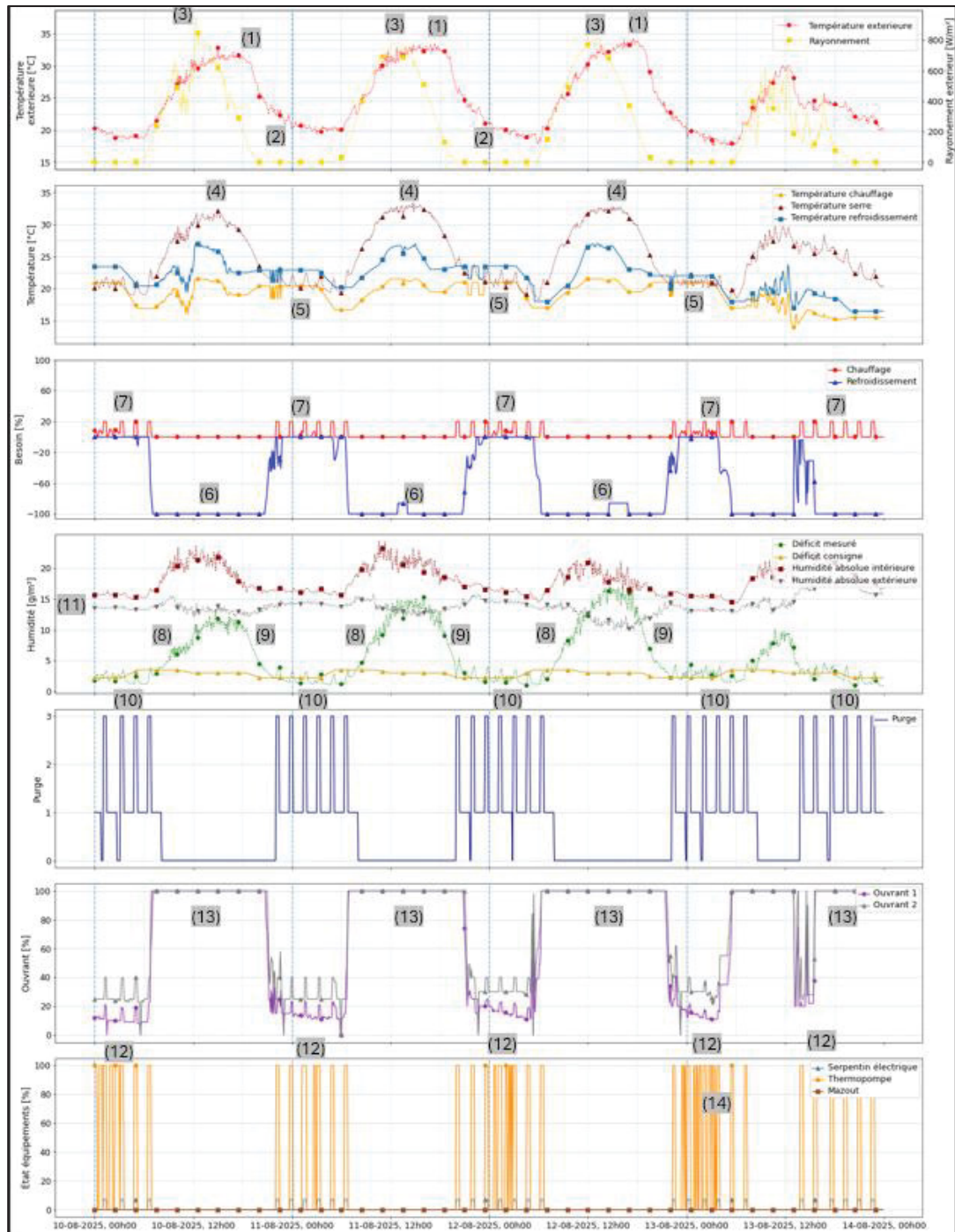


Figure 3.15 Contrôle du climat l'été

Il est observé que sur cette période la température extérieure est élevée. Elle dépasse en effet les 30°C tous les jours (1). Les températures minimales extérieures sont elles aussi élevées, aux alentours des 20°C (2). Le rayonnement extérieur est important les trois premiers jours

(jusqu'à 800 W/m^2) (3), ce qui entraîne des augmentations importantes des températures de consigne la journée. Les consignes de température dans la serre sont entre 21 et 28°C pour la température de refroidissement et entre 18 et 24°C pour la température de chauffage. La température dans la serre est elle aussi élevée la journée. Elle dépasse largement la température de refroidissement, avec jusqu'à plus de 10°C supplémentaires (4). Elle est d'ailleurs supérieure à la température extérieure pendant cette période, avec des maximales aux alentours de 35°C . La nuit, la température dans la serre reste aux alentours de la température de chauffage (5). Ces écarts de température avec la consigne en refroidissement entraînent de forts besoins de refroidissement. Le besoin est en effet de 100% toute la journée (6). Il y a aussi quelques besoins de chauffage la nuit, aux alentours des 20% (7).

Le déficit d'humidité varie dans la serre : il augmente la journée (8) et diminue la nuit (9). Cela est cohérent, car cette valeur dépend de la température. Plus celle-ci est élevée, plus l'air peut contenir de l'humidité. Donc pour une même humidité absolue, le déficit est plus important si l'air est plus chaud. La nuit, le déficit d'humidité est au niveau de la valeur consigne. Cela entraîne donc des cycles de purge (10). Les besoins cycliques de chauffage nocturne observés plus haut sont en partie causés par ces purges (7). Pour que la purge soit efficace, il faut que l'humidité extérieure soit inférieure à l'humidité intérieure. C'est le cas ici, avec une humidité extérieure inférieure à 15 g/m^3 et une humidité intérieure entre 15 et 20 g/m^3 (11).

Ces besoins en chauffage, refroidissement et déshumidification entraînent la commande des ouvrants, de la thermopompe, du serpentin électrique et du chauffage au mazout. Lors des cycles de purge, il est observé que les ouvrants s'ouvrent (12). Les ouvrants sont aussi ouverts à 100% la journée pour refroidir l'espace (13). La thermopompe et les serpentins sont ensuite aussi allumés lors des cycles de purge, juste avant l'ouverture des ouvrants. Parfois la thermopompe est aussi allumée en dehors de cycles de purge pour réchauffer la serre, comme le 13 août au matin (14). Ce contrôle ne semble pas idéal d'un point de vue énergétique à cause de l'enchaînement des phases de chauffage la nuit puis de ventilation la journée. Cependant ce choix est réalisé afin de limiter les amplitudes de températures entre le jour et la nuit, ce qui diminue le stress des plantes augmente la qualité des cultures. Ensuite, les allumages répétitifs de la thermopompe pendant la nuit peuvent l'abîmer sur le long terme et diminuer sa durée de vie. Enfin la déshumidification ne semble pas idéale. En effet le déficit d'humidité augmente

lors des cycles de purge. Cependant la déshumidification n'a pas d'effet sur le long terme, le déficit rediminuant rapidement une fois le cycle terminé.

La Figure 3.16 suivante montre le contrôle l'automne, entre le 4 et le 7 octobre.

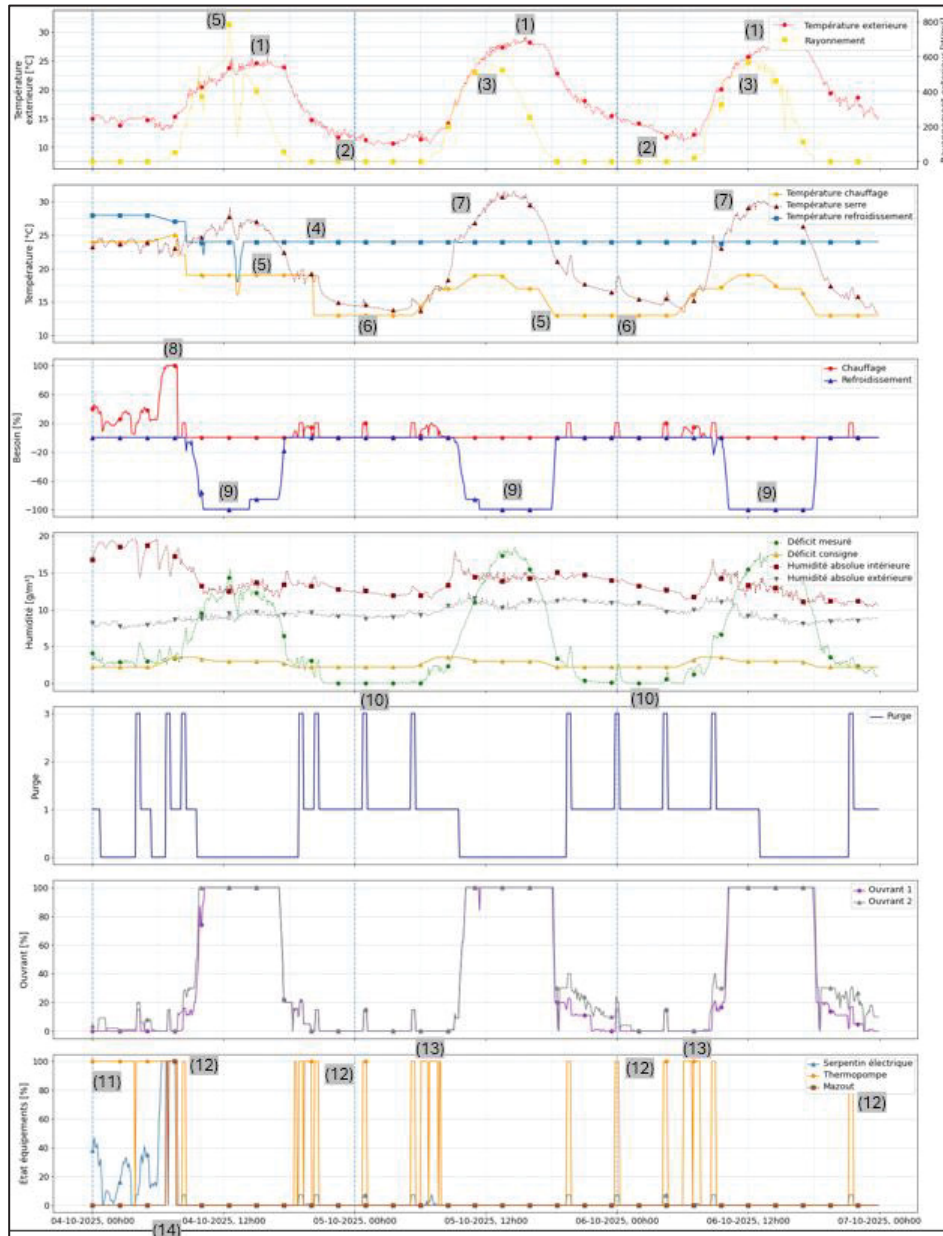


Figure 3.16 Contrôle du climat l'automne

Pendant cette période, la température extérieure oscille entre 27°C la journée (1) et 10°C la nuit (2). Le rayonnement extérieur est plus faible pendant cette période avec des maximums vers les 550 W/m² (3). La température de refroidissement reste constante à 24°C (4) et la température de chauffage reste entre 13 et 18°C (5), sauf le premier jour. La nuit, la température de la serre reste au-dessus de la température de chauffage (6). La température minimale de consigne est donc respectée. Cependant elle dépasse la température de refroidissement en journée de plus de 5°C (7).

Ainsi, les besoins en chauffage sont très faibles, sauf le premier jour avec une pointe à 100% de besoin (8). Le besoin en refroidissement est lui de 100% tous les jours (9). Ensuite, toutes les nuits le déficit d'humidité de la serre est en dessous du déficit d'humidité consigne. Cela entraîne des cycles de purge, mais ceux-ci ne semblent pas efficaces (10). L'air semble même être saturé la nuit, avec des valeurs de 0 g/m³.

Les ouvrants sont ouverts à 100% la journée pour refroidir l'espace, mais ne suffisent à le refroidir assez. Ensuite, la thermopompe est allumée en continu le premier jour (11). Elle est ensuite allumée ponctuellement, lors de cycles de purges (12) et lorsque la température de la serre passe sous la valeur de consigne (13). Le serpentin est allumé à 100% le premier jour (14), il est ensuite uniquement utilisé à faible puissance pendant les cycles de purge. Le serpentin et la thermopompe ne semblent pas suffisants le premier jour, avec le déclenchement du chauffage au mazout vers 7h du matin (14). Son utilisation peut d'ailleurs être discutée, la température extérieure augmentant juste après, faisant augmenter la température de la serre au-dessus de la consigne de refroidissement, entraînant l'ouverture des ouvrants environ une heure après.

Comme l'été, il y a donc une perte d'énergie : on chauffe avec les trois systèmes de chauffage la nuit alors qu'il fait trop chaud la journée et qu'il n'est pas possible de refroidir assez. Ce système n'est pas le plus économe énergétiquement, mais permet de limiter les amplitudes de températures.

Ensuite, la Figure 3.17 montre le contrôle de la serre l'hiver, entre le 23 et le 26 janvier.

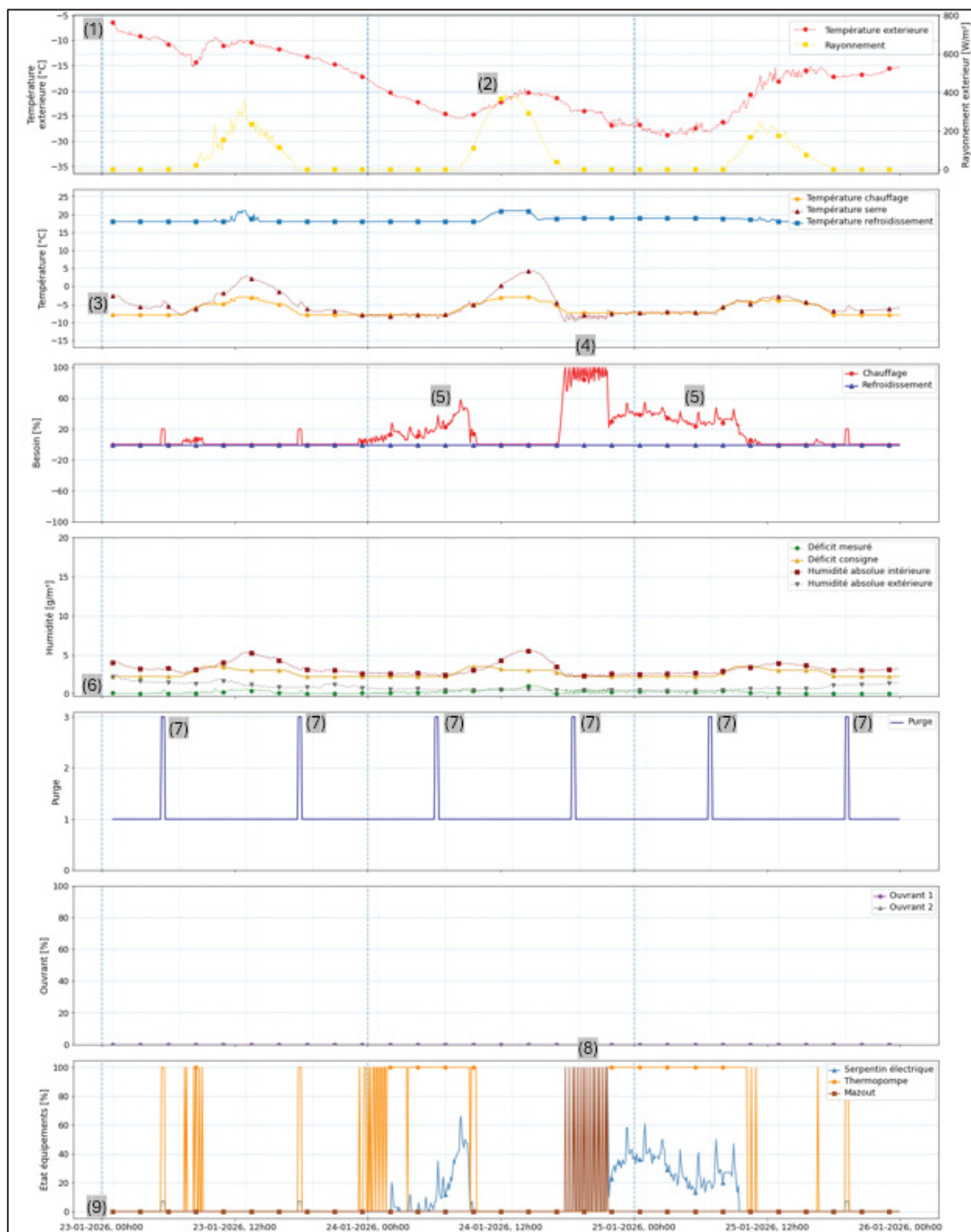


Figure 3.17 Contrôle du climat l'hiver

Pendant cette période, les températures extérieures sont fortement négatives : entre -5 et -28°C (1). Le rayonnement est faible pendant cette période avec des maximums en dessous de 400 W/m^2 pour la journée la plus ensoleillée (2). La température dans la serre reste elle aux alentours de la température de chauffage, qui est entre -10°C et 0°C (3). L'objectif est de garder la température de la serre proche de 0°C , afin de faire pousser des légumes d'hiver. Le besoin en chauffage est en général faible, avec malgré tout une pointe le 24 janvier après midi avec un besoin de 100% (4). Cela peut s'expliquer par le fait que le point de consigne de température reste lui aussi faible. Il est en effet entre -5 et 0°C , alors qu'il est vers les 20°C l'été. Lorsque l'écart avec la température extérieure n'est pas trop important, le besoin de chauffage ne dépasse pas 60% (5), ce qui signifie que le serpent et la thermopompe sont suffisants.

Pendant cette période, l'humidité de la serre n'est pas mesurée (6). En effet l'eau du capteur de température de point de rosée est retirée l'hiver pour qu'elle ne gèle pas. Dans tous les cas, un contrôle de l'humidité basé sur les mêmes valeurs de déficit d'humidité que l'été n'aurait pas de sens ici. En effet, un air à -5°C et à une humidité relative 20% donnerait un déficit d'humidité de $2,62\text{ g/m}^3$, ce qui est en dessous de la consigne, malgré l'humidité relative faible. Le contrôleur serait donc toujours en mode purge.

Malgré l'absence de mesures, des cycles de purges sont quand même réalisés de manière forcée (7). En effet, bien qu'aucune mesure ne soit réalisée pour le confirmer, l'air de la serre reste très humide l'hiver. L'utilisateur a donc choisi de forcer des cycles de purge afin de tenter de limiter cette humidité. Cette déshumidification reste limitée, les ouvrants ne pouvant pas être ouverts longtemps pour ne pas faire chuter la température de la serre.

Ensuite, on observe des cycles de mise en route et d'arrêts rapides de la thermopompe le 24 janvier vers midi, ce qui peut l'abîmer sur le long terme (8). Enfin, le système de complément au mazout n'est jamais allumé (9), alors que cette période fait partie des plus froides de la saison.

Finalement, la Figure 3.18 représente le contrôle de la serre au printemps.

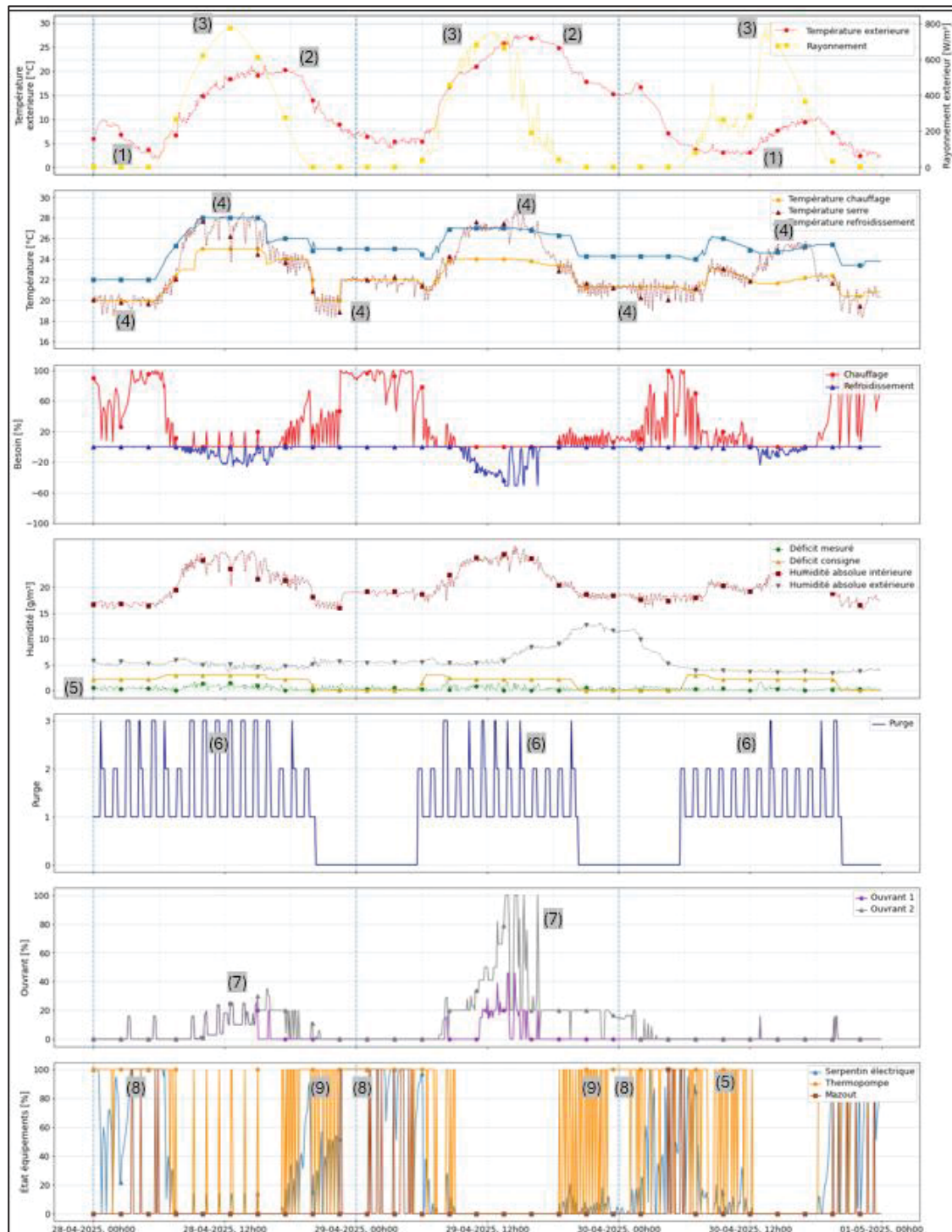


Figure 3.18 Contrôle du climat le printemps

Pendant cette période la température extérieure varie avec de grandes amplitudes, entre 0 (1) et 25°C (2). Le rayonnement est plus important que l'hiver avec des maximums entre 700 W/m² et 800 W/m² selon le jour (3). Cela entraîne des augmentations des températures de consignes entre le jour et la nuit importantes. La température de chauffage est entre 20 et 25°C et la température de refroidissement est entre 23 et 27°C. La température dans la serre respecte elle plutôt bien les valeurs de consigne limite (4).

Afin de maintenir ces conditions, un besoin de chauffage est calculé toutes les nuits et un besoin de refroidissement est nécessaire tous les jours. Le besoin de chauffage oscille entre 0 et 100% et fluctue plus que lors des autres périodes.

Le déficit d'humidité de la serre est toujours très faible (5), ce qui entraîne de nombreuses phases de purge (6). Ces cycles ne semblent cependant pas avoir beaucoup d'effet sur l'humidité.

Comme pour les périodes précédentes, les ouvrants sont ouverts le jour (7) et la thermopompe est allumée toutes les nuits (8). Les serpentins électriques sont aussi souvent allumés à des puissances importantes. La température étant rarement supérieure de 20°C, les ouvrants sont ici suffisants pour éviter d'avoir une température trop élevée dans la serre.

Enfin, des phases d'allumage et d'arrêts rapides de la thermopompe (9) sont observées, ce qui peut l'abîmer à long terme et diminuer sa durée de vie, et fait osciller la température dans la serre. Un choix différent dans les paramètres du PID de chauffage pourrait peut-être limiter ces oscillations.

Pour conclure, ces études sur différentes périodes ont permis d'observer le fonctionnement du contrôleur. Cela a permis de mettre en avant plusieurs points et choix de contrôle. Le premier est d'avoir privilégié la limite des amplitudes de températures à la consommation énergétique en chauffant la nuit et ventilant le jour. Ensuite le refroidissement étant passif, la température de la serre dépasse régulièrement la consigne lors des journées ensoleillées. Le chauffage est quant à lui suffisant. En effet le complément au mazout n'est quasiment jamais utilisé. Une des limites du chauffage reste les oscillations importantes de son besoin, qui entraînent des phases de mises en route et d'arrêts rapides de la thermopompe, ce qui peut impacter sa durée de vie.

Le contrôle de l'humidité semble quant à lui moins performant. Plusieurs problématiques sont mises en avant et discutées dans la partie suivante.

3.4 Discussion et perspectives

L'étude du contrôle sur les différentes périodes de l'année, combinée à des discussions avec l'exploitant des serres, a permis de mettre en évidence plusieurs problématiques concernant différents éléments de la boucle de contrôle présentée à la Figure 1.6 : les variables contrôlées et leur instrumentation, les variables manipulées (équipements), et le contrôleur lui-même.

Les variables contrôlées sont la température et l'humidité. Lors de l'étude du contrôle, deux problématiques ont été soulevées concernant l'humidité.

La première concerne le choix du déficit d'humidité comme point de consigne pour la déshumidification. En effet, cette consigne est une humidité absolue, indépendant de la température de la serre. Or la quantité d'humidité pouvant être contenue dans l'air dépend de la température. Comme présenté dans la Figure 1.7 de la revue de littérature, un air plus froid peut contenir moins d'eau et aura donc un déficit d'humidité plus faible pour une même humidité relative qu'un air plus chaud. Comme présenté dans la revue de littérature, les plantes sont d'ailleurs sensibles à l'humidité relative, plus précisément au VPD, qui est la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau maximale et la pression partielle de vapeur à la température ambiante. Il serait donc intéressant de changer le point de contrôle de l'humidité pour baser celle-ci sur le VPD, l'humidité relative, ou au moins de faire varier le déficit d'humidité consigne en fonction de la température. Il serait par exemple imaginable de diminuer la consigne l'hiver par rapport à l'été.

Le deuxième problème concerne l'instrumentation avec la mesure de l'humidité l'hiver. En effet le capteur basé sur les températures de bulbe sec et bulbe humide ne peut pas être utilisé avec des températures négatives à cause du gel de son réservoir d'eau. Une solution serait d'utiliser une autre technologie de capteur pour mesurer l'humidité. Par exemple, les capteurs capacitifs n'utilisent pas d'eau. Ils sont constitués d'un matériau dont sa capacité électrique varie en fonction de l'humidité. Cette capacité est ensuite mesurée pour en déduire l'humidité.

Ils sont généralement utilisés dans le secteur industriel et dans la météorologie. Il existe aussi des capteurs d'humidité à point de rosée, basés sur une mesure optique du point de rosée. Un faisceau lumineux est réfléchi sur un miroir qui est refroidi jusqu'à ce que de la condensation apparaisse dessus. Le faisceau lumineux est alors moins réfléchi, ce qui permet de détecter ce moment. Le miroir est alors au point de rosée et sa température est mesurée. Cela permet, avec une mesure de la température de l'espace, de connaître l'humidité relative. Ce capteur est cependant cher et demande un environnement propre, il semble donc moins adapté au cas du contrôle d'une serre.

Pour réguler les paramètres contrôlés, des équipements sont mis en place dans les serres. L'étude a mis en évidence le fait que le chauffage était correctement dimensionné pour subvenir aux besoins thermiques. Cependant, la ventilation utilisée pour les refroidir ne semble pas suffisante, avec des dépassements de la température de consigne allant jusqu'à 10°C en été. De plus, afin de limiter les amplitudes de température entre le jour et la nuit, le chauffage est allumé la nuit et les ouvrants sont ouverts la journée, ce qui engendre une consommation énergétique supplémentaire. Pour réduire cette consommation, l'installation d'un système de stockage thermique pourrait être étudiée. Il permettrait d'emmagasiner la chaleur la journée et la restituer la nuit, ce qui diminuerait les besoins de chauffage tout en limitant les écarts de température entre le jour et la nuit.

Enfin, certaines problématiques soulevées concernent le contrôleur et les choix réalisés pour la stratégie de contrôle.

Pour commencer, des cycles de mise en marche et d'arrêt rapide de la thermopompe sont observés au printemps (Figure 3.18). Ces cycles, s'ils sont trop fréquents, risquent d'abîmer la thermopompe et de réduire sa durée de vie. Une première solution pour éviter ces problèmes serait d'augmenter le temps entre la mise en route et l'arrêt de l'équipement pour le forcer à rester dans son état pendant un temps minimum. Ensuite, il est observé que ces cycles sont causés par une forte oscillation de la température de la serre autour du point de consigne de chauffage. Il pourrait être intéressant de modifier les paramètres du contrôle PID du chauffage

afin de limiter ces oscillations, par exemple en augmentant le coefficient C_{Ti} ou en diminuant le coefficient C_{Kp} .

La dernière problématique concerne l'optimisation du cycle de purge. Comme observé précédemment, les purges ne sont pas efficaces. Actuellement le déficit d'humidité descend rapidement le soir pour rester bas toute la nuit. De plus les cycles de déshumidifications actuels font bien diminuer l'humidité, mais leur impact est limité : dès que le cycle se termine, le déficit redescend rapidement pour repasser en dessous de la limite. Pour l'améliorer, il faut déterminer la bonne combinaison de temps de chauffage, puissance de chauffage, temps de ventilation, puissance du ventilateur à pression positive, pourcentage d'ouverture des ouvrants. L'ensemble de ces points forme le point de fonctionnement, qui est dépendant de l'humidité dans la serre et de l'humidité extérieure. Cela forme un problème complexe à multivariables. Pour résoudre ce problème, la première étape consiste à instrumenter la serre pour connaître la quantité d'air qui entre et la quantité d'air qui sort pendant les cycles de purge. Il faut ensuite déterminer l'impact réel du chauffage dans la déshumidification, afin de déterminer son temps d'allumage et sa puissance. Il faut ensuite déterminer la quantité d'air à renouveler pour déshumidifier suffisamment l'espace. À partir de cette donnée et des mesures de débit d'air en entrée et en sortie, il est possible de déterminer les différents paramètres des ouvrants et du ventilateur. Ce problème pourrait être résolu en utilisant un contrôle prédictif, voir un réseau de neurones. En effet, comme présenté dans la revue de littérature, le contrôle prédictif est conçu pour résoudre ce type de problème multivariable, en se basant sur des modèles numériques et des algorithmes d'optimisations pour arriver à la solution répondant au mieux aux demandes, qui sont d'avoir les cycles de purges les plus efficaces possibles. Le réseau de neurones permet de trouver des solutions à des problèmes complexes multivariables, sans modèle numérique. Cependant, le contrôleur PRIVA étant un système industriel propriétaire fermé, sans accès à sa programmation interne. La mise en place de telles stratégies avancées serait complexe, voire impossible, sans remplacer ou contourner le contrôleur existant.

Cette discussion a permis de mettre en avant plusieurs problématiques concrètes du contrôle des serres, tant sur la prise de mesures dans des conditions climatiques particulières que sur le

contrôle de certains paramètres climatiques. Parmi les pistes de solution évoquées, l'installation d'un système de stockage thermique se distingue par son potentiel à répondre simultanément à deux limites identifiées : la consommation énergétique excessive liée au maintien d'un chauffage nocturne et d'une ventilation diurne, tout en limitant les amplitudes thermiques entre le jour et la nuit. Le chapitre suivant s'intéresse ainsi à la mise en place du contrôle d'un tel système, installé dans une serre à Kuujuaq.

CHAPITRE 4

MISE EN PLACE D'UN CONTRÔLE : SYSTÈME DE STOCKAGE THERMIQUE À KUUJJUAQ

La deuxième étude concerne l'amélioration d'un système de stockage thermique installé en 2019 dans une serre située à Kuujjuaq, dans le Nunavik au Nord du Québec. Le but de ce système est de réduire les amplitudes de variation de température entre le jour et la nuit et d'augmenter la durée de la saison de culture.

Cependant, plusieurs problématiques concernant le contrôle ont été identifiées. Cette étude va donc servir à proposer une stratégie de contrôle répondant à ces problématiques qui sera ensuite implémentée dans un contrôleur installé sur place.

Pour cela cette étude est découpée en 5 parties. La première décrira la serre ainsi que les variables contrôlées, l'instrumentation correspondante et les équipements présents. En particulier, une description du système de stockage sera réalisée. La stratégie de contrôle actuellement en place sera ensuite décrite. Puis les problématiques de ce contrôle seront présentées, en se servant des résultats de l'étude énergétique de Piché (2021). Afin de répondre à ces problématiques, une nouvelle stratégie de contrôle est conçue et implémentée. La conception et la mise en place du contrôleur et la stratégie améliorée seront alors présentées. Le chapitre se termine par une discussion sur les prochaines étapes à réaliser.

4.1 Description de la serre

La serre étudiée est construite à Kuujjuaq, un village nordique du Nunavik situé au 58° de latitude Nord. Sa population est d'environ 3000 personnes, dont la majorité est inuit. Le climat y est polaire. La Figure 4.1 montre la carte du Nunavik avec l'emplacement de Kuujjuaq.



Figure 4.1 Carte du Nunavik

Adapté de Nunavik Maps (2013)

Le village possède deux serres communautaires, l'une construite dans les années quatre-vingt-dix et la deuxième en 2013. Chacune est découpée en parcelles qui sont exploitées par les habitants de la communauté. Un comité gère ces serres et s'occupe notamment de répartir les parcelles à chaque début de saison. Cette étude s'intéresse uniquement à la serre la plus récente et plus particulièrement au contrôle de son système de stockage thermique.

Cette serre mesure environ 140 m² et est constituée d'une couverture double vitrage en polycarbonate alvéolé. Son orientation est nord-est/sud-ouest. Des légumes variés (légumes verts, tomates, poivrons...) y sont cultivés. Actuellement la saison de culture se déroule du mois de mai au mois d'octobre. Une photo de l'extérieur de la serre et une de l'intérieur sont présentées Figure 4.2.



Figure 4.2 Serre de Kuujuaq étudiée

Dans cette serre, la seule variable contrôlée est la température. L'irrigation et l'apport en nutriments sont gérés manuellement par les exploitants de chaque parcelle et tous les autres paramètres contrôlables (humidité relative, rayonnement et CO_2) ne sont pas régulés. Pour mesurer la température, une sonde est placée au centre de l'espace de culture.

Pour réguler la température, trois équipements sont installés dans la serre : un toit ouvrant (ventilation naturelle), un ventilateur à pression positive (ventilation mécanique) et un système de stockage thermique à base de lit de roche. Jusqu'en 2025, tous ces équipements étaient régulés par un contrôleur de la marque Harnois.

Une ventilation naturelle est réalisée grâce à un toit ouvrant, présenté Figure 4.3. Il s'ouvre automatiquement lorsqu'il fait trop chaud dans la serre. Les points de consigne d'ouverture et de fermeture sont définis section 4.2

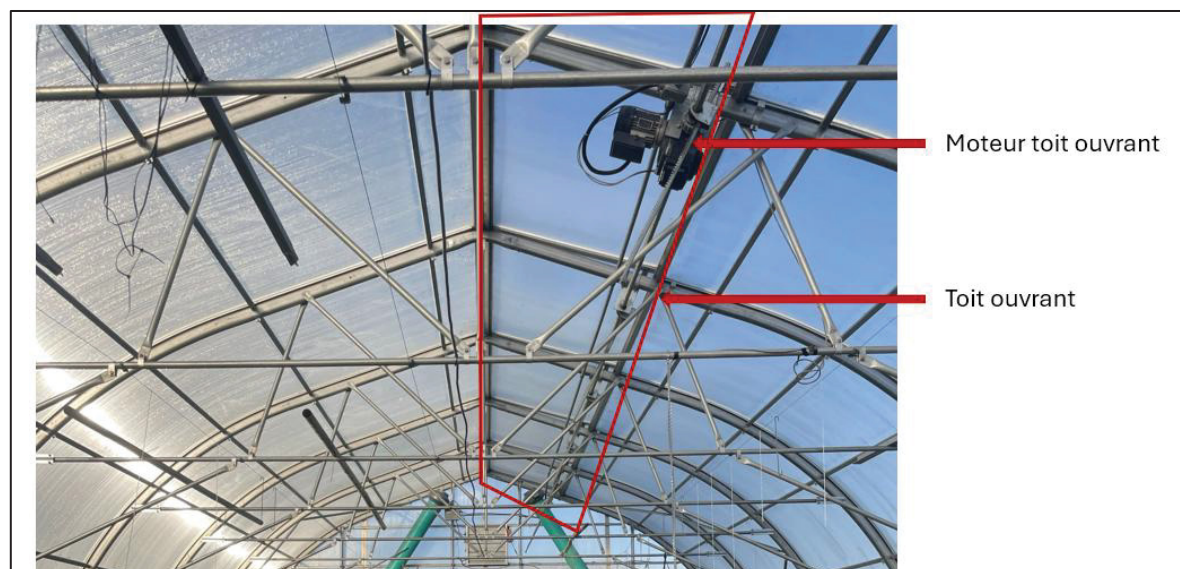


Figure 4.3 Toit ouvrant de la serre de Kuujjuaq

A une extrémité de la serre, un ventilateur permet de forcer les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur. Sur la face opposée, un volet motorisé a été installé afin de garantir une pression constante dans l'espace. Ce ventilateur était à l'origine contrôlé par le contrôleur Harnois, mais en octobre 2025 ce dernier n'était plus branché et ne fonctionnait plus. Son relais de contrôle a été relié aux ventilateurs du lit de roche. Le ventilateur et le volet motorisé sont présentés Figure 4.4.

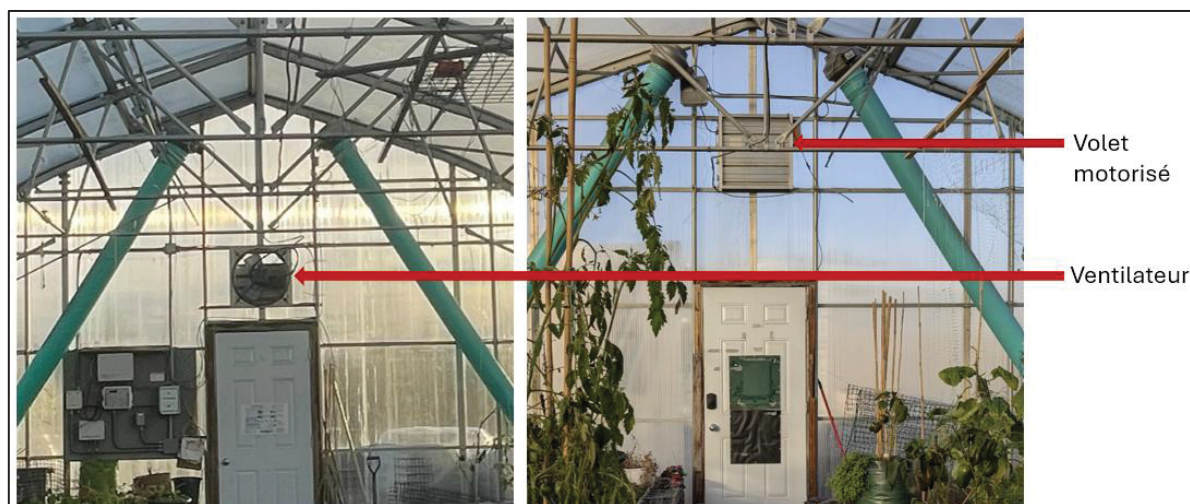


Figure 4.4 Ventilateur et volet motorisé de la serre de Kuujjuaq

Le dernier équipement est le système de stockage thermique à base de lit de roche, mis en place à la fin de l'année 2018 dans le cadre de la thèse de Piché (2021). Sa mise en place fait suite à un constat : en été dans la région de Kuujjuaq, il peut y avoir aussi bien des températures supérieures à 30°C la journée que proche de zéro voir négatives la nuit, ce qui complique la culture des plantes. Pour diminuer ce problème, le système de stockage thermique se base sur le stockage sensible en emmagasinant de la chaleur dans des roches lors des périodes trop chaudes pour la restituer lors de périodes où un apport de chaleur dans la serre est nécessaire. Sa régulation se fait à l'échelle journalière en emmagasinant de la chaleur la journée pour la restituer la nuit, mais aussi à l'échelle de la saison en emmagasinant de la chaleur en début de saison pour la restituer en cours de saison, notamment à la fin. Dans la serre de Kuujjuaq le système de stockage thermique est constitué de quatre lits de roche indépendants de 8,7m x 2,5m x 0,3m, soit un volume de 6,5m³ chacun. Ces caissons sont isolés de la terre des cultures présentes au-dessus par une bâche étanche. La Figure 4.5 présente le schéma du principe de fonctionnement d'un lit de roche.

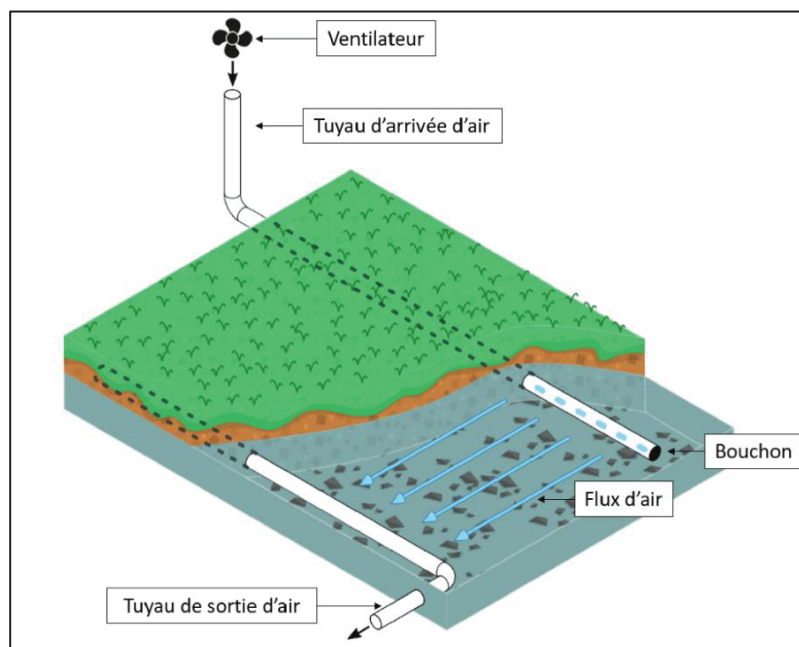


Figure 4.5 Schéma de fonctionnement du lit de roche
Tiré de Piché (2021)

L'air est circulé grâce à un ventilateur situé à l'entrée du tuyau d'arrivée d'air. Le tuyau d'entrée d'air parcourt ensuite le lit de roche dans sa longueur. Des trous positionnés à intervalles réguliers dans ce tuyau permettent à l'air de circuler dans le lit de roche. Il échange alors de la chaleur avec les roches pour se réchauffer ou se refroidir selon s'il est plus froid ou plus chaud que les roches. L'air arrive ensuite dans un second tuyau, relié à la sortie d'air située au niveau de l'allée centrale, ce qui permet de souffler l'air qui a été réchauffé ou refroidi, selon la situation. La Figure 4.6 montre les emplacements des entrées et sorties de deux des quatre lits de roche dans la serre.



Figure 4.6 Emplacement des deux lits de roche face sud-ouest

Dans la serre de Kuujjuaq, les entrées d'air du lit de roches sont situées de chaque côté de la serre proche du toit, c'est-à-dire à l'endroit où l'air est le plus chaud. Chaque entrée est équipée d'un ventilateur de 260W. Les sorties sont proches du sol, au centre de la serre.

Lorsque la serre doit être refroidie, son air est circulé dans les roches. Celles-ci vont se réchauffer et l'air va se refroidir. De l'air plus froid est alors soufflé dans la serre. Lorsque la serre doit être réchauffée, l'air est recirculé dans les roches, qui sont alors plus chaudes. À leur contact, cet air est alors réchauffé et les roches refroidies.

Pour résumer, la serre est équipée d'un toit ouvrant, d'un ventilateur à pression positive et d'un lit de roche. L'ensemble des équipements sont régulés par un contrôleur, dont la stratégie de contrôle est présentée dans la partie suivante.

4.2 Stratégie de contrôle de la serre et du système de stockage

Lors de la création de la serre, un contrôleur de la marque Harnois a été mis en place.

Il servait à contrôler les ouvrants ainsi que les ventilateurs de la serre afin de réguler la température en été.

À la mise en place du lit de roche en 2018 par Paul Piché, le contrôle des ventilateurs du lit de roche a été ajouté à ce contrôleur. Pour cela les ventilateurs de la serre ont été débranchés.

Le contrôle des équipements sont des contrôles ON/OFF à hystérésis, basés sur une mesure de température au centre de la serre. La Figure 4.7 montre le principe de fonctionnement du contrôle du lit de roche et du toit ouvrant.

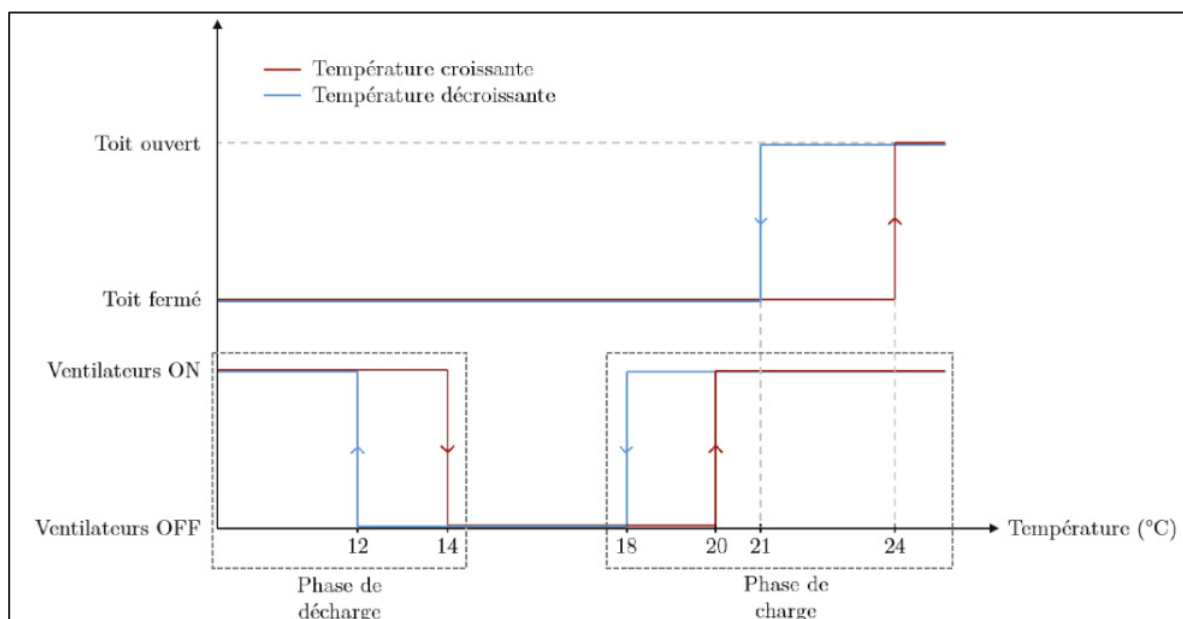


Figure 4.7 Principe de contrôle du lit de roche et des ouvrants

Tiré de Piché (2021)

Lorsque la température de la serre dépasse un seuil (20°C), les ventilateurs du lit de roche se mettent en marche pour stocker la chaleur dans les roches jusqu'à ce que la température passe

sous les 18°C. Si la température continue d'augmenter malgré la charge du lit de roche (la température passe 24°C), les ouvrants de la serre s'ouvrent pour refroidir celle-ci.

De même, les ventilateurs se mettent en marche lorsque la température de la serre passe sous une valeur seuil minimale (12°C). À ce moment, la chaleur qui a été stockée dans le lit de roche est déstockée dans la serre pour réchauffer celle-ci. Les ventilateurs se stoppent quand la température repasse au-dessus de 14°C.

Le contrôle mis en place dans la serre est de type tout ou rien à hystérésis. Il actionne l'ouverture et la fermeture du toit ouvrant et les ventilateurs du lit de roche. Une étude énergétique a ensuite été menée, afin d'analyser son fonctionnement. Cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs problématiques de contrôle, présentées dans la section suivante.

4.3 Étude du contrôle et influence sur le comportement énergétique de la serre

Après l'installation du lit de roche, Piché (2021) a étudié son impact sur les performances thermiques de la serre. Il a mis en valeur le fait que ce système de stockage thermique permettait effectivement de diminuer les écarts de température entre le jour et la nuit et d'augmenter la saison de croissance. Cette étude lui a aussi permis de mettre en valeur plusieurs problématiques du contrôle. Ces problématiques sont présentées par la suite, à l'aide de plusieurs indicateurs, définis d'après la thèse de Piché (2021).

Le premier indicateur consiste à comparer les températures d'entrée et de sortie du lit de roche. Cela permet de savoir s'il se charge ou se décharge. En effet si sa température de sortie est inférieure à sa température d'entrée, le lit de roche se charge. À l'inverse, si sa température de sortie est supérieure à sa température d'entrée, il se décharge. L'état réel du lit de roche (en charge ou en décharge) est alors comparé aux phases de charge et de décharges voulues par le contrôleur. Cela permet de savoir si le lit de roche est dans l'état souhaité.

Le deuxième indicateur consiste à calculer le coefficient de performance (COP) du système de stockage. Le COP est défini comme le rapport entre l'énergie thermique récupérée par la serre pendant une phase entière de décharge ($Q_{StoAir}^{d_n}$) par l'énergie électrique nécessaire pour charger ($Q_{elec}^{c_n}$) puis décharger ($Q_{elec}^{d_n}$) le lit de roche. $Q_{StoAir}^{d_n}$ correspond à l'intégrale sur la

durée de la phase de la n-ième décharge de la puissance thermique déstockée tel que présenté Équation (4.1)).

$$Q_{StoAir}^{d_n} = \int_{t_i}^{t_f} \dot{Q}_{StoAir}^{d_n} \cdot dt = \int_{t_i}^{t_f} 4 \cdot q_v \cdot \rho_{air} \cdot C_{p\ air} \cdot (T_{sor} - T_{ent}) \cdot dt \quad (4.1)$$

Ici $\dot{Q}_{StoAir}^{d_n}$ est la puissance thermique transmise par le stock à l'air de la serre. q_v est le débit volumique, ρ_{air} la masse volumique de l'air et $C_{p\ air}$ sa capacité thermique T_{sor} et T_{ent} représentent respectivement la température à la sortie et la température à l'entrée du lit de roche. Ensuite t_i et t_f représente les instants de début et de fin de la phase de déstockage. Enfin, un coefficient 4 est ajouté car la serre possède quatre lits de roches. Le coefficient de performance du lit de roche est alors calculé selon l'équation (4.2).

$$COP = \frac{Q_{StoAir}^{d_n}}{Q_{elec}^{c_n} + Q_{elec}^{d_n}} \quad (4.2)$$

Enfin le dernier indicateur est le coefficient de stockage. Il représente le rapport entre la quantité de chaleur stockée dans le système de stockage lors de la n-ième charge ($-Q_{StoAir}^{c_n}$) et l'énergie solaire transmise à l'intérieur de la serre pendant la phase de stockage ($Q_{so}^{c_n}$). L'énergie solaire transmise ($Q_{so}^{c_n}$) est calculé selon l'équation (4.3).

$$Q_{so}^{c_n} = \int_{t_{c,i}}^{t_{c,f}} \tau_{env} \cdot G_s \cdot A_{ser} \cdot dt \quad (4.3)$$

Ici τ_{env} correspond au coefficient de transivité de l'enveloppe de la serre ($\tau_{env}=0,8$ (Piché, 2021)), G_s l'irradiance solaire et A_{ser} la surface au sol de la serre. $t_{c,i}$ et $t_{c,f}$ correspondent au début et à la fin de la phase de stockage étudiée. Le coefficient de stockage est alors défini équation (4.4).

$$\eta_s = \frac{-Q_{StoAir}^{c_n}}{Q_{so}^{c_n}} \quad (4.4)$$

Ces trois indicateurs sont maintenant utilisés pour étudier le fonctionnement du système.

La Figure 4.8 présente les températures de sortie et d'entrée du lit de roche ainsi que les phases de charge et de décharge voulues par le contrôleur. Ces phases sont déterminées en comparant la température de la serre aux températures de consigne : si elle est supérieure à 20°C ou supérieure à 18°C avec le ventilateur allumé à l'instant d'avant alors le système doit être en phase de charge. À l'inverse, si elle est inférieure à 12°C ou inférieure à 14°C avec le ventilateur allumé à l'instant d'avant, alors le système doit être en phase de décharge. Le contrôleur est en mode charge lorsque le besoin est à 1 sur la figure et en mode décharge lorsque le besoin est à -1.

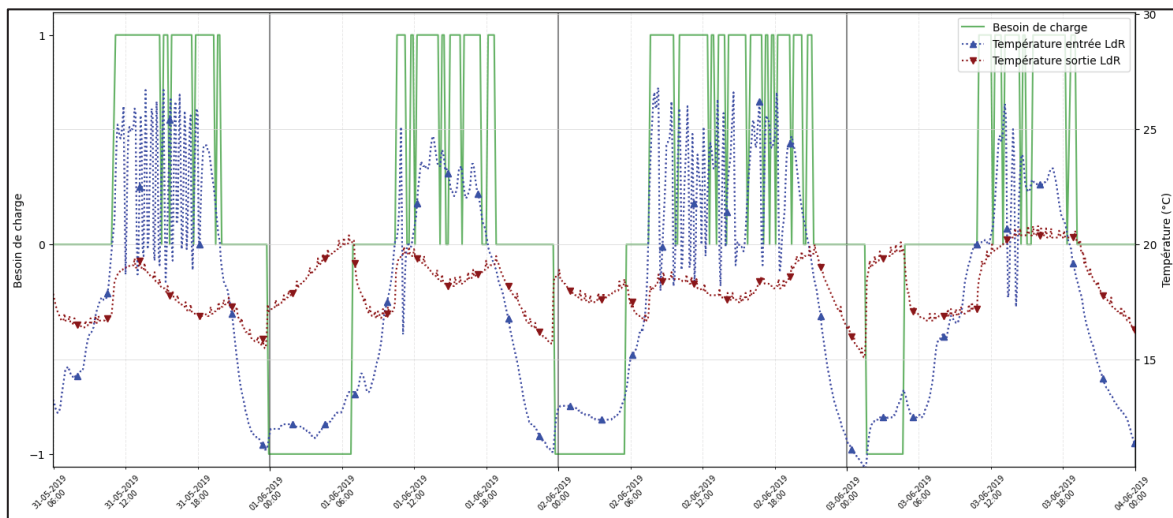


Figure 4.8 État du système et températures d'entrée et de sortie du lit de roche

Ce graphique permet d'observer des oscillations de la température d'entrée du lit de roche. Ces oscillations sont causées par l'ouverture du toit ouvrant. En effet, la prise d'air du lit de roche est proche du toit ouvrant. De plus, lorsque la température de la serre passe 24°C, le toit ouvrant s'ouvre. Ainsi, la chaleur est rejetée à l'extérieur au lieu d'être stockée. L'ouverture de celui-ci va aussi faire chuter la température d'entrée du lit de roche, ce qui peut la faire passer en dessous de la température de sortie, comme au début de la deuxième phase de charge par exemple. Pendant ce moment le lit de roche se décharge alors qu'il doit se charger.

Ensuite, l'étude des COP a permis à Piché (2021) de remarquer que pendant quelques semaines en milieu de saison, notamment entre le 26 juillet et le 15 août 2019 les COP calculés sont

inférieurs à 0.8, voire nuls. De plus les coefficients de stockage sont aux alentours de 5% pendant cette période. Cependant, le COP est en moyenne de 3,0 et le coefficient de stockage est en moyenne de 13,8% en fin de saison, soit après le 30 août 2019. Cela s'explique par le fait qu'en milieu de saison la température de la serre la nuit reste au-dessus de la température de lancement du déstockage. Le lit de roche garde donc la chaleur accumulée. Lorsqu'une nouvelle phase de charge se lance le lendemain, les ventilateurs font alors circuler de l'air chaud dans des roches déjà chaudes. Ainsi, les ventilateurs sont en route et consomment de l'énergie pour stocker très peu voire pas d'énergie.

De plus, en fin de saison la température est souvent en dessous de la température minimale de 12°C, ce qui fait que les ventilateurs sont allumés en continu pour décharger le stock, ce qui consomme de l'énergie et est inconfortable pour les utilisateurs à cause du bruit en continu.

Cela met en valeur le fait que les conditions de mise en marche des ventilateurs du lit de roche ne sont pas optimales. Piché (2021) recommande donc de prendre en compte à la fois la température de la serre et du lit de roche pour créer la stratégie de contrôle.

Pour résumé, Piché a réalisé une étude énergétique du lit roche. Elle a permis de mettre en valeur le fait que ce système permettait de diminuer les écarts de températures entre le jour et la nuit et d'augmenter la saison de culture. Il a aussi mis en valeur deux problématiques dans son contrôle :

L'ouverture du toit entraîne une perte d'énergie thermique et fait baisser la température d'entrée du lit de roche qui se met à se décharger au lieu de se charger

La prise en compte de la température de la serre comme unique critère de fonctionnement n'est pas optimale : cela entraîne des coefficients de performances faibles et un allumage des ventilateurs en continu en fin de saison.

En plus de ces problématiques, plusieurs utilisateurs ont rapporté une gêne sonore causée par le fonctionnement des ventilateurs. Une solution pour diminuer leur temps de fonctionnement doit donc être envisagée.

Afin de répondre à ces problématiques, un nouveau contrôleur ainsi qu'une stratégie de régulation améliorée ont été mis en place. Leur fonctionnement est décrit dans la section suivante.

4.4 Proposition d'une nouvelle stratégie et implantation sur site

Cette partie présente le contrôleur et la stratégie de contrôle mis en place dans la serre.

4.4.1 Cahier des charges

Afin d'apporter une réponse aux problématiques présentées plus haut, une stratégie de contrôle améliorée est proposée. L'objectif est de limiter les phases avec un COP faible et s'assurer que le lit de roche est bien dans le mode souhaité (charge ou décharge).

Pour cela, elle doit prendre en compte :

- La température de la serre
- L'état du lit de roche (est-ce qu'il se charge ou se décharge)
- L'état des ouvrants
- Les équipements contrôlés sont les ventilateurs du lit de roche et le toit ouvrant.

En répondant à ces problématiques, les ventilateurs des lits de roche devraient aussi être allumés moins souvent, les conditions d'allumage devenant plus contraignantes, ce qui devrait améliorer les conditions pour les utilisateurs.

Une stratégie de contrôle est été formulée dans le cadre de cette maîtrise. Elle doit pouvoir s'écrire sous la forme de règles de logique, afin de pouvoir être implémentée dans le logiciel de contrôle. Cette stratégie est présentée Figure 4.9 et expliquée ci-dessous.

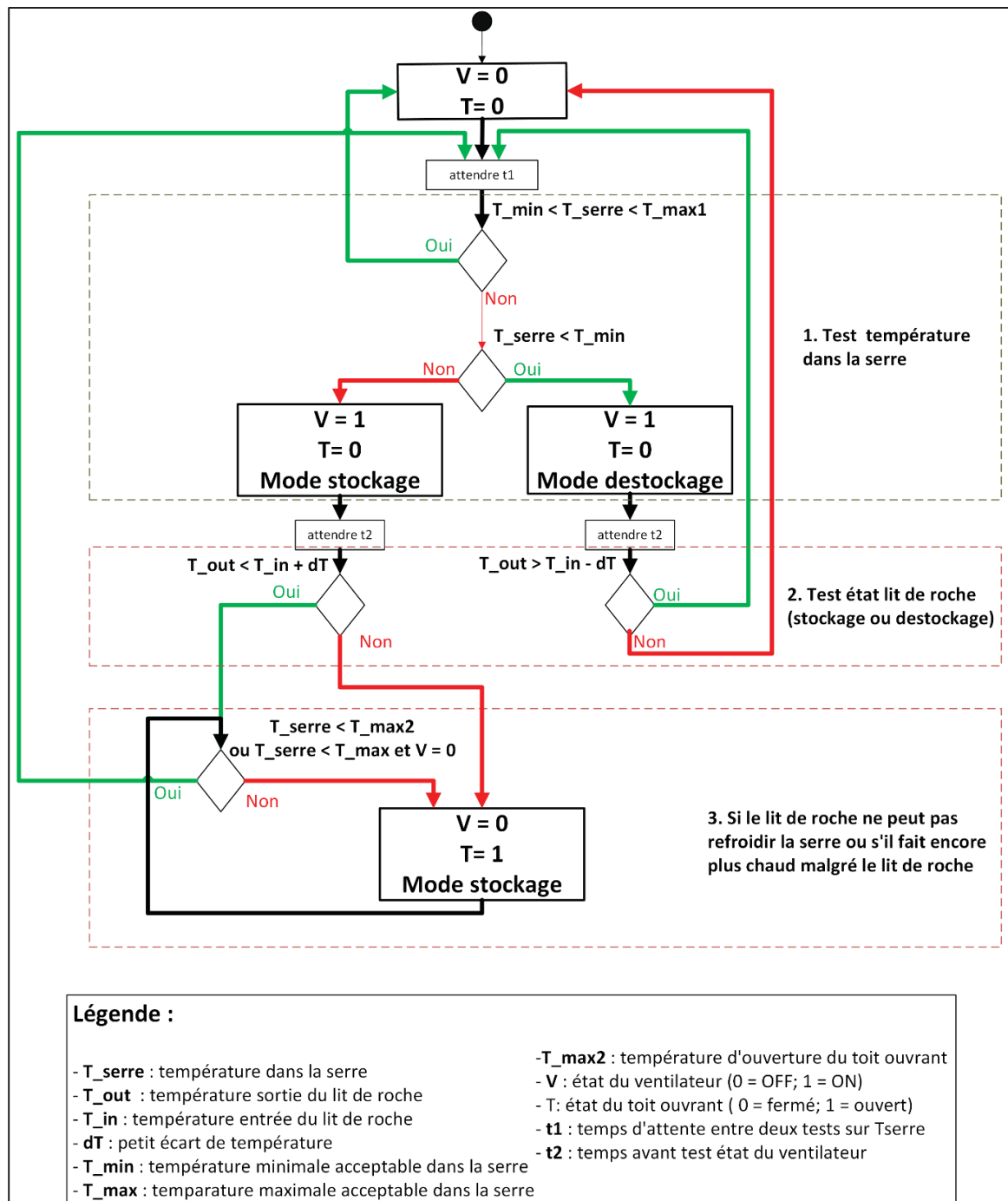


Figure 4.9 Schéma de contrôle de la serre

La priorité est d'utiliser le lit de roche avant le toit ouvrant, afin de perdre le moins d'énergie possible. La première étape consiste à définir des températures minimales et maximales acceptables dans la serre. Toutes les $t1$ secondes, la température de la serre est comparée à ses

températures limites, c'est-à-dire $T_{\min}$ et $T_{\max1}$ (étape 1). Ce temps doit être défini de telle sorte à éviter les démarrages et arrêts trop rapprochés des ventilateurs lorsque la température oscille autour de la consigne. Si l'intervalle est respecté, les ventilateurs du lit de roche sont éteints et le toit ouvrant est fermé. Si ce n'est pas le cas, la température de la serre est comparée à $T_{\min}$ afin de déterminer le mode de fonctionnement à adopter : si elle est inférieure à $T_{\min}$, le système passe en mode déstockage, afin de récupérer la chaleur emmagasinée dans le lit de roche. Si elle est supérieure à $T_{\max}$ (c'est-à-dire si elle n'est ni inférieure à $T_{\min}$ ni dans la plage acceptable), le système passe en mode stockage, afin d'emmagasiner l'excès de chaleur dans le lit de roche. Dans les deux cas, les ventilateurs des lits de roche sont allumés pendant t_2 secondes, puis les températures d'entrée et de sortie sont comparées (étape 2). Cela permet de vérifier si le lit de roche est bien dans le mode souhaité. Si c'est le cas, les ventilateurs restent allumés. Si ce n'est pas le cas, ils sont éteints. Un décalage de dT °C peut être instauré lors de tests sur l'état du lit de roche. Cela permet d'éviter aux ventilateurs de se mettre en route alors que les températures d'entrée et de sortie sont proches, afin d'éviter de fonctionner à un COP faible. Enfin, si la température de la serre continue d'augmenter malgré le stockage dans le lit de roche (c'est-à-dire si elle dépasse $T_{\max2}$ qui est supérieur à $T_{\max}$), ou qu'il y a un besoin de refroidissement, mais que le lit de roche ne peut pas se charger plus alors le lit de roche est éteint et le toit ouvrant est ouvert (étape 3).

Cette stratégie de contrôle doit être implémentée dans un nouveau contrôleur, conçu en partenariat avec l'université de Pau. Il a été choisi de changer de contrôleur, car il donne un accès total à ses données et permet de facilement mettre en place des stratégies de contrôle et de les modifier pour les tester, y compris à distance, contrairement à l'ancien. Il permet aussi d'installer et d'ajouter facilement des mesures de température, d'humidité et des pyranomètres dans la serre. Il est donc utilisé pour mettre en place et étudier le contrôle du lit de roche ainsi que pour récolter des données sur l'espace étudié. Cependant, il n'a encore jamais été testé dans des conditions de climat nordique, qui peuvent être extrêmes. Sa robustesse doit donc encore être prouvée. À cause de cela, les utilisateurs de la serre ont demandé qu'un autre contrôleur, dont le fonctionnement dans des conditions nordiques est validé, soit mis en place pour contrôler le toit ouvrant et les ventilateurs de la serre, afin de garantir leur fonctionnement

pour limiter les températures trop importantes l'été. Par la suite, si la robustesse du nouveau contrôleur est validée, il pourra réguler le lit de roche et le toit ouvrant.

Actuellement il y a donc deux contrôleurs :

- Un contrôleur industriel qui contrôle le toit ouvrant et le ventilateur de la serre
- Un contrôleur maison qui contrôle uniquement le lit de roche et qui récolte des données

Ainsi les deux parties suivantes de ce mémoire vont s'intéresser au fonctionnement du contrôleur maison et de sa mise en place dans la serre puis de la stratégie de contrôle réellement implantée dans celui-ci.

4.4.2 Conception du dispositif expérimental

L'objectif de ce contrôleur est de pouvoir gérer la charge et la décharge du lit de roche en contrôlant ses ventilateurs, d'avoir accès à l'état du toit ouvrant (ouvert ou fermé) et de récolter des données de température et d'humidité. Pour cela le contrôleur est constitué de plusieurs composants.

Les premiers sont les cartes dites cartes météo telles que celle présentée Figure 4.10.

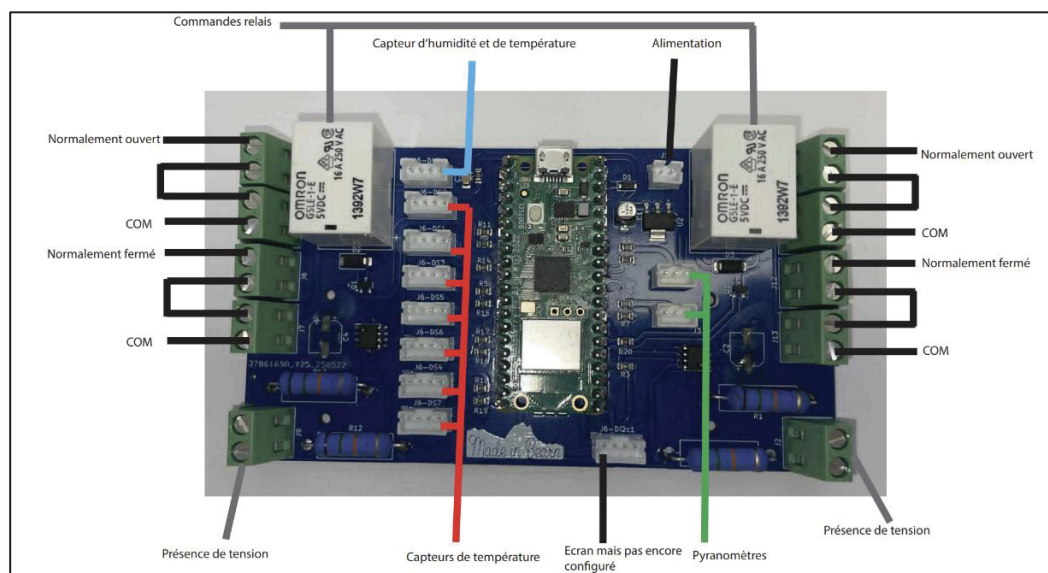


Figure 4.10 Carte météo installée à Kuujuaq

Chaque carte possède 7 entrées pour des capteurs de température type DS18B20 et une entrée pour un capteur de température et d'humidité type DHT22. Les DS18B20 et DHT22 ont une précision de 0,5°C en température et le DHT22 une précision de 2 % en humidité. La précision en température, bien qu'inférieure aux 0,2°C recommandés dans la littérature, est imposée par le choix de la carte. La précision en humidité, elle, respecte la recommandation de 5 %. Elles ont également deux entrées pour des pyranomètres, deux relais pour contrôler des équipements comme des ventilateurs et deux entrées de détection de présence de tension. Il y a aussi la possibilité de brancher un écran.

Un Raspberry Pi est utilisé. Dans ce Raspberry un logiciel, Gysmo, qui a aussi été conçu à l'université de Pau, est installé. Il permet de pouvoir accéder aux données, mais aussi de programmer des stratégies de contrôle sous la forme de règles de logiques, basées sur les mesures réalisées dans la serre et de constantes définies dans le logiciel.

Un routeur WIFI (TAP) est ensuite installé pour faire communiquer l'ensemble des composants. L'installation complète est présentée Figure 4.11 et son fonctionnement est décrit par la suite.

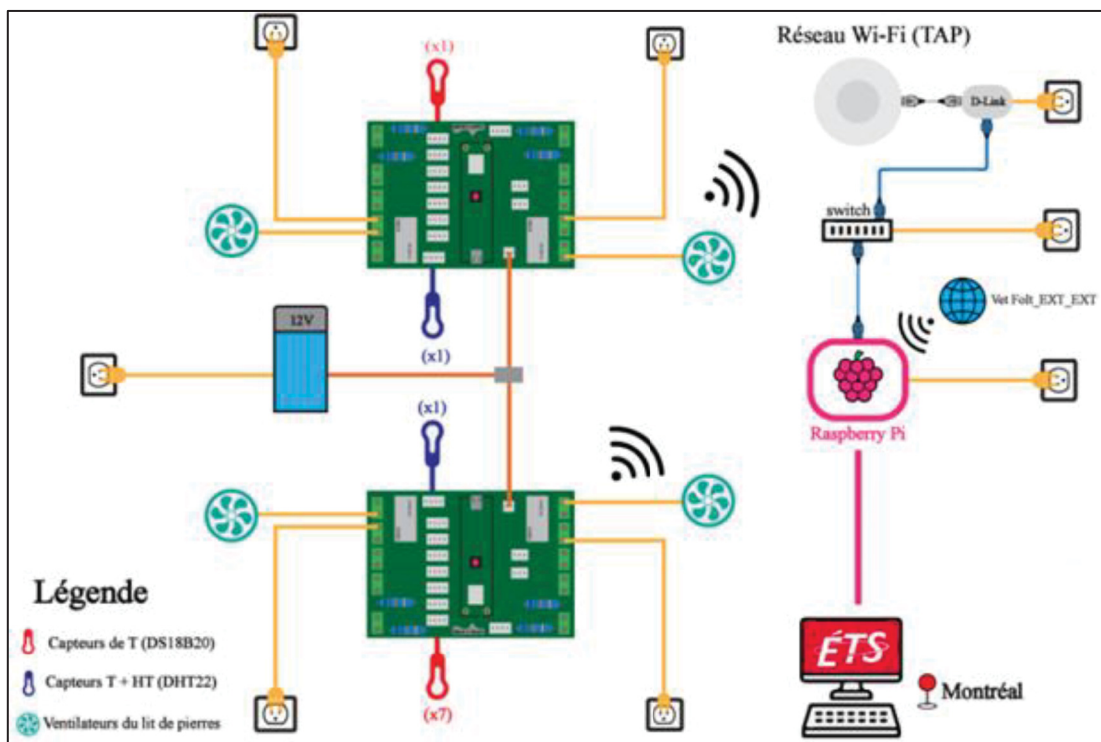


Figure 4.11 Branchements et fonctionnement du contrôleur

Dans la serre de Kuujjuaq, deux cartes ont été installées à proximité des ventilateurs des lits de roche. Ces cartes sont alimentées en 12 volts, à l'aide d'une alimentation placée sur le panneau de contrôle. Elles sont branchées aux ventilateurs des lits de roches via les relais. Les capteurs sont aussi branchés sur la carte. Ensuite, elles se connectent automatiquement en WIFI à un routeur (TAP). Ce routeur est branché en Ethernet au Raspberry Pi. C'est le Raspberry qui gère ce réseau et qui donne les adresses IP aux équipements connectés, en particulier aux cartes météo.

Le Raspberry Pi sert à faire circuler les données entre Gysmo et les cartes météo à l'aide du protocole MQTT, dont le principe est décrit ci-dessous.

Ce contrôleur et ce logiciel sont ensuite utilisés pour récolter des données et pour mettre en place une stratégie de contrôle. Les parties suivantes s'intéressent uniquement à la mise en place de la stratégie de contrôle.

MQTT est un protocole publication-abonnement. Les clients (les cartes météo et le logiciel Gysmo) se connectent à un broker (sur le Raspberry Pi) pour publier ou recevoir des messages (envoyer les mesures des capteurs ou recevoir les consignes de contrôle par exemple). Le broker permet de recevoir les messages et de les renvoyer aux clients abonnés à ces messages, c'est-à-dire aux clients qui ont accepté de les recevoir. Le Raspberry est ensuite lui-même connecté en WIFI au réseau de la serre (réseau Vet Folk_EXT_EXT), ce qui permet de pouvoir y accéder à distance, pour récupérer les données ou modifier la stratégie de contrôle par exemple.

Ce contrôleur est ensuite utilisé pour mettre en place la stratégie de contrôle du lit de roche. La version finale de cette régulation et son implémentation sur Gysmo sont expliquées dans la section suivante.

4.4.3 Implantation de la stratégie de contrôle

Comme expliqué précédemment, le système réel est constitué de deux contrôleurs. Le premier régule l'ouverture du toit ouvrant et la mise en route du ventilateur de la serre et le second, mis en place dans le cadre de ce mémoire, ne contrôle que les ventilateurs du lit de roche. La

stratégie de contrôle doit donc être adaptée. La Figure 4.12 présente ainsi la stratégie réellement implantée dans le système. Cette stratégie est adaptée de celle proposée Figure 4.9.

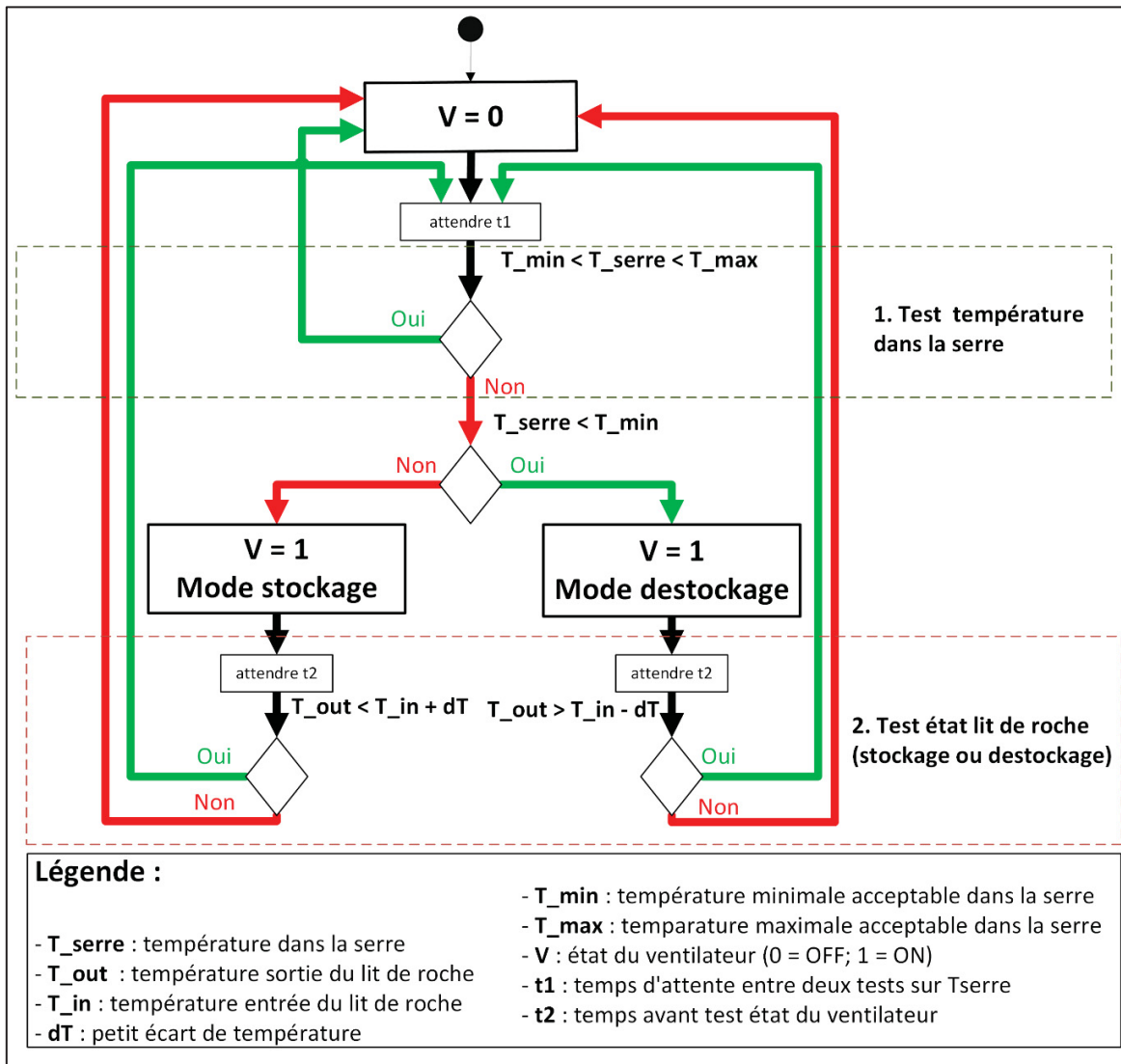


Figure 4.12 Stratégie de contrôle du lit de roche

Le principe de contrôle proposé est similaire à la stratégie de contrôle précédente, mais sans l'étape sur l'ouverture du toit ouvrant (étape 3). Elle est donc découpée en deux étapes. La première est de comparer la température de la serre aux températures limites de consigne à intervalles réguliers (toutes les $t1$ secondes). Si la température dans la serre est trop chaude (supérieure à T_{max}) alors le lit de roche passe en mode stockage. Si elle est trop froide (inférieure à T_{min}) alors il passe en mode déstockage. Dans les deux cas, les ventilateurs des

serres sont allumés pendant t_2 secondes, puis les températures d'entrée et de sortie sont comparées. Cela permet de vérifier si le lit de roche est bien dans le mode souhaité. Si c'est le cas, les ventilateurs restent allumés. Si ce n'est pas le cas, ils sont éteints. Un décalage de dT °C peut être instauré lors de tests sur l'état du lit de roche. Cela permet d'éviter aux ventilateurs de se mettre en route alors que les températures d'entrée et de sortie sont proches, afin de ne pas fonctionner à un COP faible. Les mesures sur la température dans la serre et sur l'état du lit de roche sont ensuite réalisées toutes les t_1 secondes.

Les paramètres définis dans le contrôleur sont présentés Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Valeurs des paramètres du contrôle

Paramètres	Valeurs
$T_{\min}$	12°C
$T_{\max}$	20°C
t_1	5 minutes
t_2	1 minute
dT	1°C

La constante de temps t_1 a été choisie de telle sorte à éviter les cycles d'arrêt et de lancement trop rapide des ventilateurs si la température de la serre oscille autour de la consigne. t_2 a été déterminé afin de s'assurer que l'air circule dans le lit de roches avant de comparer ses températures d'entrée et de sortie.

Pour implémenter les règles de logiques dans le logiciel Gysmo, il faut les écrire dans un fichier texte qui est ensuite importé dans le logiciel. Les Figure 4.13 et Figure 4.14 présentent le fichier texte de la stratégie de contrôle du lit de roche importée sur Gysmo. Les règles d'écriture de ce fichier sont ensuite expliquées.

```

! Règle de contrôle des ventilateurs du lit de pierre de Kuujjuaq

! Variables :
! T_serre = 7-T-DS
! T_min = 1-T-DS
! T_out = 5-T-DS

! Consignes :
! T_min = 12
! T_max = 20
! dT = 1

RULE VENT_OFF ! Si la température est entre T_min et T_max, elle est satisfaisante et le lit de
! roche est éteint

IF 7-T-DS > T_min [1m] ! On vérifie que la condition est respectée pendant 1 minute
IF 7-T-DS < T_max [1m]

THEN 1R = 0
THEN 2R = 0
THEN 3R = 0
THEN 4R = 0

PRIORITY 0
SLEEP 5m

RULE VENT_ON_S ! Si la température de la serre est trop importante, on allume les ventilateurs pour stocker

IF 7-T-DS >= T_max [1m]
THEN 1R = 1
THEN 2R = 1
THEN 3R = 1
THEN 4R = 1

PRIORITY 0
SLEEP 1m

RULE VENT_OFF_S ! On vérifie que le lit de roche est bien en train de stocker

IF 1R = 1
IF 2R = 1
IF 3R = 1
IF 4R = 1
IF 5-T-DS >= 1-T-DHT - dT [1m]
IF 7-T-DS >= T_max [1m] ! permet de vérifier qu'on est en mode déstockage

THEN 1R = 0
THEN 2R = 0
THEN 3R = 0
THEN 4R = 0

PRIORITY 0
SLEEP 5m

```

Figure 4.13 Stratégie de contrôle implémentée dans Gysmo partie 1

```

RULE VENT_ON_D ! SI il fait trop froid dans la serre, on allume les ventilateurs pour déstocker
IF 7-T-DS <= T_min [1m]

THEN 1R = 1
THEN 2R = 1
THEN 3R = 1
THEN 4R = 1

PRIORITY 0
SLEEP 1m

RULE VENT_OFF_D !! On vérifie que le lit de roche est bien en train de déstocker
IF 1R = 1
IF 2R = 1
IF 3R = 1
IF 4R = 1
IF 5-T-DS <= 1-T-DHT + dT [1m]
IF 7-T-DS <= T_min [1m] ! permet de vérifier qu'on est en mode déstockage

THEN 1R = 0
THEN 2R = 0
THEN 3R = 0
THEN 4R = 0

PRIORITY 0
SLEEP 5m

```

Figure 4.14 Stratégie de contrôle implémentée dans Gysmo partie 2

Les ventilateurs des quatre lits de roche sont régulés à l'aide de relais appelés 1R, 2R, 3R, 4R. Les noms des capteurs utilisés dans les règles de logiques sont ceux donnés dans le logiciel Gysmo et diffèrent de ceux utilisés dans ce mémoire. Les correspondances sont notées au début du programme. Les mesures de températures sont réalisées toutes les trente secondes. La température de la serre est mesurée au centre de l'espace de culture. Les températures d'entrée et de sortie (T_{in} et T_{out}) sont mesurées sur le lit de roche sud.

Dans Gysmo, la régulation est rédigée sous forme de règles de logiques. Chaque règle commence par « RULE » suivi de son nom. Les conditions à respecter ainsi que le temps pendant lequel elle doit être respectée sont ensuite écrits. Puis, les actions à faire si les conditions sont remplies sont données. Enfin un temps de pause (SLEEP) peut être défini. Il correspond au temps d'attente avant de relancer une règle, et représente donc les temps t_1 ou t_2 selon la règle lancée. Par exemple, la règle « RULE Vent_OFF » vérifie que la température de la serre est comprise entre T_{min} et T_{max} pendant une minute. Si c'est le cas, les relais

des quatre lits de roche sont éteints, puis le contrôle ne fait aucune action pendant 5 minutes. Cela correspond à la partie 1 de la Figure 4.12. Les autres règles suivent la même logique. En tout, cinq règles ont été créées afin de représenter l'ensemble des cas. Ces règles sont résumées dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Règles de logiques définies sur Gysmo

Nom de la règle	Fonction
VENT_OFF	Si la température du lit de roche est entre T_{min} et T_{max} , alors les ventilateurs sont éteints et le contrôleur attend 5 minutes
VENT_ON_S	Si la température du lit de roche est supérieure à T_{max} alors les ventilateurs sont allumés pour stocker et le contrôleur attend 1 minute
VENT_OFF_S	Si les ventilateurs sont allumés pour stocker de la chaleur, mais que le système déstocke alors ils sont éteints et le contrôleur attend 5 minutes
VENT_ON_D	Si la température du lit de roche est inférieure à T_{min} alors les ventilateurs sont allumés et le contrôleur attend 1 minute
VENT_OFF_D	Si les ventilateurs sont allumés pour déstocker de la chaleur, mais que le système stocke alors ils sont éteints et le contrôleur attend 5 minutes

Le contrôle mis en place ici est donc un contrôle tout ou rien, basé sur des règles de logiques. Ce choix est contraint par le fonctionnement du logiciel Gysmo. Cependant le système ne nécessite pas de contrôle plus sophistiqué. Il n'y a en effet qu'un seul paramètre à contrôlé (les ventilateurs des lits de roche), actionnables uniquement en ON/OFF. Dans ce contexte, la mise en place d'une stratégie plus complexe, comme un PID, un contrôle flou, prédictif ou par réseau de neurones, ne serait pas justifié, faute de degrés de liberté suffisants à exploiter.

Le contrôleur et la stratégie de contrôle ont ensuite été mis en place lors de deux terrains en octobre 2025 et mai 2026.

4.4.4 Campagne de terrain pour implantation du contrôleur

L'implémentation du système de contrôle a été réalisée en partenariat avec Guilhem Chevassus du L3e et Sam Chauvette du CISA. Elle a été mise en place lors de deux terrains.

Le premier terrain a été réalisé du 1^{er} au 14 octobre 2025. La précédente mission datant de l'automne 2023, le premier objectif était tout d'abord de faire un état des lieux de l'état actuel du lit de roche afin d'avoir un suivi. Ce terrain a aussi permis de retirer l'ensemble du système d'acquisition installé par Piché (2021) qui était devenu non fonctionnel ainsi que le contrôleur Harnois. Ces deux installations ont ensuite été remplacées par le contrôleur présenté en section 4.4.2. Pour cela, les deux cartes météo ont été placées dans la serre, dans deux boîtiers étanches. Ces boîtiers sont fixés en hauteur de chaque côté de la serre proche des faces Nord-Est et Sud-Ouest, afin que les cartes soient proches des ventilateurs pour pouvoir les contrôler. Leur alimentation a été réalisée via un boîtier contenant une alimentation 12V, installé sur le panneau de contrôle de la serre. Ensuite, l'ensemble des capteurs de températures ont été placés dans la serre. Le lit de roche a aussi été ouvert afin de placer des sondes permettant de connaître le gradient de température dans celui-ci. En particulier, l'entrée et la sortie d'un lit de roche ont été instrumentées et une sonde est placée au centre de la serre. Pour terminer ce premier terrain, les alimentations des ventilateurs du lit de roches ont été reliées aux cartes météo qui permettent leur fonctionnement en tout ou rien.

Le deuxième terrain, réalisé entre le 5 et le 12 mai a permis de finaliser l'installation. Pendant cette mission le Raspberry et le routeur, qui ont été configurés en amont, ont été installés dans la serre. Le Raspberry a ensuite été connecté au réseau internet de la serre, afin de pouvoir envoyer et recevoir des données à distance. Puis, les cartes y ont été connectées. Une vérification est réalisée afin de s'assurer que les données des capteurs sont disponibles sur Gysmo et que les ventilateurs sont contrôlables. Une fois cette vérification faite, la stratégie de contrôle a été importée sur le logiciel Gysmo. À la fin de ce second terrain, l'ensemble des données des sondes installées dans la serre est accessible et il est possible d'observer l'état des ventilateurs des lits de roche et de modifier leur stratégie de contrôle depuis Montréal.

La Figure 4.15 présente la position d'une des cartes météo et de son boîtier d'alimentation. Le Raspberry et le routeur WIFI ont été placés dans un boîtier situé dans une cabane juxtaposée à la serre.

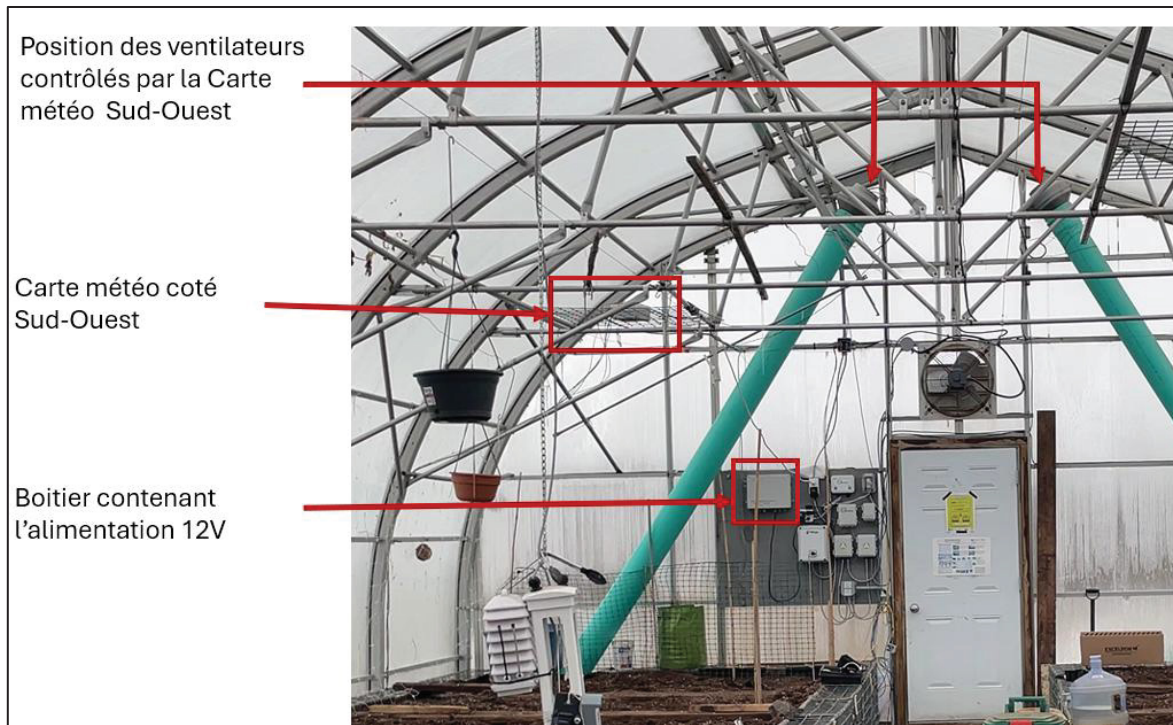


Figure 4.15 Position d'une carte météo, de son alimentation et des ventilateurs contrôlés dans la serre de Kuujuaq

Ces terrains ont aussi permis de renforcer les liens entre le comité des serres et le L3e, afin de favoriser les échanges et la poursuite du projet.

Le travail réalisé s'est arrêté à la mise en place du contrôleur et de sa stratégie. Quelques étapes restent encore à réaliser pour finaliser l'étude. Ces étapes sont détaillées par la suite.

4.5 Discussion et perspectives

L'objectif de ce chapitre était de proposer et de mettre en place une stratégie de contrôle permettant d'améliorer les performances énergétiques du système de stockage thermique de la serre de Kuujuaq.

Dans un premier temps, une description complète de la serre, des paramètres contrôlés (la température) et de ses équipements a été réalisée, avec un focus particulier sur le fonctionnement du système de stockage à lit de roche.

La stratégie de contrôle en place est un contrôle ON/OFF à hystérésis piloté par le contrôleur Harnois régulant le toit ouvrant et les ventilateurs des lits de roche. Cette description a servi de base à l'analyse des problématiques de contrôle, menée à partir des résultats de l'étude énergétique de Piché (2021). Deux limites majeures ont ainsi été identifiées : d'une part, l'interaction entre l'ouverture du toit ouvrant et le fonctionnement du lit de roche provoque des pertes thermiques et des phases de décharge non voulues. D'autre part, l'utilisation seulement de la température de la serre comme critère de pilotage est insuffisante pour garantir un fonctionnement efficace du stockage, comme en témoignent les COP inférieurs à 0,8 (voire nuls) et le coefficient de stockage d'environ 5 % observés entre le 26 juillet et le 15 août 2019, contre respectivement 3,0 et 13,8 % en moyenne en fin de saison.

À partir de ce diagnostic, le cahier des charges d'une nouvelle stratégie de contrôle a été conçu, intégrant à la fois la température de la serre et l'état réel du lit de roche (charge/décharge) pour prendre des décisions. Cette stratégie a été formalisée sous forme de règles de logique.

Sur le plan matériel, un nouveau contrôleur maison, basé sur des cartes d'acquisition appelées « cartes météo », un Raspberry Pi et le logiciel Gysmo, a été conçu en partenariat avec l'université de Pau. Ce contrôleur a été choisi pour sa flexibilité et son accès total aux données, permettant de développer, tester et ajuster une stratégie de contrôle à distance, ce que ne permettait pas le contrôleur industriel existant.

Enfin, une version de la stratégie de contrôle adaptée aux contraintes réelles du terrain, c'est-à-dire au fait que le contrôleur maison ne puisse piloter que les ventilateurs du lit de roche, le toit ouvrant restant sous la responsabilité d'un contrôleur industriel, a été réalisée. Cette stratégie est aussi un contrôle ON/OFF à hystérésis qui a été traduite en cinq règles de logique opérationnelles puis importée dans le logiciel Gysmo.

Le type de contrôle retenu, soit un contrôle tout ou rien à hystérésis, est contraint par le contrôleur et le logiciel Gysmo. Il n'y a cependant pas d'utilité ici à changer de type de contrôle. En effet, un seul équipement est régulé et celui-ci n'a que deux modes possibles : allumé ou éteint. Un PID est conçu pour réguler un équipement dont la commande est modulable en fonction des variables contrôlées, tandis que les contrôles avancés sont conçus pour des problématiques de contrôle à entrées et sorties multiples et interdépendantes, ce qui

n'est pas le cas ici. Utiliser un tel contrôle apporterait donc une complexité inutile, le choix d'un contrôle ON/OFF à hystérésis demeure ainsi le mieux adapté à la nature du problème.

Ce contrôleur et cette stratégie de contrôle ont ensuite été implémentés lors de deux terrains réalisés en octobre 2025 et mai 2026. Ce chapitre aboutit donc à un système fonctionnel, prêt à opérer en conditions réelles. La prochaine étape sera de réaliser une étude énergétique à la fin de la saison de culture, dont les résultats permettront de valider ou d'ajuster les choix de conception effectués. Une nouvelle étude de performance devra donc être menée une fois la saison terminée. Elle permettra d'observer le fonctionnement et la robustesse des cartes en milieu nordique, ainsi que d'évaluer les améliorations obtenues sur le contrôle, c'est-à-dire si certaines problématiques ont été résolues. Cette nouvelle étude devrait ensuite amener à la proposition d'améliorations pour le contrôle, en ajoutant des règles de contrôle ou en adaptant celles existantes.

D'autres améliorations sur le système pourront être apportées par la suite.

Premièrement, sur le plan de l'instrumentation, il serait peut-être intéressant d'utiliser les détecteurs de tension des cartes pour connaître l'état du toit ouvrant. Il serait aussi pertinent d'ajouter des mesures de température à l'extérieur et dans le sol, en ajoutant une nouvelle carte météo. Deux pyranomètres pourraient aussi être installés, à l'intérieur et à l'extérieur de la serre, afin de connaître le rayonnement solaire disponible et celui effectivement transmis à l'intérieur de l'espace, une donnée pouvant être utile pour anticiper les besoins de charge ou de décharge du système de stockage thermique. Ces données supplémentaires serviraient à enrichir les données disponibles et donc la connaissance du climat dans la serre ainsi que sur les variables perturbatrices.

Ensuite, d'autres améliorations pourraient être apportées à la stratégie de contrôle, en ajoutant des contraintes pour limiter le temps de fonctionnement des ventilateurs lorsque des utilisateurs sont présents dans la serre. Par exemple, les ventilateurs pourraient être désactivés pendant les

périodes d'affluence, comme entre 17h et 19h. Une autre possibilité serait d'ajouter un bouton dans la serre, qui stoppe les ventilateurs à la demande pendant une heure lorsqu'il est actionné.

Ce chapitre s'est concentré sur l'amélioration du contrôle d'un équipement spécifique, le lit de roche. Le chapitre suivant et s'intéresse à la mise en place d'un contrôle global à l'ensemble d'un espace de culture, à travers le cas d'une ferme conteneur installée à l'ÉTS.

CHAPITRE 5

MISE EN PLACE D'UN CONTRÔLE : FERME CONTENEUR À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE

Une ferme conteneur (FC) est en phase de conception avancée à l'École de Technologie Supérieure. Elle doit servir de laboratoire pour recueillir des données sur les performances énergétiques d'un tel espace. L'objectif est aussi de pouvoir tester des technologies innovantes telles que par exemple des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie et des panneaux rafraîchissants radiatifs. Elle doit de plus permettre de tester différentes stratégies de contrôle de son climat, afin d'étudier leur impact sur la consommation énergétique de cet espace.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en place le contrôle du système CVCA (Chauffage, Ventilation et Conditionnement d'air) de la FC. Il doit permettre de réguler la température et l'humidité de l'espace. Pour cela, après avoir décrit l'espace, ses paramètres contrôlés et ses principaux équipements, une première stratégie de contrôle, proposée par Alte, l'entreprise ayant réalisé le dimensionnement du système CVCA, sera présentée et analysée. Cette stratégie sera ensuite complétée afin d'aboutir à un contrôle fonctionnel. Pour réaliser ce contrôle, un système d'acquisition doit être mis en place, afin de réaliser les mesures nécessaires au contrôle et d'envoyer les consignes aux équipements. La partie suivante présentera donc la mise en place du système d'acquisition et de contrôle, ainsi que la création de l'interface de supervision. Enfin, la dernière partie se focalisera sur l'étude des probables stratégies de contrôle permettant d'améliorer les performances du système, dans l'objectif de réduire la consommation tout en améliorant ou maintenant des conditions satisfaisantes pour les plantes.

5.1 Description de la ferme container

La base de la FC est un conteneur de transport frigorifique de 40 pieds par 9 pieds soit environ 12,2 mètres par 2,7 mètres, situé à l'École de Technologie Supérieure. Ce conteneur est présenté Figure 5.5.1.



Figure 5.5.1 Ferme conteneur de l'ÉTS

L'objectif de cette ferme est de faire pousser à l'année un maximum de végétaux et pour cela un contrôle le plus complet des paramètres de cultures est nécessaire. Ainsi, l'ensemble des variables de contrôle identifiées dans la revue de littérature est pris en compte : la température, l'humidité de l'air, le rayonnement, la concentration en CO_2 , l'irrigation ainsi que l'apport en nutriments. Pour réguler ces différents paramètres, la ferme contrôlée (FC) est équipée d'un ensemble de systèmes techniques permettant d'agir sur l'environnement de culture. Ces équipements peuvent fonctionner de manière indépendante ou coordonnée afin de mettre en œuvre différentes stratégies de contrôle, d'optimiser les performances agronomiques et énergétiques de l'installation, et de constituer une plateforme expérimentale pour l'évaluation de nouvelles approches de régulation. Les principaux équipements mis en œuvre sont présentés dans les sections suivantes.

- Tables inondantes et NFT

La Figure 5.2 présente un schéma de la salle de culture de la FC avec les NFT en haut (à l'Ouest) et les tables inondantes en bas (à l'Est).

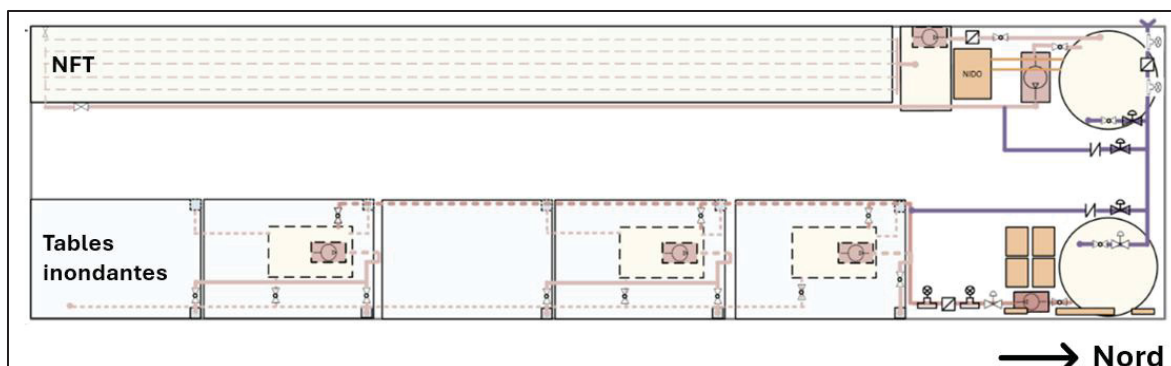


Figure 5.2 Plan de la salle de culture de la FC
Tiré de Dos Santos (2026)

Le côté ouest de la FC est constitué de NFT, semblables à ceux présentés Figure 5.3.



Figure 5.3 NFT installés dans une serre
Tiré de Lufa Farms (2011)

En tout, trois étages de 6 gouttières de 7 mètres de long vont être installés. Une solution nutritive régulée automatiquement en nutriments sera réalisée dans un réservoir et circulée dans les gouttières.

Sur le côté Est sont installées des tables inondantes, présentées Figure 5.5.4.



Figure 5.5.4 Tables inondantes

Tiré de Sananbio Radix brochure

Elles sont constituées d'étagères de hauteurs variées, afin de faire pousser différentes plantes. En tout deux étagères de 3 étages et trois étagères de 4 étages sont installées. Les étagères mesurent 1,346 m de longueur et 0,942 m de largeur. Comme pour les NFT, la solution nutritive est réalisée automatiquement dans un réservoir puis circulée dans les étages des différentes tables, à l'aide de micro-pompes. Chaque étage peut contenir 15 ou 30 litres de solution selon la hauteur d'eau souhaitée.

Afin d'homogénéifier l'air et de créer un microclimat actif, un ventilateur général sera installé dans l'espace de culture et des ventilateurs plus petits seront placés sur les différents étages des bancs hydroponiques et NFT.

- LED

N'ayant aucun apport de lumière naturelle dans l'espace, la FC est équipée de LED, afin de garantir un DLI satisfaisant pour les plantes. Chaque étage de NFT est équipé de trois rangées de LED pour un total de 2 655 W, soit 885 W par étage. Il est possible de moduler leur spectre d'émission ainsi que leur intensité lumineuse.

Les tables inondantes sont aussi équipées de LED à chaque étage. Les étagères de 3 étages ont 48 LED pour une puissance totale de 324 W. Les deux premières étagères de 4 étages ont 64 LED pour une puissance de 432 W et la dernière étagère de 4 étages possède 32 LED pour une

puissance de 384 W. Les LED des tables inondantes sont seulement contrôlables en tout ou rien.

- Injecteur de CO₂

La FC sera équipée d'un injecteur de CO₂ stocké sous forme liquide dans une bombonne. Son contrôle sera réalisé à l'aide d'une valve dont l'ouverture est réglable.

- Système CVCA

Le système CVCA permet de réguler la température et l'humidité dans la FC. Le schéma du système est présenté Figure 5.5. Il est composé de deux thermopompes (air-eau et eau-eau), de deux réservoirs (« chaud » et « froid ») et d'une unité de traitement de l'air (UTA) constitué des batteries chaude et froide alimentés par les réservoirs. Son fonctionnement et les équipements annexes seront décrits ultérieurement.

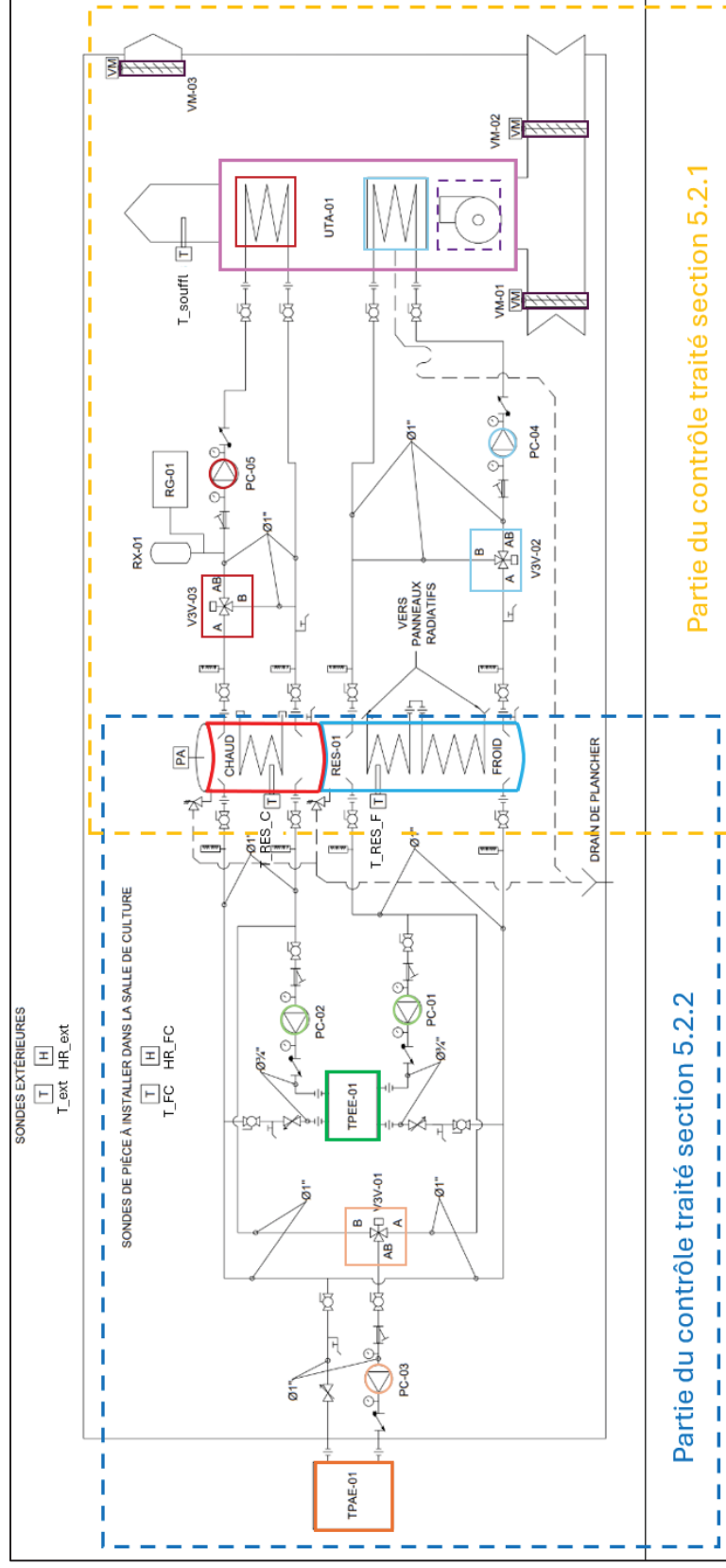


Figure 5.5 Schéma du système CVCA

Pour faciliter la description du système et de son contrôle, des acronymes vont être utilisés. Ceux-ci sont résumés dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 Liste des acronymes utilisés pour le contrôle du système
CVCA

Équipements	
Acronyme	Nom de l'équipement
TPAE-01	Thermopompe air-eau
TPEE-01	Thermopompe eau-eau
UTA-01	Unité de traitement d'air
V3V	Valve trois voies
PC	Pompe
VM	Volet motorisé
Température	
Acronyme	Mesure
T_FC	Température FC
T_souffl	Température de soufflage
T_RES_F	Température du réservoir froid
T_RES_C	Température du réservoir chaud
T_ext	Température extérieure
Acronyme	Paramètre
TC_F	Point de consigne du réservoir froid
T_RES_F_min	Température minimale du réservoir froid
T_RES_C_max	Température maximale du réservoir chaud
TC_C	Point de consigne du réservoir chaud
T_RES_F_limite	Température minimale de sécurité réservoir froid
T_RES_C_limite	Température maximale de sécurité réservoir chaud
T_souffl_cons	Température de soufflage consigne
T_chauff	Température de chauffage
T_ref	Température de refroidissement
T_ext_lim	Température extérieure limite pour le freecooling

Humidité	
Acronyme	Mesure
HR_FC	Humidité relative de la FC
HR_souffl	Humidité relative de soufflage
Acronyme	Paramètre
HR_max	Humidité relative maximale
HR_min	Humidité relative minimale
Temps	
Acronyme	Paramètre
t1	Temps d'attente entre deux mesures
t2	Temps d'attente entre deux mesures
PID	
Acronyme	Paramètre
PID_ref	PID de la boucle de régulation du refroidissement
PID_chauff	PID de la boucle de régulation du chauffage
PID_V3V	PID de régulation de la valve 3 voies
Puissances	
Acronyme	Paramètre
P_UTA	Puissance du ventilateur de l'UTA

L'objectif du système CVCA est de réguler la température et l'humidité de la FC, grâce à l'unité de traitement d'air (UTA en rose). Elle regroupe les composants permettant de conditionner l'air avant de le distribuer dans l'espace de culture, notamment son refroidissement, sa déshumidification et son réchauffage. Pour cela, un mélange d'air issu de l'espace de culture, appelé air repris (passant par le VM-01) et d'air extérieur (passant par le VM-02) est circulé dans l'UTA (en rose) grâce à un ventilateur (en pointillés violet). En tout temps, le registre VM-02 est réglé à son ouverture minimale afin de privilégier le recyclage de l'air traité. Le taux d'air neuf est ainsi limité au strict nécessaire pour assurer le renouvellement minimal de l'air (obligatoire, notamment pour garantir une qualité d'air suffisante pour les occupants), tout

en minimisant les perturbations des conditions climatiques internes et les besoins énergétiques associés à leur régulation.

Cet air passe ensuite par un premier serpentin froid (batterie froide, en bleu dans l'UTA), ce qui permet de le refroidir et de le déshumidifier en faisant passer sa température sous son point de rosée. L'eau liquide extraite lors de la déshumidification est évacuée à l'aide d'un drain. L'air passe ensuite au niveau d'un deuxième serpentin (batterie chaude, en rouge dans l'UTA), qui sert à le réchauffer, si besoin, jusqu'à la température souhaitée en sortie d'UTA.

Les conditions de soufflage de l'air constituent les principales variables d'action du système CVCA. Elles sont définies par la température et l'humidité de l'air en sortie de l'UTA et doivent être choisies de manière à couvrir les charges thermiques et hydriques de la ferme contrôlée (FC), afin de maintenir les conditions climatiques à leur valeur de consigne. La température de sortie de l'UTA, appelée température de soufflage (T_{souffl}), doit être inférieure à la température de consigne de la FC pour assurer son refroidissement et supérieure à cette consigne pour assurer son chauffage. De même, l'humidité de sortie, appelée humidité de soufflage (HR_{souffl}), doit, en humidité absolue, être inférieure à celle de la FC afin de permettre sa déshumidification. Un exemple de refroidissement et de déshumidification est présenté sur le diagramme d'air humide de la Figure 5.6.



Adapté de ASHRAE (1992)

La puissance mise en jeu est proportionnelle au débit d'air sec ($\dot{m}_{as}$) et à la variation d'enthalpie entre les états (Δh), lisibles sur le diagramme de l'air humide. La batterie froide doit donc extraire la puissance $\dot{m}_{as}\Delta h_{1\rightarrow3}$ et la batterie froide apporter $\dot{m}_{as}\Delta h_{3\rightarrow4}$. D'un point de vue système, la puissance totale nécessaire est donc $\dot{m}_{as}(|\Delta h_{1\rightarrow3}| + |\Delta h_{3\rightarrow4}|)$. Cette puissance augmente avec la diminution de la température de la batterie froide. Le choix de cette température doit donc résulter d'un compromis entre efficacité de la déshumidification et efficacité énergétique.

Les batteries sont alimentées en eau à partir de leurs réservoirs respectifs : le réservoir chaud (consigne +45°C) alimente la batterie chaude, la batterie froide étant alimentée par le réservoir froid (consigne +7°C). La régulation des températures de ces deux serpentins se fait à l'aide des V3V-02 et V3V-03, ainsi que des PC-04 et PC-05. Lorsque l'air dans l'UTA doit être refroidi, la PC-04 est activée et l'ouverture de la V3V-02 est régulée, ce qui ajuste la température du serpentin froid et permet de contrôler la température de soufflage. De même, lorsque l'air dans l'UTA doit être réchauffé, la PC-05 est activée et l'ouverture de la V3V-03 est régulée pour amener la température de soufflage à la valeur souhaitée. Le débit d'air circulant dans l'UTA est réglé par le ventilateur (en pointillés violet), qui dispose de trois vitesses de fonctionnement (L, M et H). Le principe de fonctionnement détaillé du contrôle sera traité dans la section 5.2.1.

Les températures des réservoirs chaud et froid sont maintenues à l'aide de deux thermopompes. La première est la thermopompe eau-eau NORDIC W-15-HAC-P-1-L-CP (TPEE-01 en vert sur le schéma). Elle est à débit fixe, ce qui fait que seuls son démarrage et son arrêt sont contrôlables. Sa source chaude est reliée au réservoir chaud et sa source froide au réservoir froid, pour pouvoir obtenir de l'eau à 45°C dans le réservoir chaud et à 7°C dans le réservoir froid en simultané pendant son fonctionnement. Elle a une puissance thermique de 3,443 kW et un COP de 3,18 pour une température d'eau à la sortie de son échangeur froid de 4,3 °C, et de 49 °C à la sortie de son échangeur chaud. La deuxième est une thermopompe air-eau (TPAE-01 en orange sur le schéma). C'est le modèle HSS030V3LM de la marque Hydro Solar. Contrairement à la TPEE-01, elle est à débit de réfrigérant variable, modulé en faisant varier la vitesse du compresseur. Elle est aussi réversible, en inversant son cycle thermodynamique

grâce à un robinet à 4 voies. Il est ainsi possible de contrôler sa température de fonctionnement et de choisir si elle produit de l'eau chaude ou froide, qui sera stockée dans le réservoir chaud ou froid respectivement. La V3V-01 permet de relier la TPAE-01 au bon réservoir, en fonction de son mode de fonctionnement. Pour une température extérieure d'air sec de 26 °C et une température d'alimentation d'eau vers le réservoir froid de 7 °C, sa puissance thermique de refroidissement est de 12,64 kW et son COP est de 4,35. L'objectif de l'espace étant de réduire au maximum la consommation d'énergie, la TPEE-01 est utilisée en priorité, afin de pouvoir valoriser à la fois la chaleur et le froid.

La TPAE-01 intervient lorsque l'un des deux réservoirs atteint sa température limite (température maximale pour le réservoir chaud ou température minimale pour le réservoir froid). Dans cette situation, la TPEE-01 ne peut plus être utilisée, car elle produirait simultanément du chaud et du froid. La TPAE-02 prend alors le relais afin de réguler uniquement la température du réservoir qui le nécessite encore. Par exemple, si le réservoir froid doit continuer à être refroidi alors que le réservoir chaud a déjà atteint sa température maximale, la TPAE-02 est mise en service afin de produire uniquement du froid. La description détaillée de cette séquence de contrôle est présentée à la section 5.5.2.

Les différents circuits d'eau en fonctionnement selon l'état des thermopompes sont précisés Figure 5.7. Le circuit rouge est le circuit chaud et le bleu est le circuit froid.

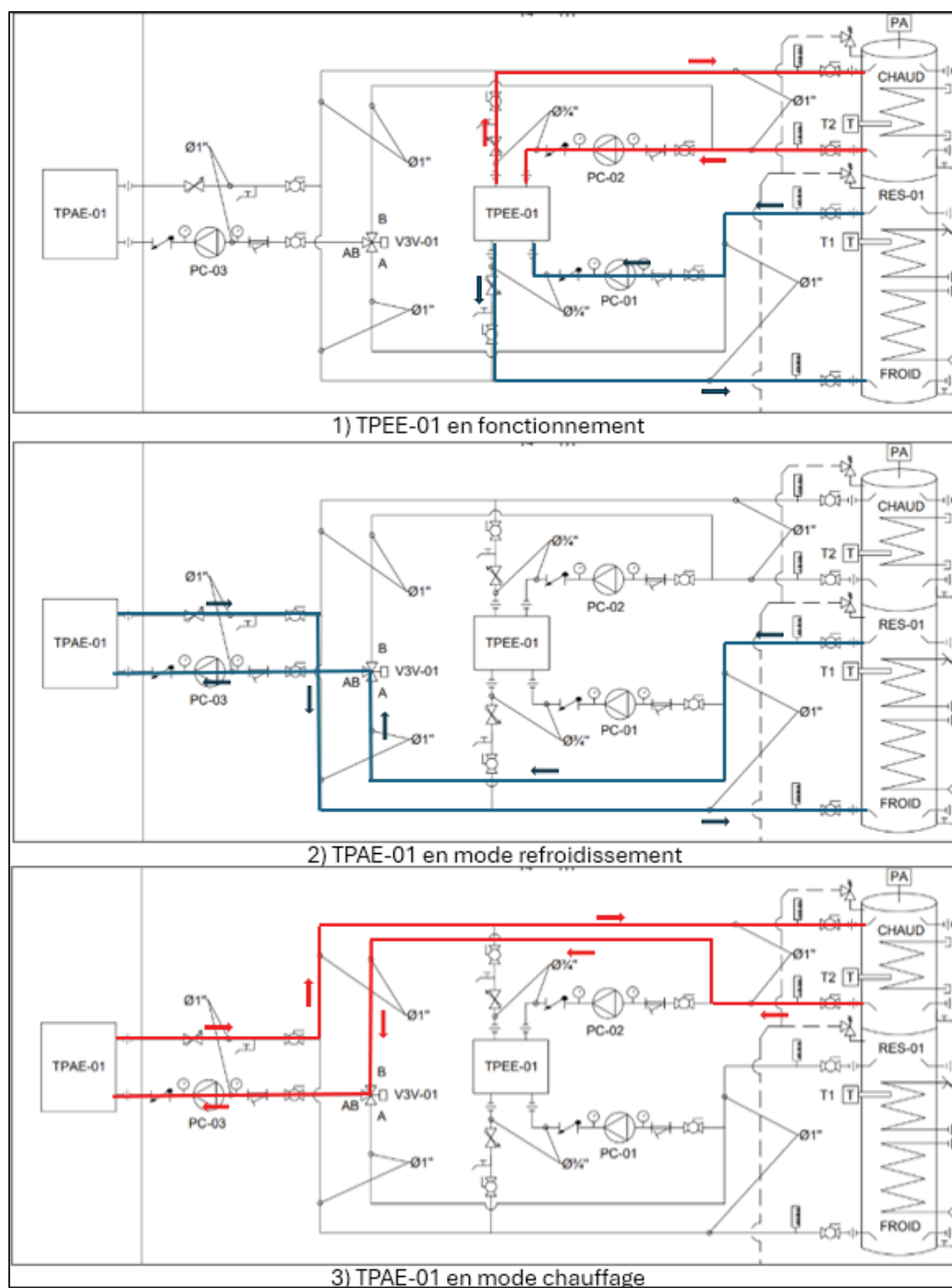


Figure 5.7 Circuits d'eau en fonction de la thermopompe en fonctionnement

Le Tableau 5.2 résume les principaux équipements présents ainsi que leurs puissances.

Tableau 5.2 Puissances des principaux équipements

	Équipement	Puissance	
		Électrique [W]	Thermique [W]
CVCA	TPAE-01	2 910	12 640
	TPEE-01	1 083	3 443
	Pompes de circulation (x5)	500 (en tout)	/
NFT	Pompe de circulation	747,5	/
	Pompe de retour	588	/
	LED	2855	/
	Ventilateurs	80	/
Tables inondantes	Micro-pompes (total)	210	/
	LED	1 896	/
	Ventilateurs	56	/
Ventilateur général	Ventilateur	120	
Injecteur CO₂		Pas défini	/

La prochaine étape consiste à mettre en place le contrôle de ces équipements. La suite de ce chapitre porte sur la mise en place de la régulation du système CVCA, en commençant par l'élaboration de sa stratégie de contrôle.

5.2 Stratégie de contrôle du système CVCA

La partie suivante présente une version du contrôle proposé par Alte, l'entreprise ayant dimensionné le système CVCA. Cette version n'est cependant qu'une version préliminaire, conçue pour comprendre la logique générale de fonctionnement, elle n'est donc pas complète. Ainsi, ce contrôle est analysé dans un second temps, puis amélioré afin d'arriver à une version finale permettant de réguler la température et l'humidité de la FC.

Le contrôle proposé par Alte est découpé en deux parties :

- 1- Le contrôle de la température et de l'humidité de la FC à l'aide des serpentins chauds et froids de l'UTA, de la puissance du ventilateur de l'UTA et des volets motorisés.
- 2- Le contrôle des températures des réservoirs chaud et froid à l'aide des TPEE et TPAE.

Ce découplage du contrôle est possible grâce à la présence des ballons d'eau chaude et d'eau froide permettant de faire du stockage thermique. Les paragraphes suivants décrivent le contrôle tel qu'il est proposé.

5.2.1 Unité de traitement d'air (UTA)

La première partie concerne le contrôle de la température et de la déshumidification de la FC. Il est basé sur des contrôleurs PID et tout ou rien.

La Figure 5.8 présente son principe général. Les différentes boucles de régulations sont expliquées par la suite.

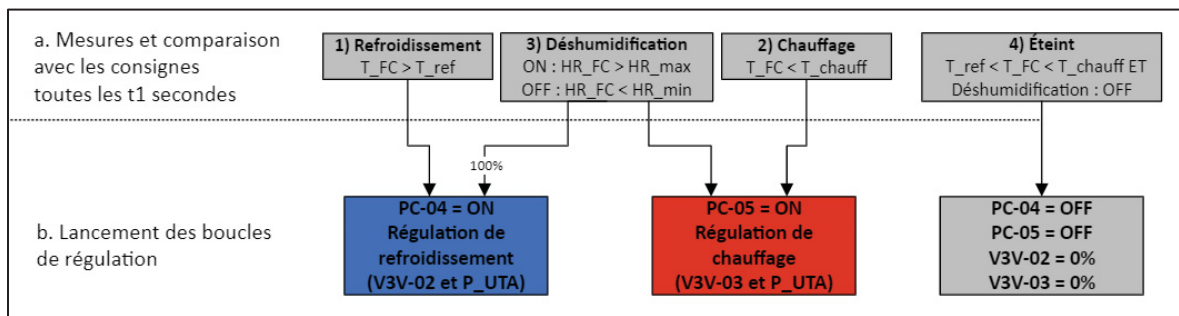


Figure 5.8 Schéma de principe du contrôle de l'humidité et de la température

Le contrôle de la température et de l'humidité est basé sur quatre modes différents : les modes de refroidissement, de chauffage, de déshumidification et finalement le mode éteint. En fonction des conditions de température et d'humidité, les boucles de régulation de chauffage et refroidissement se lancent. Le détail du fonctionnement de ces boucles est réalisé par la suite. Toutes les t_1 secondes, l'humidité relative de la FC (HR_{FC}) est comparée à l'humidité maximale acceptable (HR_{max}) et sa température (T_{FC}) est comparée aux températures consignes de chauffage (T_{chauff}) et de refroidissement (T_{ref}). Si T_{FC} est supérieure à sa température de refroidissement (cas 1, Refroidissement), la régulation froide se lance en modulant la V3V-02 et P_UTA. Si T_{FC} est inférieure à T_{chauff} (mode 2, Chauffage), la boucle de régulation de chauffage est lancée et la V3V-03 et P_UTA sont régulées. Si l'humidité de la serre est au-dessus de l'humidité maximale (mode 3, Déshumidification), la régulation de refroidissement est lancée à 100% (la V3V-02 est totalement ouverte) et la régulation de chauffage est effectuée pour souffler l'air à la température souhaitée en fonction de la température de la FC. Alte propose l'ouverture totale de la V3V-02, permettant de faire descendre la température du serpentin froid à sa valeur minimale et donc de baisser la température de l'air circulant dans l'UTA sous sa température de rosée. Cette approche

simplifie le contrôle et garantit la déshumidification peu importe les caractéristiques de l'air d'entrée mais entraîne une consommation énergétique plus importante car le serpentin chaud doit compenser le refroidissement excessif, comme expliqué précédemment. Une optimisation de ce contrôle est discutée dans la section suivante.

La régulation de l'humidité se stoppe si l'humidité relative passe sous sa valeur minimale (HR_min). Le contrôle de l'humidité est donc un contrôle tout ou rien à hystérésis. Enfin, si aucun des cas n'est valide, les deux boucles de régulations sont stoppées (mode 4, Éteint).

Les points de consigne et de température et d'humidité proposés par Alte sont résumés dans le Tableau 5.3 et discutés ensuite.

Tableau 5.3 Points de consigne de température et d'humidité de la FC définis par Alte

Paramètre	Valeur définie
T_chauff	22°C
T_ref	24°C
HR_max	65%
HR_min	50%

D'après la revue de littérature (Tableau 1.2), la température idéale pour des légumes tels que les concombres ou les tomates sont compris entre 18 et 27°C. Les points de consigne proposés par Alte sont donc cohérents. Cependant, l'humidité relative idéale pour ces légumes est en général comprise entre 60 et 70, voire 90%. Les points de consignes proposés semblent alors bas. De plus, la température et l'humidité idéales dépendent du type de plante produite. Il serait alors intéressant de permettre à l'opérateur de choisir ses points de consignes. Cet aspect sera traité lors de la mise en place du contrôleur (section 5.3.2).

La section suivante présente le fonctionnement détaillé des boucles de régulation de chauffage et de refroidissement.

Quel que soit le mode de fonctionnement, la régulation de la température est réalisée au moyen d'une architecture PID en cascade. La boucle externe détermine le besoin thermique de la FC

à partir de l'écart entre la température mesurée et la consigne, tandis que la boucle interne agit sur les actionneurs afin d'atteindre la température de soufflage demandée.

La boucle externe détermine le niveau de puissance thermique à fournir à la FC, tandis que la boucle interne veille à atteindre la température de soufflage correspondante en pilotant la vanne trois voies. Cette organisation permet d'obtenir une réponse plus rapide aux perturbations tout en assurant une régulation stable de la température intérieure.

En mode refroidissement, la structure est présentée Figure 5.9.

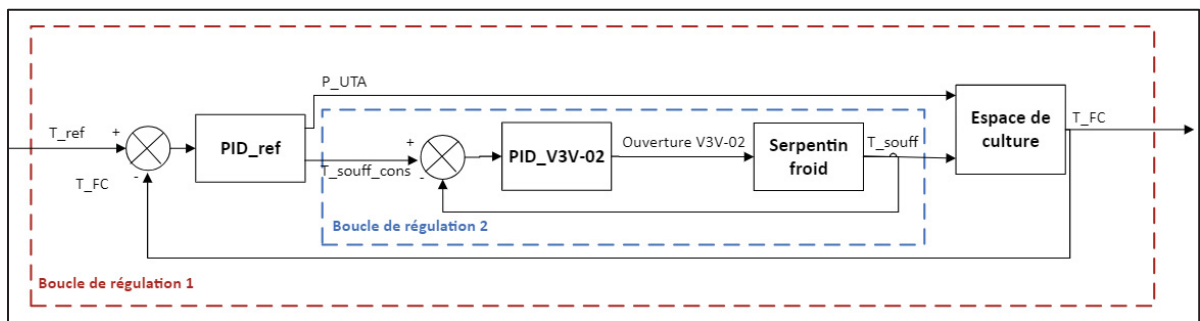


Figure 5.9 Fonctionnement de la régulation de refroidissement

La boucle externe calcule l'erreur entre la température mesurée de la FC (T_{FC}) et sa température de consigne (T_{ref}). Cette différence forme l'entrée d'un PID de refroidissement (PID_{ref}), dont la sortie est traduite en une consigne de puissance de ventilation et une température de soufflage consigne, définies selon le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 Température de soufflage consigne et puissance de l'UTA en fonction du PID de refroidissement

Valeur du PID	Point de soufflage	Puissance de l'UTA
$0\% < PID < 33\%$	12°C	Basse (L)
$33\% \leq PID < 66\%$	12°C	Moyenne (M)
$66\% \leq PID$	7°C	Haute (H)

La boucle externe calcule l'erreur entre la température mesurée de la FC. Pour cela, un deuxième PID (PID_{V3V-02}) compare la température de soufflage mesurée à la consigne, et sa sortie pilote l'ouverture de la V3V-02, ce qui modifie la température d'alimentation du serpentin froid.

Le fonctionnement de la boucle de chauffage est similaire. Elle est présentée Figure 5.10.

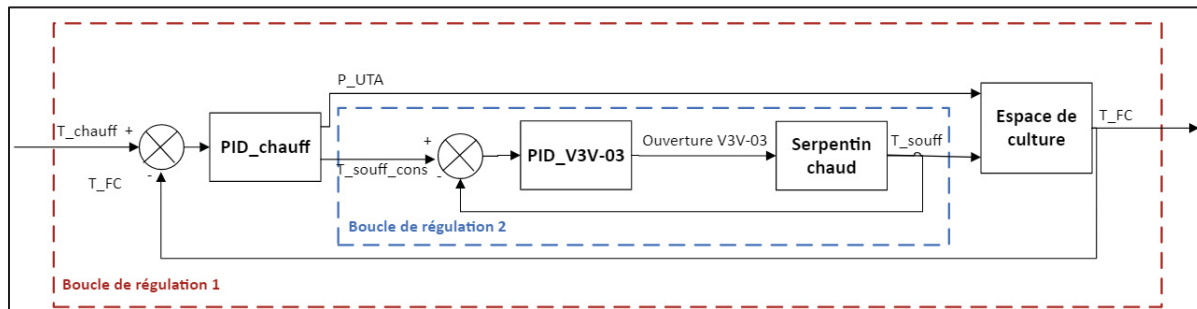


Figure 5.10 Fonctionnement de la régulation de chauffage

Un premier PID (PID_chauff) calcule un besoin de chauffage en fonction de l'erreur entre T_{FC} et T_{chauff} . La sortie de ce PID fixe la puissance de l'UTA et la température de soufflage, selon le Tableau 5.5.

Tableau 5.5 Température de soufflage consigne et puissance de l'UTA en fonction du PID de chauffage

Valeur du PID	Point de soufflage	Puissance de l'UTA
$-33\% < \text{PID} < 0\%$	35°C	Basse (L)
$-66\% \leq \text{PID} < -33\%$	40°C	Moyenne (M)
$-100\% \leq \text{PID}$	45°C	Haute (H)

Un deuxième PID (PID_V3V-03) régule ensuite l'ouverture de la V3V-03, donc la température du serpentin chaud, à partir de l'écart entre la température de soufflage mesurée et sa consigne.

Lors d'une phase de déshumidification, l'air est d'abord refroidi au niveau du serpentin froid afin de condenser une partie de la vapeur d'eau qu'il contient. Il est ensuite systématiquement réchauffé avant son insufflation dans la FC, même en l'absence de besoin de chauffage, afin de ne pas modifier la température intérieure.

Pour terminer, le contrôle proposé par Alte ne traite pas de la régulation des VM, bien que ceux-ci soient nécessaires pour le fonctionnement du système CVCA, notamment pour assurer le renouvellement d'air, voir faire du refroidissement passif (freecooling). Leur contrôle est discuté dans la section 5.3.1.

5.2.2 Réservoirs de stockage thermique

L'objectif de la deuxième partie du contrôle est de réguler les températures des réservoirs chaud et froid en utilisant les TPEE-01 et TPAE-01. Le contrôle proposé par Alte est basé sur une régulation tout ou rien à hystérésis.

La première étape est de définir deux saisons : la saison de refroidissement où le besoin de refroidir l'espace de culture est prédominant, et une saison de chauffage où le besoin de le réchauffer est plus important. Les changements de saison sont basés sur la température extérieure (T_{ext}). Le passage de la saison de chauffage à la saison de refroidissement se fait lorsque T_{ext} est supérieure à 10°C pendant 4 heures ou supérieure à 15°C pendant 1 heure. Inversement, le passage de la saison de refroidissement à la saison de chauffage se fait lorsque T_{ext} est inférieure à -5°C pendant 4 heures ou inférieure à -10°C pendant 1 heure. Dans chaque saison, une boucle de régulation est ensuite réalisée pour contrôler T_{RES_F} et T_{RES_C} à l'aide des TPEE-01 et des TPAE-01. La régulation en saison de refroidissement est présentée Figure 5.11.

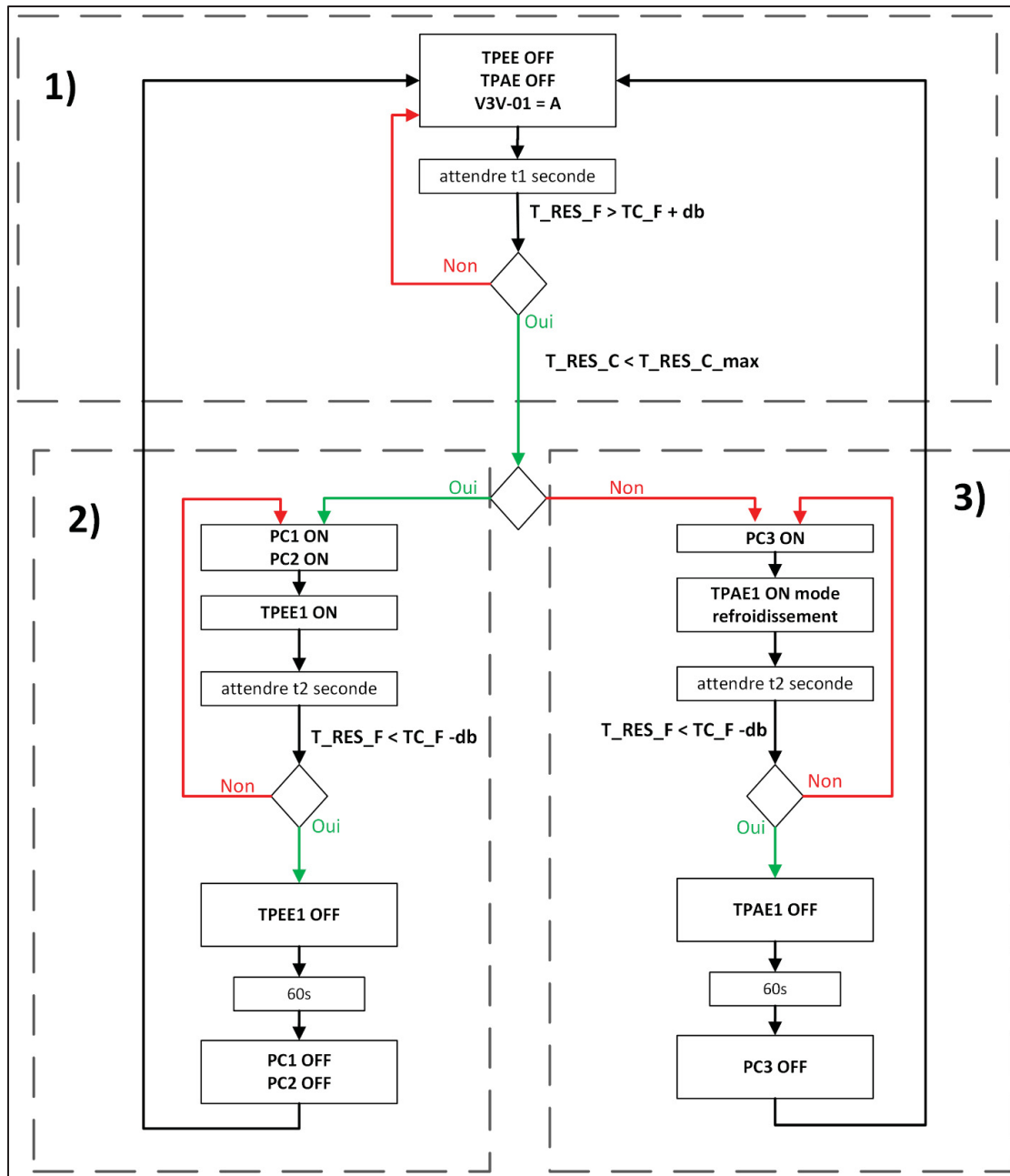


Figure 5.11 Schéma du contrôle de la température des réservoirs en saison de refroidissement

Au début de la régulation (zone 1), les deux thermopompes sont éteintes. La V3V-01 est ouverte sur le port A, ce qui la relie le circuit d'eau de la TPAE-01 au réservoir froid. Comme le besoin en froid est plus important pendant cette saison, le réservoir froid se réchauffe plus vite que le réservoir chaud ne se refroidit. La régulation est donc réalisée sur la mesure de T_RES_F . Toutes les $t1$ secondes, T_RES_F est comparée à sa température de consigne pour déterminer si le réservoir froid doit être refroidit. Si c'est le cas, T_RES_C est alors comparée à sa température maximale consigne ($T_RES_C_max$). Si elle est inférieure, il est possible de réchauffer T_RES_C et refroidir T_RES_F simultanément : la régulation passe en zone (2). Les PC-01 et PC-02 sont allumées puis la TPEE-01 est lancée. Elle récupère alors de l'énergie du réservoir froid pour l'amener vers le réservoir chaud. Si T_RES_C est supérieure ou égale à $T_RES_C_max$, le réservoir chaud ne peut pas être réchauffé plus. La TPAE-01 est alors utilisée pour refroidir le réservoir froid uniquement (zone 3). Dans les deux cas, la thermopompe se stoppe si la température du réservoir froid repasse sous sa valeur consigne.

Il est nécessaire d'allumer des pompes avant les thermopompes et de les arrêter 60 secondes après, pour s'assurer que l'eau glycolée circule dans les circuits quand les thermopompes sont en fonctionnement. Cela évite les surchauffes ou le gel si l'eau stagne au niveau des échangeurs et permet de dissiper l'énergie résiduelle au moment où les thermopompes se stoppent. Il faut également veiller à ne pas réaliser un cycle marche/arrêt trop rapide pour ne pas détériorer les thermopompes.

Ce contrôle comporte toutefois quelques lacunes. En zone (2), la seule condition d'arrêt de la TPEE-01 est basée sur une mesure de T_RES_F , alors que T_RES_C augmente aussi pendant ce temps et peut donc dépasser sa valeur maximale, ce qui peut être dangereux pour le système. Une condition d'arrêt supplémentaire, basée sur T_RES_C , doit donc être ajoutée. De même, lorsque la TPAE-01 est allumée, T_RES_C peut repasser sous sa valeur limite, alors qu'elle était au-dessus au démarrage de la TPAE-01. Il serait pertinent d'ajouter une condition d'arrêt supplémentaire sur cette thermopompe. Ces ajouts sont réalisés section 5.3.2.

La saison de chauffage suit un principe de contrôle symétrique à la saison de refroidissement, comme présenté Figure 5.12.

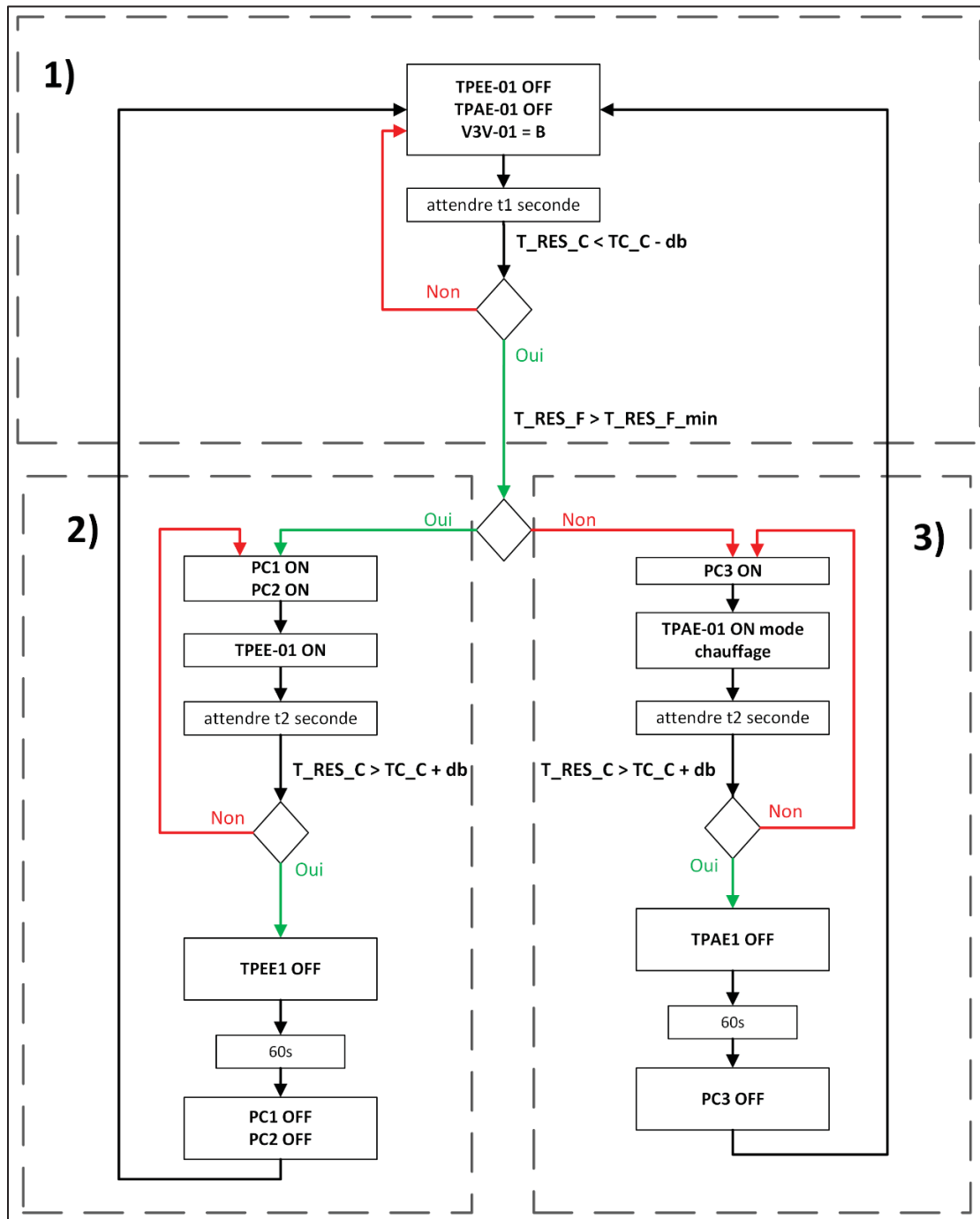


Figure 5.12 Schéma du contrôle de la température des réservoirs en saison de chauffage

La V3V-01 est ouverte sur le port B (reliant la TPAE-01 au réservoir chaud), et la régulation se fait sur T_RES_C plutôt que T_RES_F, le réservoir chaud se refroidissant plus vite que le réservoir froid ne se réchauffe pendant cette saison. La logique est similaire à celle du mode refroidissement : si T_RES_C doit être réchauffé et T_RES_F est suffisamment chaud (supérieure à T_RES_F_min), alors la TPEE-01 est lancée (zone 2). Si T_RES_F est trop froid, alors la TPAE est lancée (zone 3).

Pour les mêmes raisons que pour la saison de refroidissement, de nouvelles conditions d'arrêt supplémentaires basées sur T_RES_F doivent être ajoutées. En effet, cette température peut diminuer et passer sous sa valeur minimale consigne lorsque la TPEE-01 est allumée (zone 2) ou augmenter et passer au-dessus de sa valeur minimale consigne lorsque la TPAE-01 est allumée (zone 3).

Enfin, une protection sur les températures des réservoirs chaud et froid doit être ajoutée. Une température minimale de sécurité est définie pour le réservoir froid (-20°C). Cette température correspond à la température minimale de limite avant que de l'eau glycolée à 35% environ gèle (Corechem, s.d.). Lorsque le réservoir passe sous cette température la V3V-01 est ouverte sur le port A et la TPAE-01 est allumée en mode chauffage. L'objectif est de réchauffer le réservoir froid. Si la température du réservoir repasse au-dessus des -15°C dans les 60 secondes, la TPAE-01 s'éteint, sinon une alarme est déclenchée. De même, si le réservoir chaud passe au-dessus d'une température maximale de sécurité (80°C) pendant plus de 60 secondes, une alarme est déclenchée.

Le Tableau 5.6 récapitule les valeurs des points de consignes préconisés par Alte.

Tableau 5.6 Points de consigne des réservoirs préconisés par Alte

Variable	Valeur préconisée par Alte
TC_F	7°C
T_RES_F_min	0°C
T_RES_C_max	47°C
TC_C	45°C

Pour résumer, le contrôle du système CVCA proposé par Alte est découpé en deux parties : la régulation l'UTA et la régulation des réservoirs de stockage thermique à l'aide des TPEE-01 et TPAE-01. Toutefois, cette stratégie constitue davantage une ébauche qu'un algorithme de contrôle directement exploitable. Plusieurs lacunes, incohérences et cas de fonctionnement non spécifiés ont été identifiés au cours de son analyse. Ces points sont discutés dans la section suivante, qui propose les compléments et adaptations nécessaires afin d'aboutir à une stratégie de contrôle cohérente, complète et directement implémentable sur le système réel.

5.3 Étude du contrôle et piste d'amélioration

5.3.1 Analyse du contrôle

L'objectif de cette partie est d'analyser et de discuter la stratégie de contrôle présentée précédemment afin de s'assurer qu'elle soit implémentable dans la FC dès l'automne 2026.

- Contrôle de la température et de l'humidité de la FC

Afin d'aboutir à un contrôle complet de la température et de l'humidité de la FC, il reste à établir le pilotage des VM. La firme Alte, responsable du dimensionnement du système CVCA, n'ayant fourni aucune indication à ce sujet, une stratégie doit être élaborée. Deux approches sont possibles.

La première consiste à utiliser l'air extérieur pour refroidir l'espace de culture lorsque cela est possible (freecooling), en régulant l'ouverture du VM-02. Cette stratégie a l'avantage de diminuer la consommation énergétique en diminuant l'utilisation du serpentin froid. Elle pose cependant un problème pour la régulation du CO₂. En effet, l'espace de culture sera enrichi en CO₂. Or en favorisant les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur, cette concentration va tendre à s'équilibrer avec la concentration extérieure et donc diminuer.

Ainsi, la seconde stratégie consiste au contraire à minimiser le renouvellement d'air, en garantissant uniquement le renouvellement minimal obligatoire, afin de préserver la concentration en CO₂. Cependant cette solution fait renoncer aux économies d'énergie permises par le freecooling, puisque le refroidissement doit alors être assuré uniquement par le serpentin froid.

Actuellement, la perturbation sur le milieu interne engendrée par le freecooling, notamment sur le CO₂, est jugée peu acceptable. C'est donc la seconde stratégie qui est retenue, en utilisant l'UTA associée au stockage froid pour assurer le refroidissement plutôt que l'air extérieur. L'apport en air neuf est ainsi maintenu au minimum requis, afin de limiter au maximum son influence sur la concentration en CO₂.

Comme évoqué précédemment, une piste d'amélioration du contrôle a aussi été soulevée. En effet, lors de la déshumidification la V3V-02 est ouverte totalement, l'air est alors refroidi au maximum possible. Cette solution garantit que la température de l'air passant dans l'UTA passe sous le point de rosée mais demande à le réchauffer après. Cela entraîne une consommation d'énergie supplémentaire. Réguler l'ouverture de la V3V-02 de manière à diminuer la température de l'air tout juste suffisamment sous son point de rosée, sans le refroidir davantage que nécessaire, permettrait de réduire cette consommation.

Cela demande de connaître le point de rosée de l'air entrant dans l'UTA. Celui-ci peut être déduit des mesures de température et d'humidité relative disponibles dans l'espace de culture. La température du serpentin froid est alors régulée afin d'assurer le refroidissement nécessaire pour atteindre ce point de rosée. La mesure de l'humidité de soufflage en sortie de l'UTA sert de validation, en confirmant que l'air sortant de l'UTA est au niveau d'humidité désiré.

Dans un premier temps, afin de simplifier la mise en œuvre du système, la solution initiale (ouverture totale de la V3V-02) est gardée, malgré son coût énergétique plus élevé. Il sera cependant intéressant d'évaluer son impact énergétique puis d'étudier la mise en place d'une régulation plus précise de ce serpentin lors de la déshumidification.

La logique de contrôle de l'UTA de la FC est maintenant complète. Son principe est synthétisé. Les variables contrôlées sont la température et l'humidité. En tout temps, le volet VM-02 (entrée d'air extérieur) est ouvert à son point de consigne minimale pour garantir le renouvellement d'air obligatoire tout en limitant les échanges, afin de maintenir la concentration en CO₂. Le volet VM-03 (air rejeté vers l'extérieur) est ouvert au même pourcentage que le volet VM-02. Le volet VM-01 (air repris) est ouvert quasiment totalement afin que la majorité de l'air circulant dans l'UTA soit de l'air repris. La température et

l'humidité de l'espace de culture sont ensuite mesurés à intervalles réguliers. Si la température est au-dessus de la température de refroidissement, la régulation froide est lancée pour diminuer cette température. Si elle est en dessous de la température de chauffage, la régulation chaude est réalisée pour la faire augmenter. Enfin, si l'humidité est trop importante, le serpentin froid est refroidi au maximum et le serpentin chaud est régulé pour maintenir la température de soufflage souhaitée en fonction de la température de la FC. La déshumidification se stoppe lorsque l'humidité est repassée sous un seuil minimal.

Chaque régulation est constituée de deux correcteurs PID. Le premier détermine la température de soufflage et la puissance de l'UTA en fonction de l'écart entre la température de la FC et la température de refroidissement ou de chauffage. Le deuxième régule la V3V-02 ou la V3V-03 afin de maintenir le point de soufflage défini par le premier PID.

Une dernière étape reste nécessaire pour faire fonctionner le système réel : définir les paramètres des PID. Plusieurs méthodes existent pour cela. Parmi celles-ci, la méthode de Ziegler-Nichols permet de définir les paramètres K_p , T_i et T_d , sans modèles numériques, à partir de tests sur le système réel. Les étapes sont les suivantes :

- 1- Faire fonctionner la régulation 2 uniquement en boucle ouverte avec une ouverture de V3V (02 ou 03) stabilisée (par exemple 50%) et attendre que la sortie (T_{souffl}) se stabilise
- 2- Faire un échelon de consigne. Par exemple, augmenter de 10% la consigne d'ouverture de la V3V
- 3- Enregistrer la réponse en température jusqu'à ce qu'elle se stabilise de nouveau. Une courbe similaire à celle présentée Figure 5.13 doit être obtenue.

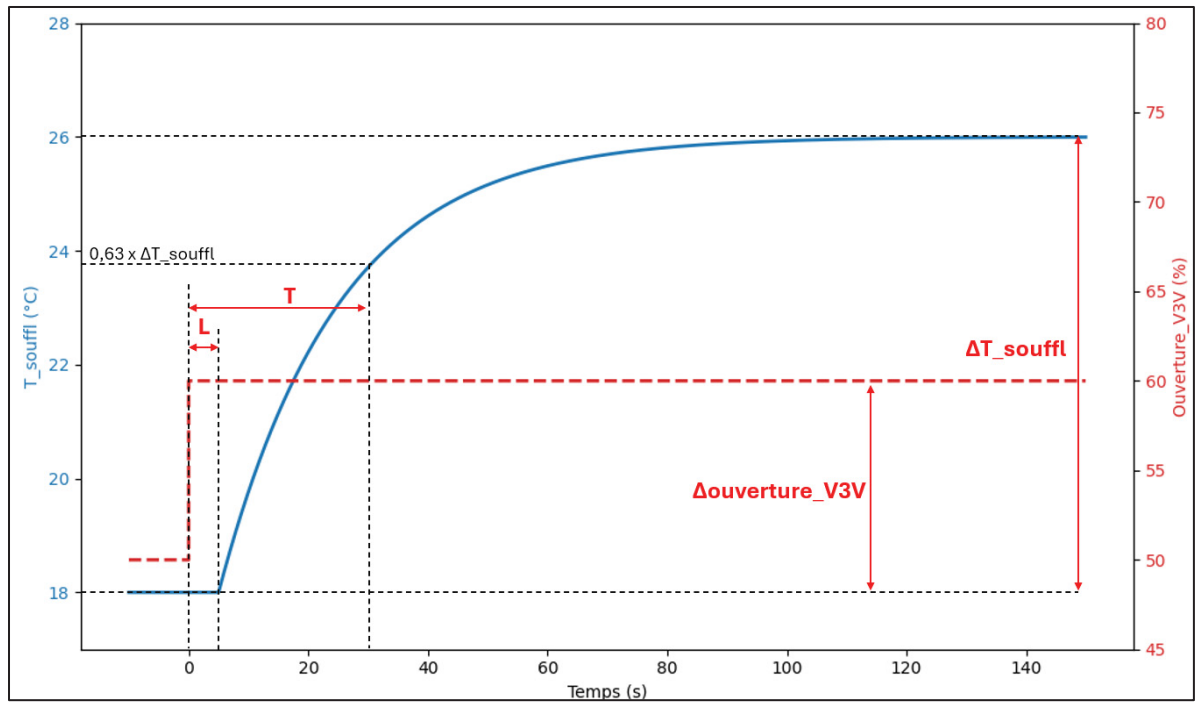


Figure 5.13 Exemple de réponse de la température de soufflage à un échelon de consigne sur la valve trois voies

4- Sur cette courbe mesurer :

- Le temps mort (L) : délai entre l'échelon de consigne et le début de la réponse
- La constante de temps (T) : temps pour atteindre 63% de la valeur finale
- Le gain (K) : rapport entre la variation de T_{souffl} (ΔT_{souffl}) et la variation de l'ouverture de la V3V ($\Delta \text{Ouverture_V3V}$)

5- Déterminer K_p , T_i et T_d à l'aide des formules suivantes :

$$K_p = \frac{T}{K \cdot L} \quad (5.1)$$

$$T_i = 2 \cdot L \quad (5.2)$$

$$T_d = 0,5 \cdot L \quad (5.3)$$

Ces mêmes étapes sont ensuite appliquées à la boucle de régulation 1, avec le PID_V3V fonctionnant cette fois en boucle fermée : un échelon de $T_{\text{souffl_cons}}$ est réalisé et la variation de la température de la FC est étudiée pour en déduire les constantes du PID.

Certains contrôleurs permettent aussi d'identifier automatiquement les constantes K_p , T_i et T_d . C'est le cas du logiciel LabVIEW utilisé pour programmer le contrôle en se servant du module « PID – Réglage automatique ». Cette démarche devra être réalisée un fois le système installé.

- Contrôle des températures des réservoirs chaud et froid

Comme mis en valeur en 5.2.2, la stratégie de contrôle des réservoirs chaud et froid comporte des conditions d'arrêt manquantes sur les thermopompes, et ne peut donc pas être implémentée telle quelle.

Pour la TPEE-01, qui agit simultanément sur les deux réservoirs, aucune condition d'arrêt n'existe pour le réservoir non régulé :

- En mode refroidissement, elle refroidit le réservoir froid mais réchauffe en même temps le réservoir chaud, dont la température peut alors dépasser sa valeur maximale sans que cela n'arrête la thermopompe.
- En mode chauffage, symétriquement, elle réchauffe le réservoir chaud mais refroidit le réservoir froid, dont la température peut descendre sous sa valeur minimale sans déclencher d'arrêt.

Pour la TPAE-01, qui fonctionne seule sur un seul réservoir, la température du réservoir non régulé peut dériver sans condition d'arrêt associée :

- En mode chauffage, la température du réservoir froid, qui n'est pas régulée, peut passer au-dessus de sa température minimale ;
- En mode refroidissement, la température du réservoir chaud peut passer en dessous de sa température maximale.

Une nouvelle condition d'arrêt doit ainsi être ajoutée pour chaque thermopompe lors des deux saisons. L'ensemble des conditions de lancement et d'arrêt des thermopompes sont résumées dans le Tableau 5.7. Les nouvelles conditions sont notées en gras.

Tableau 5.7 Conditions de lancement et d'arrêt des TPEE et TPAE

	Condition	TPEE-01	TPAE-01
Saison de refroidissement	De lancement	$T_RES_F > TC_F + db$ ET $T_RES_C < T_RES_C_max$	$T_RES_F > TC_F + db$ ET $T_RES_C \geq T_RES_C_max$
	D'arrêt	$T_RES_F < TC_F - db$ OU $T_RES_C > T_RES_C_max$	$T_RES_F < TC_F - db$ OU $T_RES_C < T_RES_C_max - db$
Saison de chauffage	De lancement	$T_RES_C < TC_C - db$ ET $T_RES_F > T_RES_F_min$	$T_RES_C < TC_C - db$ ET $T_RES_F \leq T_RES_F_min$
	D'arrêt	$T_RES_C > TC_C + db$ OU $T_RES_F < T_RES_F_min$	$T_RES_C > TC_C + db$ OU $T_RES_F > T_RES_F_min + db$

Pour résumer, en saison de refroidissement, la TPEE-01 se lance si le réservoir froid est au-dessus de sa consigne ($T_RES_F > TC_F + db$) et le réservoir chaud est en dessous de sa température maximale ($T_RES_C < T_RES_C_max$) puis se stoppe si le réservoir froid repasse sous sa consigne ($T_RES_F < TC_F - db$) ou que le réservoir chaud devient trop chaud ($T_RES_C > T_RES_C_max$). La TPAE-01 se lance si le réservoir froid est au-dessus de sa consigne mais que le réservoir chaud ne peut pas être réchauffé puis se stoppe si le réservoir froid repasse sous sa valeur consigne ou que le réservoir chaud devient assez froid pour utiliser la TPEE-01 ($T_RES_C < T_RES_C_max - db$).

Le principe est symétrique pour la saison de chauffage. La TPEE-01 se lance si le réservoir chaud est en dessous de sa consigne ($T_RES_C < TC_C - db$) et le réservoir froid est au-dessus de sa température minimale ($T_RES_F > T_RES_F_min$) puis se stoppe si le réservoir chaud repasse au-dessus de sa consigne ($T_RES_C > TC_C + db$) ou que le réservoir froid devient trop froid ($T_RES_F < T_RES_F_min$). La TPAE-01 elle se lance si le réservoir chaud est en dessous de sa consigne et le réservoir froid ne peut pas être refroidit puis se stoppe si le réservoir chaud repasse au-dessus de sa valeur consigne ou que le réservoir froid devient assez chaud pour utiliser la TPEE-01 ($T_RES_F > T_RES_F_min + db$).

En complément de ces conditions de lancement et d'arrêt, il faut s'assurer dans le contrôle que les pompes (PC-01, 02 ou 03 selon la thermopompe en fonctionnement) soient allumées pour que l'eau circule dans les circuits avant d'allumer les thermopompes, et que ces PC soient éteintes 60 secondes après les thermopompes, comme mentionné section 5.2.2.

Avec ces ajouts, la régulation des températures des réservoirs est complète et peut être implémentée dans le contrôleur. D'autres améliorations restent toutefois envisageables : la TPAE-01 disposant d'un compresseur à vitesse variable, il serait pertinent d'étudier par la suite l'ajustement de la température de consigne de l'eau du circuit, afin d'optimiser sa consommation énergétique.

Le contrôle du système CVCA est désormais décrit dans son ensemble. La prochaine étape est de l'implémenter dans le système réel. Pour cela, il est d'abord nécessaire de définir et de mettre en place l'instrumentation nécessaire à la régulation, puis de concevoir le contrôleur dans lequel sera installée cette stratégie.

5.3.2 Mise en place du contrôleur

La mise en place de la stratégie de contrôle nécessite un système d'acquisition et de contrôle, afin de récolter des données et envoyer des consignes aux équipements.

L'entièreté du contrôle de la FC est réalisée à l'aide du logiciel LabVIEW installé sur un ordinateur. Comme évoqué précédemment, la communication avec le « monde extérieur » se fait soit à l'aide des cartes Compact DAQ (C DAQ) de National Instrument, soit via la carte ModBus qui permet la communication avec les appareils compatibles (pour nous TPAE-01 et LED) . Le logiciel LabVIEW permet d'acquérir des données, de les gérer, de les stocker mais aussi de mettre en place des stratégies de contrôle afin d'envoyer des consignes aux différentes sorties des cartes C DAQ et donc aux équipements. La Figure 5.14 montre le schéma général des branchements de l'instrumentation et des équipements de la FC.

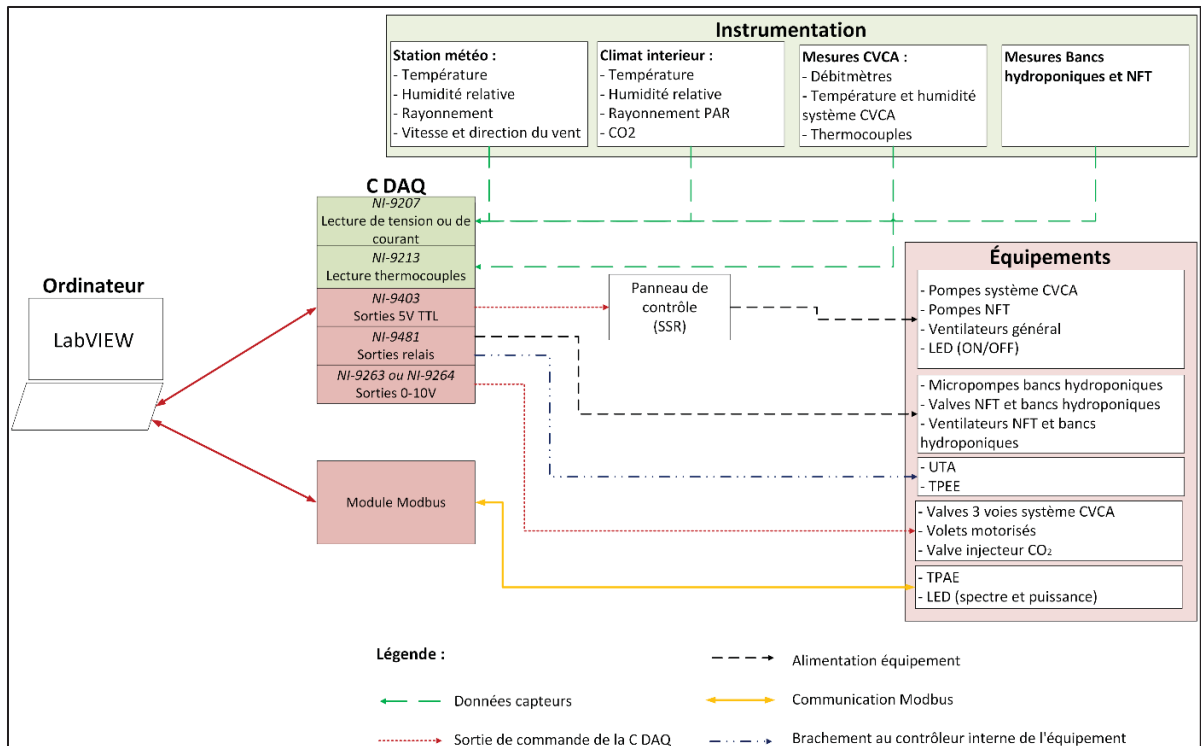


Figure 5.14 Branchements du contrôleur

Dans la Figure 5.14 le détail de l'instrumentation (mesure) est présenté en haut (en vert) et les équipements (pilotables) sont présentés à droite (en rouge). Ces cartes présentées dans le C DAQ possèdent des entrées de mesure de tension et de courant ainsi que des entrées de thermocouples, ce qui permet de lire les données de l'ensemble de l'instrumentation. Elles ont aussi des sorties numériques de 5V, des sorties 0 à 10V programmables et des sorties de relais qui permettent de contrôler l'ensemble des équipements.

La suite de ce chapitre se concentre sur le choix de l'instrumentation nécessaire à la régulation et à la mise en place du contrôle des équipements du système CVCA. Il est découpé en trois sous parties : la mise en place de l'instrumentation nécessaire au contrôle, le contrôle des équipements puis la réalisation de l'interface d'acquisition et de contrôle sur LabVIEW.

- Instrumentation nécessaire au contrôle du système CVCA

Pour définir la structure de la partie mesure, la première étape est de déterminer les données requises afin de pouvoir réguler les différents paramètres listés dans la section 5.1, puis de

sélectionner des capteurs respectant les précisions recommandées dans la littérature. Parmi les articles et mémoires récents, Coudret (2022) a réalisé une liste des mesures requises pour évaluer les performances énergétiques des enceintes de production végétale intérieures. Ce travail de maîtrise a aussi mis en valeur les précisions recommandées pour ces capteurs et une liste de marques et modèles préconisés. Cette sélection a été adaptée afin d'aboutir à des capteurs répondant aux besoins du projet de FC de l'ÉTS. Les capteurs sélectionnés doivent d'une part rester dans le budget et d'autre part respecter les contraintes techniques, notamment la précision et la compatibilité avec les cartes d'acquisition. Ainsi, le Tableau 5.8 résume les mesures nécessaires à la régulation et les capteurs retenus.

Tableau 5.8 Liste des capteurs nécessaires à la régulation, avec leur précision et la précision recommandée

	Capteur	Référence	Précision	Précision recommandée Coudret (2022)
Climat intérieur	Température	Dwyer RHPX-2SSA0-00	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
	Humidité relative		$\pm 2\%$	$\pm 5\%$
Sortie UTA	Température	Dwyer RHPX-2SDA0-00	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
	Humidité relative		$\pm 2\%$	$\pm 5\%$
Réservoir chaud	Température	Omega TJ36-CPSS-14G-18-OSTW-M	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	/
Réservoir froid	Température	Omega TJ36-CPSS-14G-18-OSTW-M	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	/

Les mesures à réaliser pour le contrôle de l'UTA sont les températures et humidités de l'espace de culture et du point de soufflage. Les mesures essentielles à la régulation des réservoirs de stockage thermique sont les températures des réservoirs chaud et froid.

En plus des capteurs nécessaires à la régulation du système CVCA, un travail de sélection similaire a été réalisé pour sélectionner des sondes à installer à l'extérieur, dans l'espace de culture et dans le système CVCA. Ces sondes, présentées en Annexe I, ont deux objectifs : avoir les mesures nécessaires pour réguler les équipements non étudiés ici (injecteur de CO_2 , LED, bancs hydroponiques) et étudier les performances énergétiques de la FC et du système CVCA.

Une fois l'instrumentation nécessaire à la régulation sélectionnée, l'étape suivante consiste à développer le contrôleur chargé de transmettre les consignes de fonctionnement aux différents

équipements en fonction des données acquises par les capteurs et de la stratégie de contrôle retenue. La mise en œuvre de ce contrôleur est présentée dans la section suivante.

- Contrôle des équipements

Le contrôleur permet de commander l'ensemble des équipements selon deux modes : une commande tout ou rien (ON/OFF), pour les équipements ne fonctionnant qu'en marche/arrêt, et une commande progressive (0-10V), pour les équipements dont le niveau d'actionnement doit être ajusté en pourcentage. Ces commandes sont générées par les cartes C DAQ ainsi que par un module Modbus, selon le cas.

Certains équipements (pompes, thermopompes, V3V-01 contrôlable en deux modes : ouvert ou fermé) sont contrôlés en tout ou rien. Pour ceux de grande puissance (au-dessus de 100W) dépourvus de contrôleur interne, un panneau de contrôle constitué de relais statiques (SSR) est utilisé, les sorties relais des cartes C DAQ n'étant pas dimensionnées pour ces puissances. Les équipements disposant d'un contrôleur interne accessible (UTA, TPEE-01) ou communiquant par Modbus (TPAE-01), sont quant à eux commandés directement via leur contrôleur interne, sans passer par le panneau de contrôle.

D'autres équipements nécessitent une ouverture ou un actionnement réglable en pourcentage. C'est le cas des valves V3V-02 et V3V-03 et des VM. Une tension proportionnelle à leur ouverture, comprise entre 0 et 10V, est alors envoyée par une carte C DAQ. 0V correspond à 0 % d'ouverture et 10V à 100 %.

L'étape suivante consiste à développer l'interface de contrôle du système. Cette interface a pour rôle de collecter les données provenant des différents capteurs et équipements, de les stocker dans une base de données, de les afficher en temps réel et d'assurer le pilotage des équipements selon les stratégies de contrôle définies précédemment.

- Interface d'acquisition et de contrôle

L'interface d'acquisition et de contrôle est réalisée avec LabVIEW. Les objectifs du programme sont résumés dans la Figure 5.15.

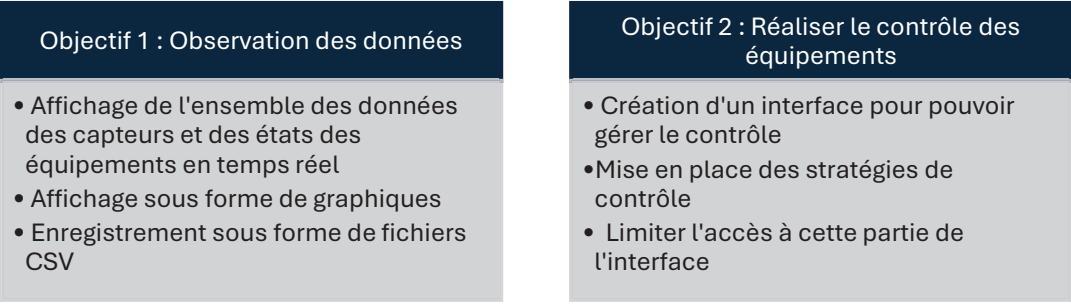


Figure 5.15 Objectifs du programme LabVIEW

Afin de répondre à l’objectif 1, plusieurs interfaces ont été créées. Ils permettent d’afficher les données de l’ensemble des capteurs du système et de connaître l’état des équipements en temps réel. Une page permet aussi de les afficher sous forme de graphiques. L’ensemble des données sont aussi enregistrées sur l’ordinateur faisant fonctionner le programme, dans des fichiers csv. Des captures d’écran de ces différentes interfaces sont présentées en Annexe II.

Le deuxième objectif du programme est de pouvoir mettre en place et gérer le contrôle, en particulier celui du système CVCA. Pour cela, deux taches différentes sont à réaliser. La première est de créer une interface permettant de gérer le contrôle. La deuxième est de programmer la stratégie. L’interface de contrôle est montrée Figure 5.16.

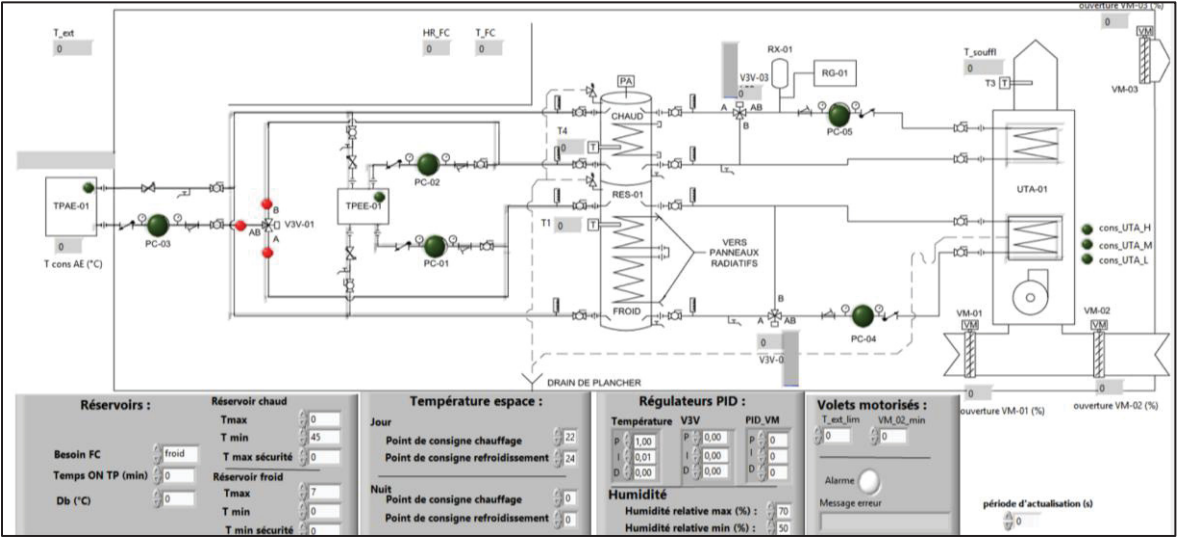


Figure 5.16 Interface de contrôle du système CVCA

Cette interface est constituée d'un schéma du système CVCA et d'un bandeau afin de régler l'ensemble des paramètres nécessaires au contrôle, notamment les différents points de consigne définis lors de la présentation des stratégies.

Une fois que l'interface créée, les stratégies de régulation de l'UTA et des températures des réservoirs de stockage thermiques ont été codées.

Le contrôleur du système CVCA est maintenant finalisé et le code LabVIEW est opérationnel. Un travail similaire devra par la suite être réalisé pour les autres équipements à contrôler, afin d'obtenir un contrôle permettant de gérer l'ensemble des équipements présenté en section 5.1. Une fois la conception du système d'acquisition et de contrôle ainsi que l'interface utilisateur finalisés, plusieurs étapes restent à réaliser avant l'implémentation de ce contrôleur dans le système réel. Ces étapes sont détaillées dans la section suivante.

- Perspectives de mise en œuvre

Pour finaliser la mise en place du contrôle, plusieurs étapes restent à réaliser.

La première consiste à connecter l'ensemble des sondes aux entrées des C DAQ pour s'assurer de leur fonctionnement puis les calibrer. En parallèle, les sorties des cartes C DAQ doivent être configurées et testées, afin de vérifier qu'elles envoient la commande voulue. L'ensemble de ces tests pourra être réalisé à l'aide du module NI MAX, présent dans l'environnement LabVIEW, qui permet de visualiser en temps réel les valeurs mesurées sur chaque entrée, de forcer manuellement une valeur sur chaque sortie pour vérifier sa réponse, et de diagnostiquer d'éventuels problèmes de câblage ou de configuration avant l'intégration dans le programme final.

Une fois les entrées et sorties validées individuellement, il faut s'assurer que chaque équipement répond correctement aux commandes qui lui sont envoyées par les C DAQ.

Des tests doivent ensuite être effectués afin de déterminer les paramètres des différents PID, selon la méthode décrite en section 5.3.1.

Les sorties et entrées des C DAQ doivent enfin être associées à celles du programme LabVIEW, afin que les données mesurées s'affichent sur l'interface d'acquisition et soient

utilisées dans le contrôle, et que les équipements réagissent comme attendu en fonction de ce contrôle.

Une fois le système opérationnel, une étude énergétique devra être réalisée afin d'évaluer la performance réelle du contrôle mis en place et, le cas échéant, d'identifier des pistes d'optimisation.

Enfin, une fois l'entièreté du contrôle mis en place, il serait intéressant d'explorer d'autres stratégies de régulation, en s'inspirant de la revue de littérature, afin de réduire la consommation de la FC. Comme toutes les données et tous les contrôles sont regroupés sur le même code, les liens entre les paramètres pourront être pris en compte.

Le chapitre suivant propose un point de départ de cette future étude, avec la proposition d'une nouvelle stratégie de contrôle du système CVCA pour réguler sa température.

5.4 Proposition d'une nouvelle stratégie de contrôle

Pour aller plus loin, il serait intéressant de tester d'autres approches de contrôle du système CVCA. En effet, d'après la revue de littérature, plusieurs méthodes permettraient d'augmenter les performances du système en proposant un meilleur maintien des consignes tout en diminuant la consommation énergétique.

Parmi ces stratégies se trouvent la logique floue, les réseaux de neurones et le contrôle prédictif. Ces approches ont en commun de permettre une gestion globale du système en pilotant simultanément plusieurs paramètres tout en tenant compte de leurs interactions, contrairement à une régulation indépendante de chaque grandeur. Le contrôle prédictif nécessite toutefois d'avoir un modèle numérique de l'espace, ce qui n'est pas encore le cas. De son côté, le réseau de neurones a besoin de données de la FC pour sa phase d'entraînement. Là aussi cela n'est pas possible, car la ferme n'est pas encore en fonctionnement. La stratégie de contrôle restante est donc la logique floue. Cette approche a l'avantage de pouvoir être utilisée sans avoir besoin d'un modèle ni de données précises du fonctionnement du système, ceux-ci étant remplacés par la connaissance du système à contrôler apportée par des experts (humains) sous la forme de règles de prise de décision.

À ce stade du projet, elle constitue ainsi la seule stratégie avancée pouvant être mise en œuvre sur la FC et cette section présente donc son déploiement. Dans un premier temps cette régulation n'est réalisée que pour un seul paramètre, la température de la FC. Se concentrer sur une seule grandeur permet de poser et de valider la méthodologie de formulation des règles, avant de l'étendre à plusieurs variables interdépendantes. L'objectif est ainsi de définir cette méthodologie en l'appliquant à la température. Pour cela, plusieurs articles présentant l'implémentation de logique floue dans des systèmes CVCA de bâtiments sont étudiés. Cette étude va permettre de pouvoir proposer une stratégie de contrôle à logique floue adaptée au système CVCA de la FC. Elle sera suivie d'une discussion sur les améliorations et prolongements qui pourront être réalisés sur ce contrôle, ainsi que sur la mise en place d'autres stratégies de contrôle dans les années à venir, lorsque des données de la FC seront disponibles.

5.4.1 Proposition d'un contrôle de la température à logique floue

Comme évoqué précédemment, la mise en place d'un contrôle à logique floue repose sur la connaissance d'experts plutôt que sur un modèle numérique ou des données précises du système. Pour mettre en place cette connaissance experte dans un contrôleur flou, les étapes suivantes doivent être réalisées (Lee, 1990) :

- Déterminer les paramètres d'entrée et de sortie du contrôleur
- Définir les univers des données d'entrée et de sortie
- Choisir la stratégie de fuzzification : utilisation de fonctions triangle, gaussienne ou autre
- Créer les sous-ensembles des paramètres d'entrée et de sortie
- Créer les règles de logique floue
- Choisir la méthode de défuzzification

Afin de réaliser au mieux ces différentes étapes, une recherche sur d'autres études ayant mis en place ce type de contrôle a été réalisée. Pour cela, une recherche sur compendex avec les mots clés « fuzzy logic » and « HVAC » and « application » a été réalisée. La recherche s'est ensuite limitée aux articles parus après 2015 présentant une description détaillée de la mise en place d'un contrôle à logique floue. En tout, 5 articles, présentant des caractéristiques

applicables au cas d'étude de la FC, ont été retenus. Ces articles sont résumés dans le Tableau 5.9.

Tableau 5.9 Articles étudiés pour la mise en place du contrôle flou de la température

Article	Type d'espace	Variables d'entrée (VE)	Nombre de sous-ensembles des VE	Variables de sortie (VS)	Sous-ensembles des VS
(Chojekci, Ambrozziak, & Borkowski, 2023)	Plusieurs pièces de 48 à 300 m ²	Erreur température de la pièce Variation de l'erreur	7 sous-ensembles chacun Fonctions triangle	Puissance de chauffage et de refroidissement	7 sous-ensembles chacun Fonctions triangle
(Klashanov & Swan, 2020)	Pièce	Erreur température de la pièce Variation de l'erreur Intégrale de l'erreur	7 sous-ensembles chacun Fonctions gaussiennes	Valves 3 voies des échangeurs chaud et froid	5 sous-ensembles Fonctions triangle
(Lan, Hou, Gou, Wong, & Wang, 2023)	Amphithéâtre	Confort thermique (confort de l'utilisateur de l'espace) Variation du confort	7 sous-ensembles pour l'erreur 5 sous-ensembles pour la variation Fonctions triangle	Température de soufflage et puissance de soufflage	7 sous-ensembles pour la température 3 sous-ensembles pour le soufflage Fonctions triangles
(Turhan, Simani, & Gokcen Akkurt, 2021)	Maison à une pièce (6x6x2,8m)	Sensation thermique des occupants (idem confort thermique) Température	4 sous-ensembles pour la sensation thermique 3 sous-ensembles pour la température Fonctions triangle	Température de consigne de la thermopompe et vitesse de son ventilateur	3 sous-ensembles chacun Fonctions triangles
(Attia, Rezek, & Saleh, 2015)	Pièce d'habitation	Erreur de température Erreur d'humidité	7 sous-ensembles chacun Fonctions triangles	Valves des circuits chaud, froid et d'humidification	7 à 8 sous-ensembles selon les saisons Fonctions triangle

En plus de ces articles, une revue de littérature sur la logique floue appliquée aux systèmes de réfrigération (Belman-Flores et al., 2022) a été utilisée.

D'après cette revue, les paramètres d'entrée les plus communs d'un contrôleur flou pour réguler la température sont l'erreur en température et la variation de cette erreur (Belman-Flores et al., 2022). C'est aussi les entrées qu'ont choisies Chojecki, Ambroziak, & Borkowski, (2023) et Klashanov & Swan, (2020) dans leurs articles. Attia et al. (2015) n'utilise lui que l'erreur en température comme variable d'entrée, mais contrôle un paramètre de plus (l'humidité) par rapport aux autres études citées. Utiliser la variation de l'erreur en plus de l'erreur permet d'anticiper les erreurs futures et donc de limiter les dépassements et de réduire le temps de réponse. Son objectif est similaire à celui du paramètre dérivé dans un contrôle PID.

Les paramètres de sorties des différents contrôles étudiés sont soit la puissance du système de chauffage ou de refroidissement, la température de soufflage du système ou l'ouverture des valves de régulation des circuits chaud et froid du système CVCA, comme dans le cas d'étude de la FC de ce mémoire.

Pour chaque variable d'entrée et de sortie, des fonctions d'appartenances y sont associées. Dans tous les articles étudiés, les variables sont définies par 5 ou 7 sous-ensembles, sauf pour Turhan (2021), qui a défini 3 sous-ensembles pour l'erreur en température. Plus un paramètre est décrit par un nombre important de sous-ensembles, plus le contrôle sera précis. Cependant, cela augmente rapidement le nombre de règles de logique, ce qui augmente les besoins en calculs et la complexité du système. Un compromis est donc nécessaire (Lee, 1990).

Ensuite, les fonctions d'appartenance sont soit des fonctions triangulaires, soit des fonctions gaussiennes. Les fonctions triangle ont l'avantage de pouvoir représenter plus facilement les connaissances d'un expert et de simplifier le processus de calcul, ce qui explique son utilisation plus importante (Belman-Flores et al., 2022). Les fonctions gaussiennes permettent quant à elles des transitions plus douces entre les sous-ensembles et donc de réduire les à-coups dans la réponse. Elles demandent cependant plus de ressources de calcul.

À partir de ces observations, un contrôle à logique floue de la température de la FC à l'aide du système CVCA est proposé. Les variables d'entrée et de sortie du contrôle ainsi que leurs plages de valeurs possibles (univers de données) sont résumées dans le Tableau 5.10.

Tableau 5.10 Variables d'entrée et de sortie du contrôle flou

Variables d'entrée	Valeurs possibles	Variables de sortie	Valeurs possibles
Erreur en température (E_T)	$[-3,3] ^\circ\text{C}$	V3V-02 V3V-03	$[0;100] \%$ $[0;100] \%$
Variation de l'erreur en température ($\Delta E_T/t_1$)	$[-3,3] ^\circ\text{C}/\text{min}$	UTA PC-04 PC-05	[OFF, L, M, H] ON/OFF ON/OFF

Comme dans les études précédentes, les variables d'entrée sont l'erreur en température et la variation de cette erreur. Dans ce contrôle, la variation de l'erreur en température correspond à la différence entre l'erreur à l'instant t et l'erreur à l'instant $(t - t_1)$ divisé par t_1 , t_1 étant la période entre deux tests sur la température de la FC. Les variables de sorties sont les valves trois voies des circuits chaud et froid, les pompes de ces circuits ainsi que la puissance de l'UTA.

L'étape suivante consiste à choisir les sous-ensembles et les fonctions d'appartenances des variables. D'après les articles étudiés, le bon rapport entre le temps de calcul, la complexité et la précision semble être de cinq ou sept sous-ensembles par paramètre. Afin de simplifier la mise en place, les variables d'entrée et de sortie seront donc définies par 5 sous-ensembles, sauf le ventilateur de l'UTA qui n'est réglable qu'à 3 vitesses plus l'arrêt donc quatre sous-ensembles et les pompes qui sont réglables en ON/OFF seulement. Les fonctions d'appartenances seront des fonctions triangles, ce qui semble être le plus simple à mettre en œuvre et le plus utilisé actuellement. Cependant des fonctions gaussiennes pourront être mises en place par la suite afin de tester les différences dans le contrôle (temps de calcul, maintien des conditions climatiques et réduction de la consommation d'énergie).

Les intervalles de chaque sous-ensemble, notamment des paramètres d'entrée ont été définis en s'inspirant de ceux mis en place dans la littérature. En effet, dans les articles étudiés, l'erreur de température est en général définie de -3°C à 3°C . La variation de cette erreur est définie soit

entre -3 et 3 °C/min ou entre 1 et -1 °C/min. Les fonctions d'appartenance créées sont donc présentées Figure 5.17.

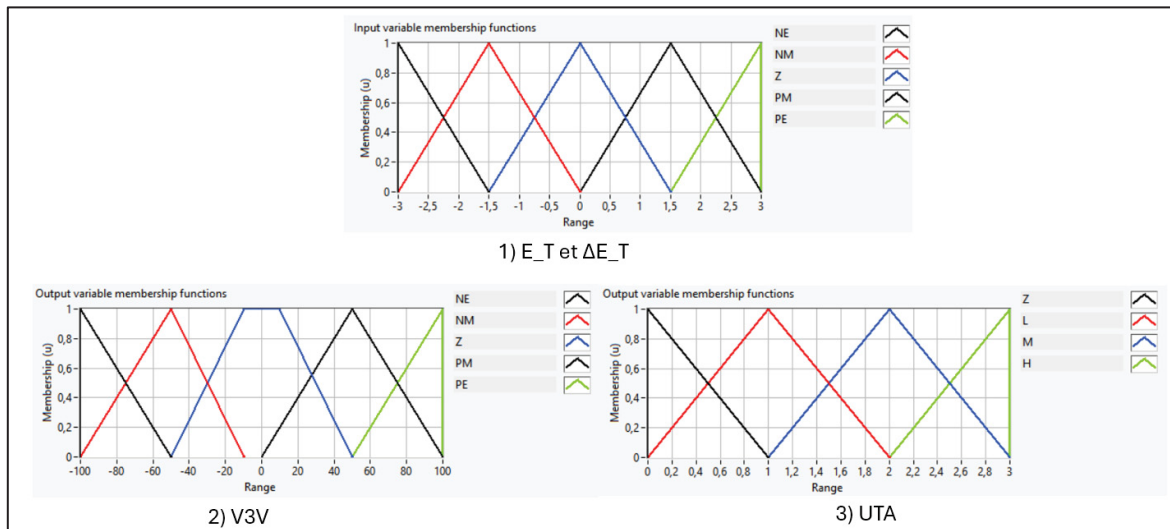


Figure 5.17 Fonctions d'appartenance des paramètres d'entrée et de sortie

Pour l'erreur en température et la variation de cette erreur, deux fonctions d'appartenance identiques ont été créées. Ces entrées peuvent être positives élevées (PE), positives moyennes (PM), égales à 0 (Z), négatives moyennes (NM) et négatives élevées (NE). Les deux V3V sont représentées par une même fonction d'appartenance. Si la valeur de V3V est positive, alors elle correspond au pourcentage d'ouverture de V3V-02. La partie négative correspond à l'ouverture de la V3V-03. L'ensemble nul (Z) est représenté par un trapèze. Cela permet d'avoir une plage (entre -10 % et 10%) ou aucune valve n'est ouverte. Les pompes PC-04 et PC-05 sont contrôlées avec la commande des valves. Lorsque la V3V-02 doit être ouverte, la PC-04 est allumée. Lorsque la V3V-03 doit être ouverte, la PC-05 est allumée. Enfin, la variable de sortie pour la puissance de l'UTA est créée.

L'étape suivante consiste à mettre en place les règles de logiques floues. Ces règles représentent la connaissance qui est donnée par l'expert. Elles sont définies dans le Tableau 5.11.

Tableau 5.11 Règles de logique floue

$\Delta E_T/t1$ E_T	PE	PM	Z	NM	NE
PE	V3V : PE UTA : H	V3V : PE UTA : H	V3V : PE UTA : H	V3V : PM UTA : L	V3V : Z UTA : Z
PM	V3V : PE UTA : H	V3V : PE UTA : H	V3V : PM UTA : L	V3V : Z UTA : Z	V3V : NM UTA : L
Z	V3V : PE UTA : H	V3V : PM UTA : L	V3V : Z UTA : Z	V3V : NM UTA : L	V3V : NE UTA : H
NM	V3V : PM UTA : L	V3V : Z UTA : Z	V3V : NM UTA : L	V3V : NE UTA : H	V3V : NE UTA : H
NE	V3V : Z UTA : Z	V3V : NM UTA : L	V3V : NE UTA : H	V3V : NE UTA : H	V3V : NE UTA : H

La connaissance donnée par un expert amenant à la création du tableau ci-dessus est la suivante : plus l'erreur en température est élevée, plus le chauffage doit être important. De même, plus la variation de l'erreur est élevée, plus le chauffage doit être fort. Le principe est similaire avec les erreurs de température négatives. Plus l'erreur est négative, plus le refroidissement doit être important.

La méthode du centre de masse est ensuite utilisée pour la défuzzification. C'est la méthode la plus simple et la plus utilisée : prenons un exemple. Supposons que l'erreur en température soit de $E_T = 2\text{ °C}$ et que sa variation soit de $\Delta E_T/t1 = 0,5\text{ °C/min}$. La première étape consiste à fuzzifier ces deux entrées, c'est-à-dire à déterminer leur degré d'appartenance à chacun des sous-ensembles définis dans le graphe 1 de la Figure 5.17. La valeur $E_T = 2\text{ °C}$ se situe entre les sous-ensembles PM et PE, avec des degrés d'appartenance respectifs de 0,67 et 0,33. De même, $\Delta E_T/t1 = 0,5\text{ °C/min}$ se situe entre les sous-ensembles Z et PM, avec des degrés d'appartenance respectifs de 0,67 et 0,33.

Ces deux entrées activent donc quatre règles du Tableau 5.11, résultant de la combinaison des sous-ensembles PM et PE pour E_T avec Z et PM pour $\Delta E_T/t1$. Le degré d'activation de chaque règle est obtenu en appliquant l'opérateur ET, c'est-à-dire en prenant le minimum entre les degrés d'appartenance des deux entrées concernées. Les quatre règles activées sont ainsi résumées dans le Tableau 5.12.

Tableau 5.12 Règles activées et degré d'activation

E_T	$\Delta E_T/t1$	Degré d'activation	V3V	UTA
PM (0,67)	Z (0,67)	0,67	PM	L
PM (0,67)	PM (0,33)	0,33	PE	H
PE (0,33)	Z (0,67)	0,33	PE	H
PE (0,33)	PM (0,33)	0,33	PE	H

Les sorties obtenues sont ensuite combinées en une seule surface floue par sortie : comme plusieurs règles peuvent proposer une même sortie, mais un degré d'activation différent, le degré le plus élevé parmi toutes les règles concernées pour chaque valeur possible de sortie est retenu. L'écrtage consiste ensuite à tronquer (ou « plafonner ») la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou concerné à la hauteur correspondant au degré d'activation de la règle, de sorte que toute valeur d'appartenance dépassant ce degré est ramenée à celui-ci. Pour la sortie V3V, la règle PM est ainsi écrêtée à 0,66 et la règle PE, conclue par trois règles différentes, est écrêtée à 0,33 (soit le maximum des trois degrés d'activations obtenus). Le même principe s'applique à la sortie UTA : le sous-ensemble L est écrêté à 0,66 et le sous-ensemble H à 0,33. L'union de ces fonctions d'appartenance écrêtées, directement issues des graphes 2 et 3, forme une fonction d'appartenance résultante, notée $\mu(x)$. La Figure 5.18 présente cette fonction d'appartenance pour la V3V, tracée en pointillés rouges. Elle est obtenue après avoir écrêté le sous-ensemble PM à 0,67 et PE à 0,33.

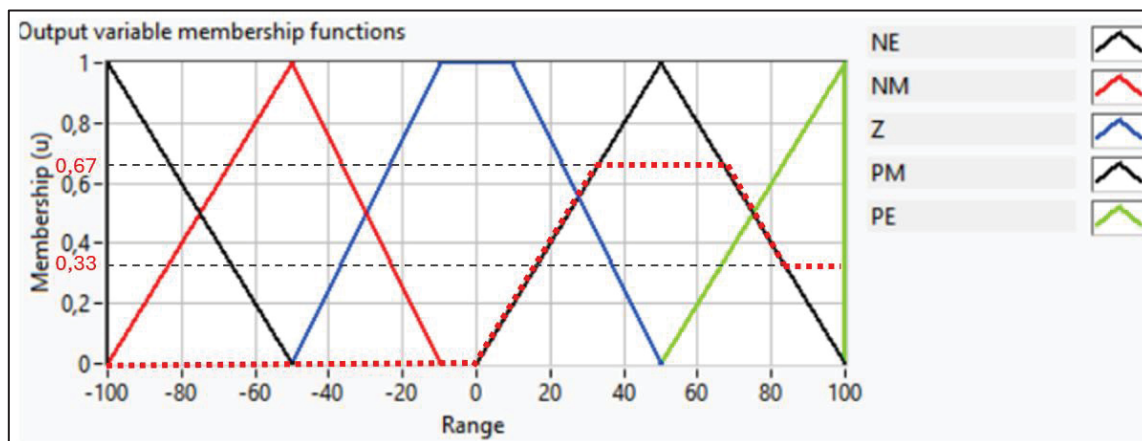


Figure 5.18 Tracé de la fonction résultante d'appartenance de la V3V

Enfin, la défuzzification par centre de masse est appliquée à cette fonction résultante, selon l'équation suivante :

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (5.4)$$

où $\mu(x)$ correspond à la fonction d'appartenance de la sortie considérée et x la valeur de sortie. L'application de cette méthode donne une ouverture de valve V3V de 52,6 % (soit une ouverture de la V3V-02, puisque la valeur est positive) et une puissance de l'UTA de 1,38, correspondant à une position intermédiaire entre les vitesses L et M du ventilateur.

Ce contrôle doit ensuite être implémenté dans LabVIEW. Pour cela un module spécial existe. Ce module permet d'entrer les variables d'entrée et de sortie ainsi que leurs ensembles correspondants. Il permet ensuite d'écrire les règles de logique floue et la méthode de défuzzification. Ce module peut ensuite être placé dans une boucle de régulation. À partir des données d'entrées il donne les consignes à envoyer aux équipements. Il permet aussi de tracer les sorties en fonction des entrées, sous forme de graphiques en trois dimensions comme ceux présentés Figure 5.19.

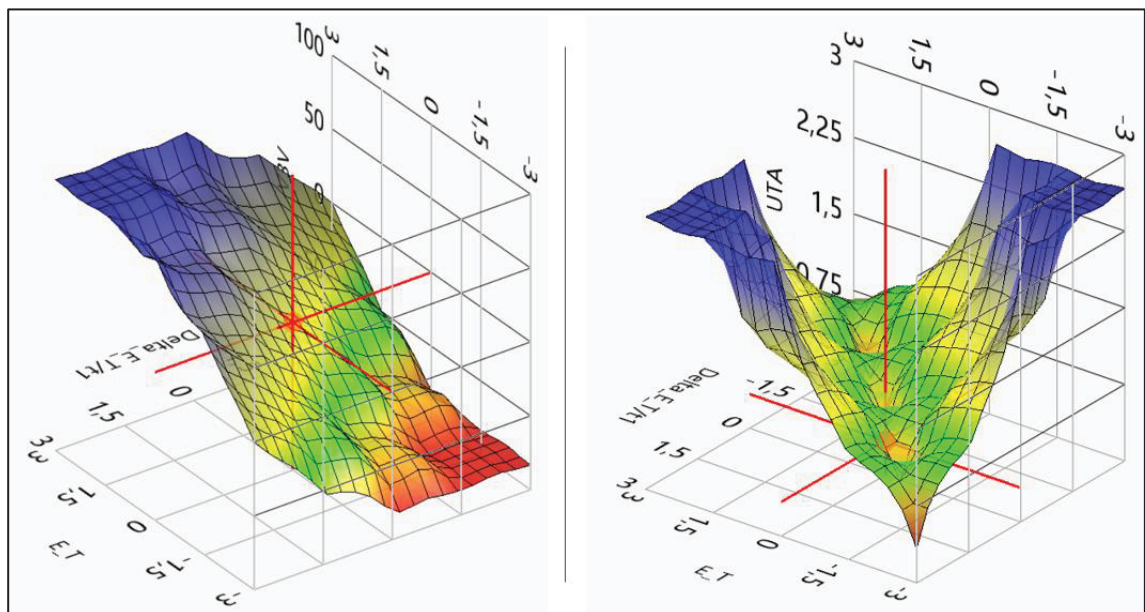


Figure 5.19 Sorties de la V3V et de l'UTA en fonction de l'erreur en température et de sa variation

Le graphique de gauche présente l'ouverture des V3V en fonction des entrées. Plus l'erreur est négative et plus sa variation est négative, plus l'ouverture tend vers -100%. À l'inverse, plus l'erreur est positive et plus sa variation est positive, plus l'ouverture tend vers 100%.

Le graphique de droite présente la puissance de soufflage de l'UTA en fonction des entrées. Comme pour l'ouverture de V3V, plus l'erreur et sa variation sont positives et grandes, plus la puissance de l'UTA est grande. De même, plus l'erreur et sa variation sont négatives et faibles, plus la puissance de l'UTA est forte. Dans le système, l'UTA n'est contrôlable qu'en 4 modes discrets différents : éteint, faible (L), moyen (M) et fort (H). Il est donc nécessaire d'ensuite convertir cet ensemble continu en ensemble discret.

Ce paragraphe a permis de proposer une nouvelle stratégie de contrôle à base de logique floue et de présenter sa méthodologie de mise en place pour réguler la température. Cette stratégie a été codée sur LabVIEW, à l'aide d'un module spécifique. La section suivante discute de cette mise en place et des choix qui ont été réalisés. Les améliorations qui pourraient être réalisées sur ce contrôle ainsi que ses limites potentielles sont ensuite présentées.

5.4.2 Discussion du contrôle à logique floue

La méthodologie de mise en place d'une stratégie de contrôle à logique floue pour réguler la température de la FC a été proposée. Cette stratégie a été créée en se basant sur des résultats d'études pouvant être transposées au cas du contrôle du système CVCA.

Il faut cependant s'assurer que ce contrôle convient bien à ce cas d'étude. En effet, plusieurs choix ont été fait dans le développement de la stratégie de contrôle. Le nombre de sous-ensembles retenu (5 contre 7 dans certaines études de cas) constitue un compromis entre précision du contrôle et complexité de calcul et de mise en place. Ce choix reste difficile à valider sans un moyen de tester concrètement son effet sur la réponse du système. De même, le choix de fonctions d'appartenance triangulaires plutôt que gaussiennes privilégie la simplicité de mise en œuvre au détriment d'une transition plus douce entre sous-ensembles, ce qui pourrait se traduire par des à-coups dans la commande envoyée aux équipements. Il serait

alors intéressant d'étudier l'impact d'un changement du nombre de sous-ensembles et le passage de fonctions triangles à gaussienne sur la performance du contrôle.

Un autre point à discuter concerne la validité du tableau de règles (Tableau 5.10), qui repose entièrement sur une connaissance experte inspirée de la littérature. Une validation de cette base de règles, que ce soit par simulation ou par comparaison avec le comportement observé du système, serait donc nécessaire avant de considérer cette stratégie comme fiable.

Afin de valider ces choix, il serait intéressant de créer un modèle numérique de la FC. Il servirait à tester cette stratégie, en observant la réaction du système à un changement de température. Cela permettrait d'abord de voir s'il fonctionne puis d'optimiser les paramètres de la base de données, afin d'avoir la réponse la plus adaptée possible au cas d'étude. Ce modèle permettrait aussi de tester les contrôles présentés dans la section 5.3.

Ce modèle pourrait ensuite être utilisé pour comparer numériquement cette stratégie au contrôle actuel, en observant le maintien des consignes, le temps de réponse, mais aussi le gain en consommation énergétique.

Une fois le contrôle testé numériquement, il serait intéressant de le tester en conditions réelles. En effet, d'après la revue de littérature, la majorité des contrôles à logique floue sont testés numériquement, mais très peu d'études présentent un test dans un système réel. C'est aussi une remarque qu'avait faite Chojecki et al. (2023) lors de la discussion de leur étude. Le tester dans de vraies conditions permettrait donc d'apporter de la connaissance.

Ensuite, la stratégie proposée ne prend en compte pour le moment que la température de la FC, afin de présenter sa méthodologie de mise en place. Or un des avantages du contrôle flou est de pouvoir prendre en compte les interactions entre les paramètres, il serait donc utile de la compléter, en ajoutant dans un premier temps la régulation de l'humidité. Ce paramètre pourrait être défini dans le contrôleur de façon similaire à la température, avec l'écart à la consigne et la variation de cet écart, ou seulement avec l'écart à la consigne pour limiter le nombre de règles de logique. Dans ce cas, il est aussi nécessaire de modifier les contrôles de sortie. En effet, pour réguler l'humidité les deux valves 3 voies (V3V-02 et V3V-03) doivent être lancées en même temps, ce qui est impossible avec le contrôle proposé actuellement, car

elles sont toutes les deux contrôlées par la même fonction de sortie du contrôleur. De plus, si la valve du circuit froid est régulée et pas ouverte à 100% pour la déshumidification, comme c'est le cas avec le contrôle classique, il faut aussi ajouter une vérification sur l'humidité de soufflage afin de s'assurer que la température entre les deux serpentins passe bien sous le point de rosée, donc que l'air se déshumidifie.

Il pourrait donc être envisagé, dans un deuxième temps, d'étendre ce contrôle aux autres paramètres contrôlés tels que les LED, le CO₂, voir l'irrigation. Cependant, cela peut rapidement amener à avoir un système complexe à mettre en place. Avec 5 sous-ensembles par variable d'entrée, le nombre de règles nécessaires passe de 25 pour deux entrées à 625 pour quatre entrées, ce qui complexifie considérablement la formulation des règles ainsi que les besoins de calcul. Pour avoir un contrôle complet, prenant en compte les liens entre tous les paramètres contrôlés, il serait donc pertinent d'étudier d'autres technologies d'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones ou le contrôle prédictif, voire une combinaison de ces approches.

Enfin, la sortie du contrôle flou mis en place peut aussi être discutée. Le choix a été fait d'utiliser la logique floue pour réguler directement l'ouverture des V3V. Ce type de contrôle pourrait cependant être associé à d'autres stratégies, comme des PID. Il serait par exemple possible d'utiliser la logique floue pour déterminer une température de soufflage consigne, qui deviendrait l'entrée d'un PID régulant les V3V, la logique floue remplacerait alors le premier des deux PID en cascade. Les PID sont en effet très performant lorsqu'il a un paramètre à contrôler avec un équipement, comme présenté dans la revue de littérature. C'est le cas ici, où un PID pourrait réguler une V3V en fonction d'une température de soufflage consigne déterminée par la logique floue.

L'étude de cas réalisée dans la revue de littérature (section 1.4) a notamment présenté plusieurs articles combinant différentes stratégies de contrôle afin de réguler la température et l'humidité tout en réduisant la consommation énergétique. Par exemple, Rizwan, Khan, Ahmad, & Kim (2023) rapportent ainsi une économie d'énergie de 36 % par rapport à un contrôle classique en

combinant logique floue et contrôle prédictif pour réguler température, humidité et CO₂. Dudnyk et al. (2025) obtiennent une réduction de la consommation de 10 à 12% par rapport à un contrôle classique en combinant respectivement réseau de neurones, logique floue, algorithme génétique et PI. Par ailleurs, Cai et al. (2025) combinent PID et logique floue pour améliorer le temps de réponse et la stabilité du contrôle par rapport à un PID simple, ce qui appuie la piste de cascade PID-logique floue proposée précédemment.

Cette étude de cas peut servir de point de départ afin de continuer à améliorer le contrôle en réduisant la consommation énergétique.

Enfin, la logique floue peut également être envisagée comme une première étape vers la mise en œuvre de stratégies de contrôle plus avancées. Même si ses performances ne sont pas optimales, elle est en effet capable d'assurer un fonctionnement satisfaisant de la FC sans nécessiter de modèle numérique ni de données d'apprentissage. Son déploiement sur le système réel permettrait ainsi de recueillir les données de fonctionnement nécessaires à la validation du modèle numérique développé pour le contrôle prédictif, mais aussi à la constitution d'une base de données destinée à l'entraînement d'un réseau de neurones. La logique floue constituerait ainsi une stratégie de transition, permettant de faire fonctionner la FC tout en préparant la mise en œuvre de contrôles plus intelligents et potentiellement plus performants, tels que le contrôle prédictif, les réseaux de neurones ou une combinaison de ces approches.

CONCLUSION

Ce mémoire s'inscrit dans une volonté de mieux comprendre le fonctionnement des contrôleurs propre aux différents espaces d'agriculture en environnement contrôlé (AEC). En effet, il existe différents espaces d'AEC : les serres et les enceintes de production végétale intérieures. Ces deux espaces présentent des caractéristiques différentes, notamment en termes d'échanges avec le milieu extérieur, ce qui nécessite des stratégies adaptées à chacun. L'objectif général de ce travail était donc d'étudier différents espaces afin de mettre en avant les avantages et les inconvénients de leur contrôle, dans le but de proposer la stratégie la plus adaptée possible afin de réduire leur consommation énergétique tout en améliorant ou maintenant les rendements de culture.

Pour répondre à cet objectif, ce mémoire a porté sur trois études de cas. La première, objet du chapitre 3, est l'étude d'un contrôle de la température et de l'humidité d'une serre maraîchère située à Magog, au Québec. L'objectif était de comprendre le fonctionnement d'un contrôle réel puis de mettre en avant les problématiques rencontrées dans la régulation de ce type d'espace. La deuxième étude, traitée dans le chapitre 4, a porté sur un système de stockage thermique installé dans une serre à Kuujuaq, au Nunavik, dans le but de réduire les amplitudes de température entre le jour et la nuit. Cependant le contrôle mis en place lors de la construction du lit de roches n'est pas optimal. L'objectif était donc ici de proposer une nouvelle stratégie de régulation et de l'implémenter sur place lors d'une campagne expérimentale. Enfin, la dernière étude de cas, objet du chapitre 5, a porté sur un espace actuellement en phase de conception avancée : la ferme conteneur (FC) de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS). Financé par le programme John Evans du Fonds canadien pour l'innovation, cet espace doit servir de plateforme expérimentale au Laboratoire Énergie et Efficacité Énergétique (L3e) pour étudier les performances agronomiques et énergétiques des FC, ainsi que pour tester des technologies innovantes de stockage thermique et de refroidissement, notamment plusieurs thermopompes et des panneaux radiatifs. L'objectif était de discuter de la stratégie de contrôle

proposée par la firme de génie-conseil mandatée à son élaboration et de proposer des pistes d'amélioration afin d'aboutir à un contrôle du système CVCA fonctionnel.

Pour réaliser la régulation de la serre maraîchère de Magog, une sonde de température et d'humidité ainsi qu'une station météo récoltent des données afin de contrôler une thermopompe, un serpentin électrique et un chauffage au mazout, ainsi qu'un ouvrant et un ventilateur à pression positive, à l'aide d'une régulation PID et tout ou rien. Un recueil de données réalisé entre avril 2025 et janvier 2026 a permis d'étudier ce contrôle sur plusieurs saisons. Cette étude a révélé des dépassements de température récurrents, allant jusqu'à 10°C au-dessus de la consigne en été, ainsi qu'une déshumidification inefficace la majorité de l'année, l'air de la serre restant saturé la nuit malgré des cycles de purge fréquents avec un débit proche de 0 g/m³ l'automne par exemple. L'hiver est un cas particulier. La température est maintenue proche de 0°C, pour pouvoir produire des légumes d'hiver et aucune mesure d'humidité n'est possible en raison des limitations de la sonde. Des cycles de purge sont tout de même déclenchés de manière forcée, mais sans réelle régulation. Cette étude saisonnière a permis de dégager plusieurs problématiques de contrôle. Premièrement, concernant l'instrumentation, l'absence de mesure d'humidité l'hiver complexifie le contrôle de ce paramètre pendant cette saison. Deuxièmement, du point de vue des équipements, lors de toutes les saisons sauf l'hiver, les serres sont chauffées la nuit et refroidies par l'ouverture des ouvrants la journée, ce qui permet de limiter les amplitudes de température mais entraîne une surconsommation. L'installation d'un système de stockage thermique pourrait être étudiée pour diminuer cette consommation. Enfin, concernant le contrôle, la déshumidification du système est inefficace, peu importe la saison. Ces constats ouvrent la voie à plusieurs études complémentaires, précisées dans les recommandations.

Le contrôle du lit de roche de la serre de Kuujuaq permet de réguler la température grâce à un contrôle tout ou rien à hystérésis, à partir d'une mesure de température au centre de l'espace de culture. Une étude énergétique de ce système de stockage, basée sur les travaux de Piché (2021) a permis de mettre en avant plusieurs problématiques. La principale est que la prise en compte de la température de la serre comme unique critère de fonctionnement n'est pas optimale. Cela entraîne des coefficients de performances faibles, c'est-à-dire inférieurs à 0,8

voire nuls, et un allumage des ventilateurs en continu en fin de saison. Ensuite, une autre problématique, découverte en discutant avec les utilisateurs de l'espace, est que les ventilateurs du système sont très souvent allumés et donc source de nuisances sonores. Pour y remédier, un nouveau contrôleur a été conçu en partenariat avec l'université de Pau. Il permet de prendre des mesures dans la serre et dans le lit de roche et d'actionner ses ventilateurs grâce à des relais. Il permet aussi un suivi et un contrôle à distance, depuis Montréal. Une stratégie de contrôle prenant en compte la température de la serre, mais aussi l'état du lit de roche est ensuite conçue et implémentée dans le contrôleur, afin de répondre à la première problématique soulevée. Ce contrôleur a ensuite été installé lors de campagnes de terrain menées en octobre 2025 et mai 2026. Ce travail a aussi permis de mettre en valeur plusieurs pistes de prolongations, précisées dans les recommandations.

La résolution du troisième sous-objectif a débuté par l'étude du contrôle proposé par la firme de génie-conseil ayant dimensionné le système CVCA de la ferme conteneur de l'ÉTS. Cette stratégie est basée sur des régulations PID et à hystérésis afin de contrôler l'unité de traitement d'air constituée de batteries froide et chaude et les températures des réservoirs de stockage thermique à l'aide d'une thermopompe eau-eau et d'une thermopompe air-eau. Des lacunes ont été mises en valeur, notamment l'absence de consignes sur la proportion d'air repris par rapport à l'air neuf circulant dans l'UTA ou de certaines conditions d'arrêt sur les thermopompes, basées uniquement sur la température d'un seul réservoir. Des améliorations ont été proposées pour aboutir à une stratégie implémentable dans la FC. Afin de mettre en place cette stratégie, des sondes de températures et d'humidité doivent être placées dans l'espace de culture et la sortie de l'UTA (point de soufflage). Deux thermocouples doivent aussi être placés dans les réservoirs chaud et froid. Un contrôleur basé sur des cartes Compact DAQ et le logiciel LabVIEW a ensuite été conçu pour récolter les données des capteurs, envoyer les consignes aux équipements et gérer le contrôle via une interface dédiée, aboutissant à une solution prête à être implémentée dans le système réel. Enfin, une méthodologie de mise en place d'un contrôle à logique floue pour réguler la température a été proposée, dans le but de réduire la consommation énergétique et d'améliorer le maintien des consignes. Cette étude pourra être prolongée avec la mise en place et le test du contrôle dans le système réel ainsi que

l'évaluation du contrôle à logique floue en conditions réelles. Le détail des prochains travaux est précisé dans les recommandations.

Les trois études de cas montrent que le contrôle des espaces d'agriculture en environnement contrôlé ne peut être réduit au simple maintien de consignes de température ou d'humidité. Il dépend fortement de la qualité de l'instrumentation, de la connaissance du comportement thermique de l'installation et des interactions entre les différents équipements. Alors que les régulations classiques restent adaptées aux systèmes les plus simples, les espaces fortement instrumentés, tels que les fermes conteneurs, ouvrent la voie à des stratégies de contrôle globales intégrant simultanément plusieurs variables afin d'améliorer les performances énergétiques et agronomiques. Les travaux réalisés dans ce mémoire constituent une première étape dans cette direction et fournissent les bases nécessaires au développement futur de contrôles plus avancés, notamment fondés sur la logique floue, le contrôle prédictif et les réseaux de neurones.

RECOMMANDATIONS

Les recommandations suivantes vont permettre de mettre en avant les prochaines pistes de recherche sur les trois sujets traités dans ce mémoire.

Recommandations sur l'étude des serres à Magog :

- Étudier le point de consigne idéal pour réguler l'humidité dans les serres (choisir entre l'humidité relative, le VPD, le déficit d'humidité...)
- Identifier une solution de mesure de l'humidité adaptée aux températures négatives afin de permettre la régulation de ce paramètre en période hivernale
- Étudier la déshumidification des serres et déterminer la bonne combinaison de temps de chauffage, puissance de chauffage, temps de ventilation, puissance du ventilateur à pression positive, pourcentage d'ouverture des ouvrants pour trouver le point de fonctionnement de déshumidification idéal, dans l'objectif d'améliorer la déshumidification des serres
- Étudier des solutions de stockage thermique permettant d'éviter les cycles de chauffage la nuit et de ventilation le jour, en tenant compte des contraintes d'espace disponibles ainsi que des craintes du maraîcher à adopter une solution encore peu répandue dans ce type d'exploitation.

Recommandations sur le contrôle du lit de roche de la serre de Kuujjuaq :

- Réaliser une étude énergétique pour conclure sur les apports de la stratégie de contrôle mise en place
- Améliorer la stratégie de contrôle pour limiter les périodes où les ventilateurs sont allumés quand la serre est utilisée. Il pourrait par exemple être envisagé de les éteindre entre 17 heures et 19 heures, quand les utilisateurs vont à la serre après le travail ou d'installer un bouton qui stoppe les ventilateurs pendant 1 heure à la demande quand il est pressé
- Ajouter des mesures de tensions pour avoir accès à l'état du toit ouvrant et du ventilateur de la serre en temps réel

- Ajouter deux pyranomètres, un dans la serre et un à l'extérieur afin de quantifier l'apport d'énergie solaire
- Ajouter une carte d'acquisition pour avoir des mesures de température extérieure, dans le sol, dans l'autre serre

Recommandations sur la mise en place du contrôle de la ferme conteneur :

- Créer un modèle numérique dynamique de la ferme conteneur pour pouvoir tester les deux stratégies de contrôle proposées
- Finaliser la réalisation de l'interface LabVIEW avec l'ajout du contrôle des bancs hydroponiques, des LED, de l'injecteur de CO₂
- Réaliser l'implémentation du système d'acquisition et de contrôle dans la ferme conteneur et tester son fonctionnement
- Après une saison, réaliser une étude énergétique. Comparer les performances énergétiques des deux contrôles.
- Étudier la réalisation d'un jumeau numérique avec un réseau de neurones pour tester de nouvelles stratégies de contrôle, avec l'utilisation de l'intelligence artificielle

ANNEXE I

INSTRUMENTATION COMPLÉMENTAIRE DE LA FERME CONTENEUR

En complément des capteurs nécessaires à la régulation du système CVCA (voir section 5.3.2), une instrumentation additionnelle est prévue à l'extérieur, dans l'espace de culture et dans le système CVCA, afin de permettre l'évaluation des performances énergétiques et de contrôler les équipements autres que le système CVCA. Le Tableau-A I-1 liste l'ensemble des mesures réalisées dans l'espace de culture et à l'extérieur.

Tableau-A I-1 Capteurs extérieurs et intérieurs avec leur précision et la précision recommandée installés dans la FC

	Capteur	Référence	Précision	Précision recommandée Coudret (2022)
Station météo	Température	HMS83 (Vaisala)	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
	Humidité	HMS83 (Vaisala)	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
	Rayonnement	SP-100-SS (apogee)	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$
	Vitesse du vent	Lambretch PRO-WEA	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
	Direction du vent	Lambretch PRO-WEA	$\pm 2^{\circ}$	$\pm 3^{\circ}$
Mesures climat intérieur	Rayonnement PAR	PAR Li-190-R-BI-5	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
	CO ₂	GMP252 (Vaisala)	$\pm 40\text{ ppm}$	$\pm 40\text{ ppm}$
	Température	Dwyer RHPX-2SSA0-00	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$
	Humidité relative		$\pm 2\%$	$\pm 5\%$

Après l'espace de culture et la station météo, c'est le système CVCA qui sera instrumenté. La Figure-A I-1 liste l'ensemble des mesures souhaitées.

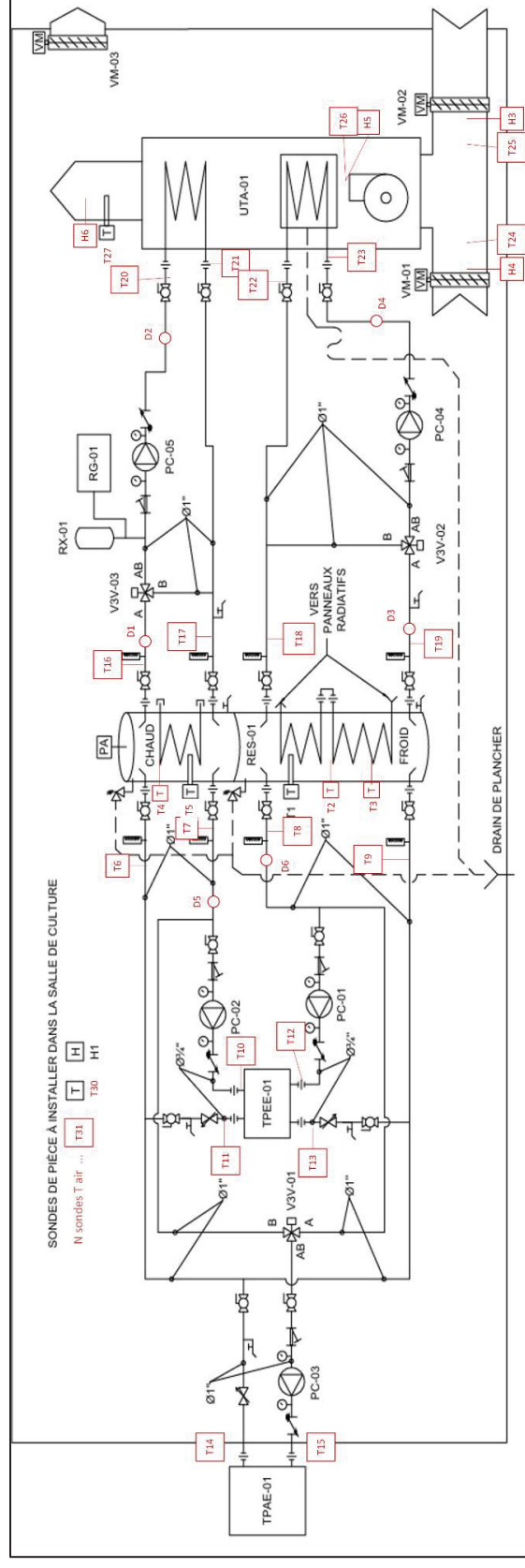


Figure-A I-1 Instrumentation du système CVCA de la FC

Le Tableau-A I-2 résume les types de capteurs et la nomenclature associée.

Tableau-A I-2 Listes des capteurs du système CVCA

Type de sonde	Nomenclature
Thermocouples	T1 à T23
Température et humidité	T24 à T28 H4 à H7
Débitmètres	D1 à D6

Tout d'abord, des thermocouples sont prévus à différentes hauteurs dans les réservoirs. Trois capteurs seront présents dans le réservoir froid (T1 à T3) et deux dans le chaud (T4 et T5). Ceci permettra de mieux appréhender les transferts thermiques au sein de la cuve et notamment de savoir si une stratification thermique prend place.

Des thermocouples (T6 à T23) sont aussi prévus à chaque entrée et sortie des ballons et des thermopompes. Ces mesures vont permettre d'étudier les pertes de chaleur dans la tuyauterie. Ensuite, des capteurs de température et d'humidité complémentaires sont prévus aux entrées d'air de l'UTA venant de la FC et de l'extérieur, ainsi qu'entre les serpentins d'air chaud et d'air froid (T24 à T26, T28 et H3, H4, H5, H7). Mesurer la température et l'humidité de l'air au niveau des entrées intérieures (T24 et H4) et extérieures (T25 et H3) de l'UTA permet de connaître les caractéristiques de ces airs entrants. Les sondes T26 et H5 permettent d'avoir les caractéristiques de l'air mélangé, provenant de ces deux entrées. Ces valeurs peuvent aussi être calculées à partir des mesures des capteurs T24, T25, H4 et H3 ; cette redondance offre un moyen de validation, ce qui augmente la fiabilité des mesures.

Enfin, des débitmètres sont prévus dans chaque circuit (D1 à D6). Ils vont permettre d'avoir les vitesses de fluides dans les différents tuyaux et donc de calculer les pertes de charge.

ANNEXE II

PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS INTERFACES RÉALISÉS SUR LABVIEW

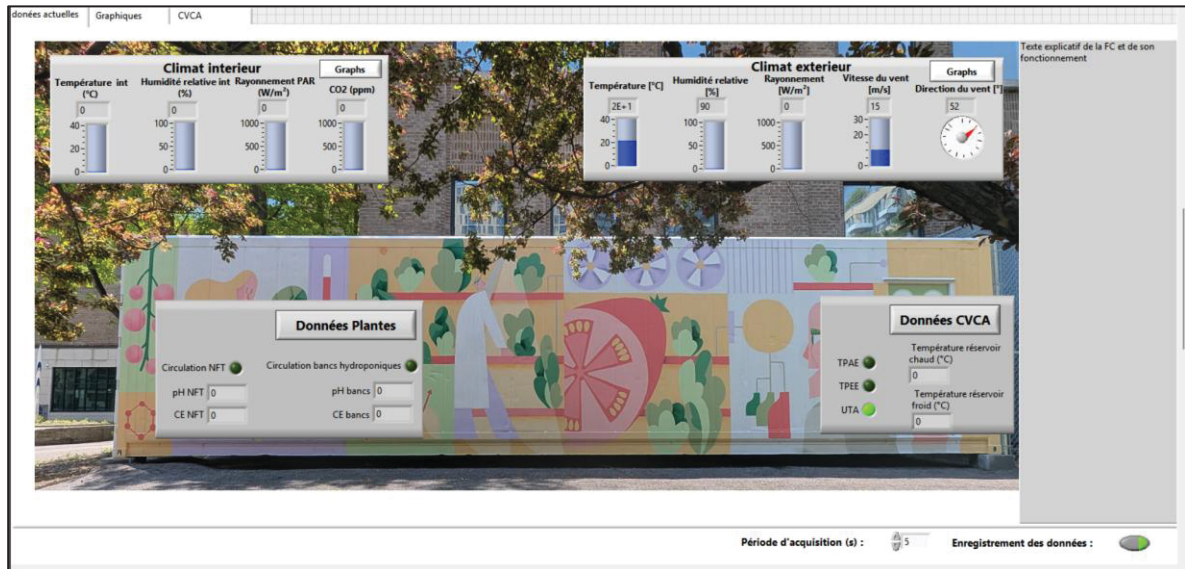


Figure-A II-1 Interface d'observation des données de la ferme conteneur sur LabVIEW

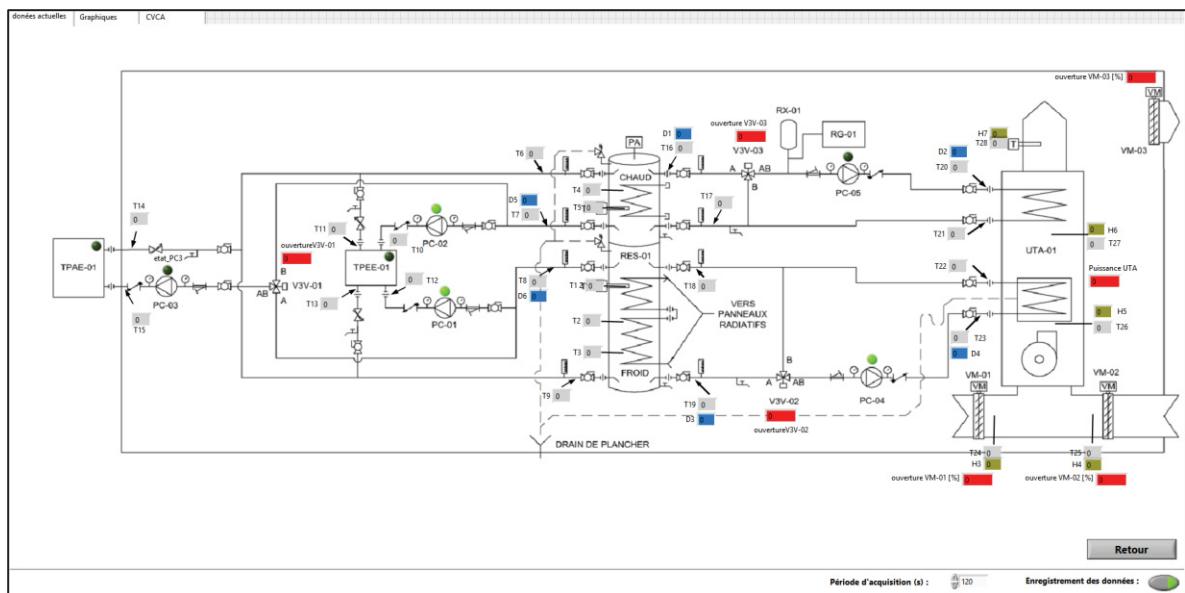


Figure-A II-2 Interface d'observation des données du système CVCA

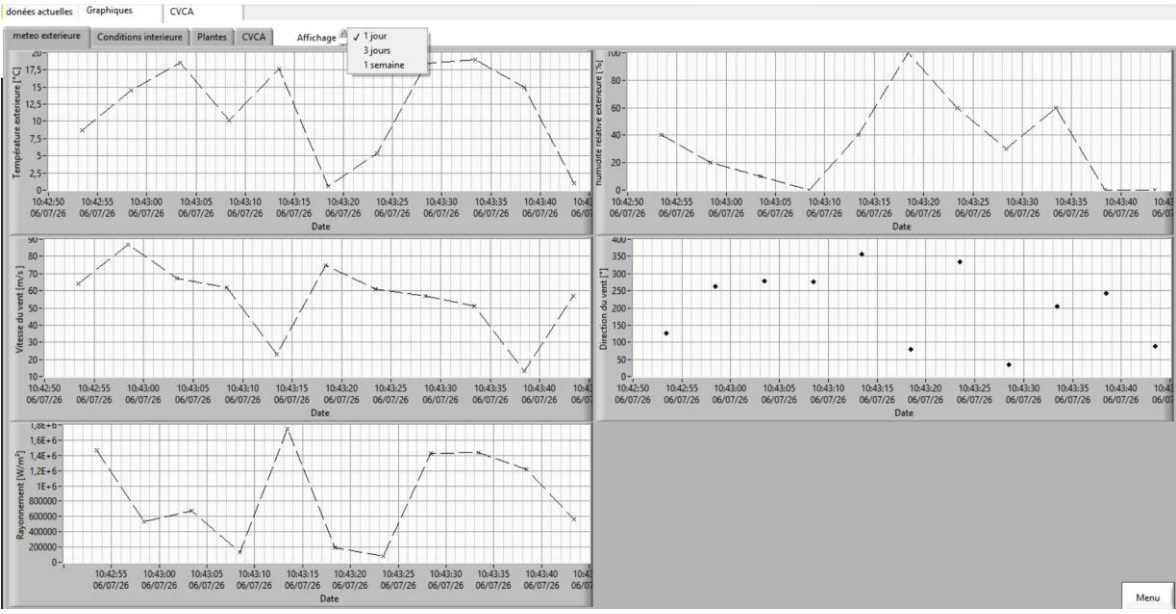


Figure-A II-3 Interface des graphiques sur LabVIEW

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, nertech, Dupret, M., & Bramkamp, U. (2025). Performance Pompes à chaleur : réalisation d'une campagne de mesure sur des pompes à chaleur en résidentiel individuel. Angers, France : Ademe.
- ASHRAE. (1992). *ASHRAE Psychrometric chart NO. 1 : Normal temperature, sea level, barometric pressure 101.325 kPa*.
- Attia, A.-H., Rezek, S. F., & Saleh, A. M. (2015). Fuzzy logic control of air-conditioning system in residential buildings. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 395-403. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.023>
- Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., & Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133753>
- Barendregt, T., Boonekamp, M., Caro, J., Crocker, G., Hesterman, B., Hogan, K., ... Schmidt, S. (2024). *2023 TECHNICAL ADVISORY COUNCIL CONTROLS & AUTOMATION WORKING GROUP MEMBERS*. Ressource Innovation Institute.
- Belman-Flores, J. M., Rodríguez-Valderrama, D. A., Ledesma, S., García-Pabón, J. J., Hernández, D., & Pardo-Cely, D. M. (2022). A Review on Applications of Fuzzy Logic Control for Refrigeration Systems. *Applied Sciences*, 12(3), 1302. <https://doi.org/10.3390/app12031302>
- Berger, C., & Brazeau, S. (2018). *FICHE # 1A : SYSTÈMES DE PRODUCTION DE CHALEUR EFFICACES (maintien d'une même source énergétique)*. Les Producteurs en serre du Québec.
- Biswal, S. R., Choudhury, T. R., Panda, B., & Mishra, S. (2025). An Improved IoT Based Hybrid Predictive Load Forecasting Model for a Greenhouse Integrated With Demand Side Management. *IEEE Access*, 13, 108446-108465. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3579435>
- Both, A. J., Benjamin, L., Franklin, J., Holroyd, G., Incoll, L. D., Lefsrud, M. G., & Pitkin, G. (2015). Guidelines for measuring and reporting environmental parameters for experiments in greenhouses. *Plant Methods*, 11(1), 43. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0083-5>

- Cai, Y., Zhao, Z., Guo, W., Xu, H., Teng, Y., Han, X., ... Wang, L. (2025). Smart Nutrient Solution Temperature Control System for Oversummering Lettuce Cultivation Based on Adaptive Dung Beetle Optimizer-Fuzzy PID. *Applied Sciences*, 15(10), 5381. <https://doi.org/10.3390/app15105381>
- Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management* (2eme édition). (S.l.) : CABI.
- Chaudhary, G., Kaur, S., Mehta, B., & Tewani, R. (2019). Observer based fuzzy and PID controlled smart greenhouse. *Journal of Statistics and Management Systems*, 22(2), 393-401. <https://doi.org/10.1080/09720510.2019.1582880>
- Chen, S., Liu, A., Tang, F., Hou, P., Lu, Y., & Yuan, P. (2025). A Review of Environmental Control Strategies and Models for Modern Agricultural Greenhouses. *Sensors*, 25(5), 1388. <https://doi.org/10.3390/s25051388>
- Chojceki, A., Ambroziak, A., & Borkowski, P. (2023). Fuzzy Controllers Instead of Classical PIDs in HVAC Equipment: Dusting Off a Well-Known Technology and Today's Implementation for Better Energy Efficiency and User Comfort. *Energies*, 16(7), 2967. <https://doi.org/10.3390/en16072967>
- Conseil des académies canadiennes. (2024). *Mise en place : Le comité d'experts sur les technologies de production atypiques au service de la sécurité alimentaire du Canada*. Ottawa, Canada : Conseil des académies canadiennes. <https://doi.org/10.60870/01SV-Y869>
- Corechem. (s.d.). Ethylene Glycol Heat Transfer Fluid Freeze Point Chart.
- Coudret, S. (2022). *Mise en place d'une campagne de mesurage dans des espaces d'Agriculture en Environnement Contrôlé*.
- Daniels, A., Fink, M., & Wollherr, D. (2024). Hierarchical Model-Based Irrigation Control for Vertical Farms. *IFAC-PapersOnLine*, 58(7), 472-477. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.107>
- Deram, P., Lefsrud, M. G., & Orsat, V. (2014). Supplemental Lighting Orientation and Red-to-blue Ratio of Light-emitting Diodes for Greenhouse Tomato Production. *HortScience*, 49(4), 448-452. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.4.448>
- Ding, J.-T., Tu, H.-Y., Zang, Z.-L., Huang, M., & Zhou, S.-J. (2018). Precise control and prediction of the greenhouse growth environment of *Dendrobium candidum*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 453-459. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.037>

- Dos Santos, P. (2026). *Organisation fonctionnelle de bancs hydroponiques, de l'éclairage, de l'enrichissement en CO₂ et de la ventilation en Ferme Conteneur* (Rapport de projet, École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada).
- Dudnyk, A., Pasichnyk, N., Yakymenko, I., Lendiel, T., Witaszek, K., Durczak, K., & Czekala, W. (2025). Smart Resource Management and Energy-Efficient Regimes for Greenhouse Vegetable Production. *Energies*, 18(17), 4690. <https://doi.org/10.3390/en18174690>
- Erekath, S., Seidlitz, H., Schreiner, M., & Dreyer, C. (2024). Food for future: Exploring cutting-edge technology and practices in vertical farm. *Sustainable Cities and Society*, 106, 105357. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105357>
- ferme d'hiver. (s.d.). *Première unité industrielle située à Vaudreuil*. Repéré à <https://www.fermedhiver.com/site-vaudreuil/>
- Geelen, P. A. M., Voogt, J. O., & van Weel, P. A. (2021). *Plant Empowerment, The basic principles* (3e ed.). Netherlands : Edward Hardy MEng, Energy Projects Engineer at FEC Energy.
- Gong, L., Yu, M., & Kollias, S. (2023). Optimizing Crop Yield and Reducing Energy Consumption in Greenhouse Control Using PSO-MPC Algorithm. *Algorithms*, 16(5), 243. <https://doi.org/10.3390/a16050243>
- Hamza, A., & Ramdani, M. (2020). Non-PDC Interval Type-2 Fuzzy Model Predictive Microclimate Control of a Greenhouse. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 31(1), 62-72. <https://doi.org/10.1007/s40313-019-00532-4>
- hatice. (2022). *pexels-hatice-159587543-12241309*. Repéré à <https://www.pexels.com/fr-fr/photo/nature-interieur-a-l-interieur-net-12241309/>
- Hydro Quebec. (2026). Option d'électricité additionnelle pour l'éclairage de photosynthèse ou le chauffage des espaces destinés à la culture de végétaux. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/residentiel/espace-clients/tarifs/option-electricite-additionnelle-vegetaux.html>
- Hydro Solar. (2024). THERMOPOMPES AIR-EAU AVEC DC INVERTER ET TECHNOLOGIE EVI. CONFIGURATION MONOBLOCK 3IÈME GÉNÉRATION RÉFRIGÉRANT R32.
- Johnson, C. D. (2013). *Process Control Instrumentation Technology* (8th Edition). Harlow : Pearson.

- Klashanov, F., & Swan, A. (2020). Application of fuzzy logic methods for controlling buildings HVAC equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869(2), 022010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/2/022010>
- Lan, H., Hou, H. (Cynthia), Gou, Z., Wong, M. S., & Wang, Z. (2023). Computer vision-based smart HVAC control system for university classroom in a subtropical climate. *Building and Environment*, 242, 110592. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110592>
- Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. I. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20(2), 404-418. <https://doi.org/10.1109/21.52551>
- Lufa Farms. (2011). *Lufa Farms Bok Choy in NFT System*. Repéré à https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lufa_Farms_Bok_Choy_in_NFT_System.jpg
- Nour, M. I. H., Ooi, J., & Chan, K. Y. (2007). Fuzzy logic control vs. conventional PID control of an inverted pendulum robot. Dans *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems* (pp. 209-214). Kuala Lumpur : IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2007.4658376>
- Pelletier, F., & Godbout, S. (2017). Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre en production serricole au Québec.
- Piché, P. (2021). *Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire*. (Thèse, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France).
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., & MacCleery, B. (2015). *Greenhouse Design and Control* (8e ed.). London, UK : 2015 Taylor and Francis Group.
- Régie de l'énergie du Canada. (2021). Production d'électricité selon le type de combustible.
- Riahi, J., Nasri, H., Mami, A., & Vergura, S. (2024). Effectiveness of the Fuzzy Logic Control to Manage the Microclimate Inside a Smart Insulated Greenhouse. *Smart Cities*, 7(3), 1304-1329. <https://doi.org/10.3390/smartcities7030055>
- Rizwan, A., Khan, A. N., Ahmad, R., & Kim, D. H. (2023). Optimal Environment Control Mechanism Based on OCF Connectivity for Efficient Energy Consumption in Greenhouse. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(6), 5035-5049. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3222086>
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. L., & Ramírez-Arias, A. (2015). *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*. Cham : Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11134-6>

- Sager, J. C., & McFarlane, J. C. (1997). Chapter 1 : Radiation. Dans Langhans, R. W. & Tibbitts, T. W. (Éd.), *Plant growth chamber handbook*. (S.l.) : Iowa State University.
- Sananbio. (s.d.). Sananbio Radix brochure.
- Schimelpfenig, G. (2022a). *Best practices guide, HVAC : for Controlled Environment Agriculture (CEA) Operations*. Ressource Innovation Institute.
- Schimelpfenig, G. (2022b). *Best Practices Guide: Lighting for Controlled Environment Agriculture (CEA) Operations*. Ressource Innovation Institute.
- Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1), 21-38.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.018>
- Turhan, C., Simani, S., & Gokcen Akkurt, G. (2021). Development of a personalized thermal comfort driven controller for HVAC systems. *Energy*, 237, 121568.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121568>
- Xi, L., Zhang, M., Zhang, L., Lew, T. T. S., & Lam, Y. M. (2022). Novel Materials for Urban Farming. *Advanced Materials*, 34(25), 2105009.
<https://doi.org/10.1002/adma.202105009>