



HAL
open science

Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire.

Paul Piché

► **To cite this version:**

Paul Piché. Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire.. Physique [physics]. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2021. Français. NNT : 2021PAUU3013 . tel-03368948

HAL Id: tel-03368948

<https://theses.hal.science/tel-03368948>

Submitted on 7 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR

École doctorale des sciences exactes et leurs applications (ED211)

Soutenue le 27 Mai 2021

Présentée par

Paul PICHÉ

pour obtenir le grade de docteur
de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour

Spécialité : Énergétique

Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire

MEMBRES DU JURY

RAPPORTEURS

- Danielle MONFET
- Laurent ZALEWSKI

Professeure / École de technologie supérieure, Montréal
Professeur des Universités / Université d'Artois

EXAMINATEURS

- Diane BASTIEN
- Jean-Pierre BEDECARRATS

Professeure / Université du Danemark du Sud
Professeur des Universités / Université de Pau et des Pays de l'Adour

DIRECTEURS

- Stéphane GIBOUT
- Didier HAILLOT

Maître de Conférences - HDR / Université de Pau et des Pays de l'Adour
Professeur agrégé / École de technologie supérieure, Montréal



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres de mon jury de thèse. Merci à Danielle Monfet et Laurent Zalewsky d'avoir accepté de lire et d'évaluer mes travaux de thèse malgré le « délai de livraison » de ce manuscrit. Un second merci à Laurent Zalewsky pour avoir accepté de présider ce jury. Merci à Diane Bastien d'avoir assisté à ma soutenance en tant qu'examinatrice. Et enfin, merci beaucoup à Jean-Pierre Bédécarrats de m'avoir accueilli au sein du LaTEP et d'avoir pris part à ce jury de thèse.

Ensuite, je souhaite sincèrement remercier mes deux directeurs de thèse, Stéphane Gibout et Didier Haillot. Je reste convaincu que je ne serais pas allé au bout de ce travail sans votre écoute, votre soutien dans les moments de doute et votre bienveillance. Merci d'avoir été et d'être encore à mes côtés. Cette rencontre a été précieuse et va au-delà de l'aspect professionnel.

Merci à l'OHMi Nunavik d'avoir financé les voyages et le matériel pour l'instrumentation.

Merci à Charlotte « BBB » sans qui ce travail n'aurait jamais commencé.

Merci à l'ensemble des membres du LaTEP et de l'ENSGTI pour toutes les discussions devant un café ou au détour d'un couloir.

Merci beaucoup à Cédric Arrabie pour ces conseils précieux sur l'instrumentation et les visios quotidiennes quand j'étais sur le terrain pour m'aider à résoudre les multiples problèmes de d'instrumentation.

Merci à Véronique Gilbert pour son soutien sur le terrain et pour son aide précieuse lors du chantier du système de stockage.

Un immense merci à Marc-André Lamontagne, qui met une énergie incroyable dans les serres communautaires de Kuuujuaq, de manière bénévole et passionnée. Le soutien logistique et moral que tu m'as apporté est inestimable, et les terrains auraient pris une autre tournure sans toi.

Merci à ma thérapeute, Maeva Abadie pour le travail formidable que l'on a mené ensemble.

Merci à toutes les personnes du « Piano sans nuit », qui a été mon lieu privilégié de décompression durant ces années.

Merci à l'ensemble de mes collègues doctorants pour tout ces moments passés ensemble, en journée ou en soirée. Ces amitiés ont été précieuses tout au long de ma thèse.

En particulier, merci Marion et Marie. Merci Marion pour ton sourire ineffaçable, pour ta joie et ta bonne humeur constante, merci pour la grimpe, pour les randos et tout ce qu'on a pu faire ensemble. Merci Marie pour ta présence inépuisable à mes côtés, pour ces discussions passionnées et parfois clivantes mais toujours enrichissantes, pour ton soutien constant même quand tu étais submergée de boulot. Vous m'avez toutes les deux apporté bien plus que vous ne le pensez. Malgré la difficulté que ça a pu être, merci d'être mes amies.

Résumé

Au sein de communautés nordiques isolées, la serriculture apparaît comme une solution permettant d'améliorer l'accès aux légumes frais en réduisant les coûts écologique et financier liés au transport de ces légumes. Cependant, la littérature scientifique portant sur l'étude physique des serres nordiques et les données énergétiques (température, consommation d'électricité, etc.) sur le sujet sont rares. La première partie de ce travail de thèse s'est donc attachée à recenser les serres nordiques existantes en Amérique du Nord, et a montré que le sujet est relativement récent. Par ailleurs, cette revue de littérature a révélé que la majorité des serres dénombrées n'est pas adaptée au climat froid, conduisant à des saisons de culture courtes.

La deuxième partie de ce travail s'est focalisée sur l'aspect expérimental. Les données issues d'une campagne d'instrumentation d'une serre nordique ont été analysées afin de démontrer la pertinence de l'installation d'un système de stockage thermique journalier. Le dimensionnement et la construction de ce dernier, utilisant l'air comme fluide caloporteur et des roches locales en tant que matériau de stockage, sont également présentés. L'instrumentation du lit de roches stockant la chaleur a permis l'étude des données énergétiques durant les phases de charge et de décharge du stock. Cette analyse a démontré l'impact positif de l'installation du système de stockage sur le comportement thermique de la serre.

La dernière partie de ce travail est orientée vers la modélisation du comportement thermique de la serre et du système de stockage. En effet, la simulation numérique du climat sous serre est essentielle afin de comprendre les mécanismes d'amélioration des serres existantes et/ou d'optimiser la conception des enceintes de production végétale en milieu nordique. Ainsi, un modèle nodal de la serre et un modèle du système de stockage sont détaillés et validés. Un processus de calibration portant sur les valeurs numériques des paramètres des modèles est également développé afin d'en améliorer les performances.

Mots clés : *serre nordique, stockage de la chaleur, lit de roches, expérimental, modélisation numérique*

Abstract

Among isolated northern communities, culture in greenhouses appears as a solution allowing to improve access to fresh vegetables by reducing the ecological and financial costs linked to the transportation of these. However, the scientific literature on the physical study of northern greenhouses and energetic data (temperature, electricity consumption, etc.) is scarce. The first part of this thesis has to do with the pinpointing of northern greenhouses existing in North America and shows that this subject is relatively recent. On the other hand, this literature review revealed that the majority of counted greenhouses is not adapted to a cold climate, hence short growing seasons.

The second part of this work focuses on the experimental aspect. Data coming from an instrumentation campaign in a northern greenhouse were analysed to demonstrate the relevance of the establishment of a daily thermal energy storage (TES) system. The dimensioning and construction of this system using air as a coolant fluid and local rocks as storage material are also presented. The instrumentation of the rockbed which stores heat has allowed to study energetical data during charge and discharge phases of the stock. This analysis demonstrated the positive impact of the set up of the TES system on the thermal behavior of the greenhouse.

The last part of this work concerns the modeling of the thermal behavior of the greenhouse and the TES system. As a matter of fact, the numerical simulation of the climate in a greenhouse is basic in order to understand the improvement mechanisms of existing greenhouses and/or to optimize the conceiving of enclosures for vegetable production in a northern environment. Indeed, a nodal model of the greenhouse and an independent model of the TES system are detailed and validated. A process of calibration about the numerical values of the models' parameters is also developed to improve the performances of these models.

Keywords : *northern greenhouse, thermal energy storage, rockbed, experimental, numerical model*

Table des matières

Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xii
Liste des symboles	xiii
Introduction	1
I Les serres et le Nord	5
1 Les serres	7
1.1 Intérêt d'utilisation et fonctionnement	8
1.2 Les différents types de serre	9
1.3 Évaluation des paramètres climatiques optimaux dans les serres	13
2 Les serres en Amérique du Nord	15
2.1 Contexte	16
2.2 Les serres nordiques existantes	17
2.3 Discussion	35
Conclusion et objectifs de la thèse	40
II Approche expérimentale : la serre de Kuujjuaq	43
3 Étude initiale de la serre	45
3.1 Présentation de Kuujjuaq et de ses serres	46
3.2 Instrumentation	48
3.3 Analyse des données	51
4 Conception d'un système de stockage thermique	59
4.1 Étude bibliographique	60
4.2 Conception et dimensionnement	66
4.3 Construction et mise en fonctionnement	70

5	Étude de la serre avec le système de stockage	77
5.1	Instrumentation	78
5.2	Analyse des données	81
5.3	Discussion	94
	Conclusion	97
III	Approche numérique	99
6	La modélisation de serre	101
6.1	Les différents types de modèle	102
6.2	Principes et équations du modèle	105
6.3	Explicitation des flux	114
6.4	Développement numérique	119
7	Calibration du modèle de serre	125
7.1	Les indicateurs statistiques	127
7.2	Méthode de calibration	130
7.3	Mise en œuvre et résultats	135
8	La modélisation du système de stockage	141
8.1	Principes et équations du modèle	142
8.2	Calibration et résultats	145
	Conclusion	154
	Conclusion générale et perspectives	157
	Bibliographie	161

Liste des figures

1	Territoire du Nunavik	2
1.1	Serre multi-chapelles	10
1.2	Les principales géométries de serre	11
1.3	Serres géodésiques	12
1.4	Principe d'une serre chinoise	12
2.1	Carte des différentes serres nordiques recensées	17
2.2	Vue extérieure des serres de Kuujjuaq	18
2.3	Vue intérieure d'une des serres de Kuujjuaq	18
2.4	Vue extérieure de la serre d'Iqaluit	18
2.5	Vue intérieure de la serre d'Iqaluit	18
2.6	Vue extérieure de la serre d'Inuvik	20
2.7	Vue intérieure de la serre d'Inuvik	20
2.8	Vue extérieure de la serre de FAFN	21
2.9	Vue extérieure de la serre d'Invermere	22
2.10	Vue extérieure de la serre de Naujaat	23
2.11	Vue extérieure de la serre Chena Fresh	24
2.12	Vue intérieure de la serre Chena Fresh	24
2.13	Vue extérieure de la serre de Kasaan	25
2.14	Schéma simplifié du fonctionnement de l'aquaponie	26
2.15	Vue extérieure de la TSNPN	26
2.16	Vue extérieure de Keewatin Gardens	27
2.17	Vue extérieure de Green Igloos Farm	27
2.18	Vue extérieure de la serre d'Elie	28
2.19	Structure de la serre d'Elie	28
2.20	Comparaison des températures du 20 Mars 2005 entre la serre conventionnelle et la serre chinoise	29
2.21	Températures à une profondeur de 2 cm pour les surfaces peintes et non-peintes du mur nord	29
2.22	Vue extérieure de la ACMG	30
2.23	Vue extérieure d'une serre de Solar Growing	31
2.24	Schéma de la CING	32

2.25	Transformation de la CING de serre (haut) en chambre de culture (bas)	32
2.26	Système hydroponique (NFT) pivotant	33
2.27	Intégration de DEL sur le système hydroponique	33
2.28	Nombre cumulé du nombre de serres en fonction de l'année de construction	35
2.29	Les différentes durées de saison de culture	38
3.1	Localisation de Kuujjuaq	46
3.2	Vue extérieure des serres de Kuujjuaq	47
3.3	Vue aérienne des serres de Kuujjuaq	47
3.4	Vue intérieure d'une des serres de Kuujjuaq	48
3.5	Pyranomètre CMP3	49
3.6	Enregistreur de température et d'humidité DL-121TH	49
3.7	Position des différents capteurs	50
3.8	Vue de dessus des capteurs	50
3.9	Abris des enregistreur de température et d'humidité DL-121TH	51
3.10	Ensoleillement et températures extérieures mensuelles de Kuujjuaq et De Bilt	52
3.11	Températures journalières moyennes, minimales et maximales à Kuujjuaq en 2017	53
3.12	Écart de température horizontal et vertical à l'intérieur de la serre durant la saison de culture 2016	54
3.13	Températures journalières minimales et maximales à l'intérieur de la serre et ensoleillement journalier extérieur en 2017	55
3.14	Température à l'intérieur de la serre entre le 11 mai et le 12 mai 2017	56
4.1	Système de stockage installé à Alger en 1996	61
4.2	Système de stockage mis en place à Agadir en 2019	62
4.3	Vue de face (a) et vue de côté (b) du système de stockage mis en place à Antalya en 2003	62
4.4	Système de stockage mis en place à Agadir en 2018	64
4.5	Photo d'un pan de gabion installé dans la serre de Kuujjuaq	67
4.6	Schéma de fonctionnement du lit de roches	67
4.8	Les différentes étapes de construction du système de stockage de la chaleur	71
4.9	Tamis utilisé pour filtrer les roches	72
4.10	Perçage d'un tuyau en PVC	72
4.13	Positionnement des tuyaux	73
4.14	Positionnement des Pt100	73

4.15	Seuils de température de déclenchement des ventilateurs et d'ouverture du toit	74
5.1	Schéma de l'architecture du système d'instrumentation	79
5.2	Carte électronique du système d'acquisition	79
5.3	Boîtier étanche regroupant l'Arduino local et le RPI	80
5.4	Boîtier étanche de l'Arduino distant	80
5.5	Comparaison du comportement thermique de la nouvelle serre avant et après l'installation du système de stockage	82
5.6	Température minimale journalière à l'intérieur et à l'extérieur de la serre durant la saison de culture 2017	83
5.7	Température minimale journalière à l'intérieur et à l'extérieur de la serre durant la saison de culture 2019	84
5.8	Différence entre les températures minimales journalières extérieure et intérieure durant les saisons de culture 2017 et 2019	84
5.9	Analyse du comportement thermique du système de stockage	86
5.10	Diagramme solaire polaire de Kuujuaq	87
5.11	Position des sondes de température dans le lit de roches	87
6.1	Exemple de maillage d'une serre multi-chapelles	104
6.2	Exemple de champ d'humidité absolue simulé par un modèle CFD à différents moments de la journée	104
6.3	Schéma des échanges thermiques et massiques au sein d'une serre . . .	107
6.4	Face nord-est de la serre	108
6.5	Schéma du modèle de rayonnement solaire (CLO)	109
6.6	Schéma du modèle de conduction du sol	111
6.7	Une partie de la représentation graphique du modèle de serre	120
6.8	Comparaison des comportements réel et numérique de l'ouverture du toit	121
6.9	Résultats de la simulation de la température intérieure de la serre avant le processus de calibration	122
7.1	Schéma résumant le processus de calibration	132
7.2	Détermination de la valeur optimale du paramètre $T_{sol(pro)}$	135
7.3	Évolution du RMSE au cours des deux premières itérations de l'étape 3 (la première à gauche, la deuxième à droite) pour deux ordres différents de paramètres	136
7.4	Valeurs minimales et maximales de f_{venti} , tout ordre confondu	138
7.5	Résultats de la simulation de la température intérieure de la serre avant et après le processus de calibration	139
8.1	Maillage d'un lit de roches	144

8.2	Schéma du modèle de lit de roches	144
8.3	Résultats de la simulation du comportement thermique du système de stockage (minimisation de $RMSE_{T_{sor}}$)	151
8.4	Résultats de la simulation du comportement thermique du système de stockage (minimisation de $RMSE_{Moy}$)	153

Liste des tableaux

2.1	Les différentes serres nordiques et leurs principales caractéristiques . . .	36
3.1	Caractéristiques des capteurs utilisés lors de l'étude initiale	49
4.1	Caractéristiques principales des systèmes de stockage de la chaleur air/roches disponibles dans la littérature	63
5.2	Caractéristiques du débit d'air	89
5.3	Données énergétiques des charges et décharges journalières	91
5.4	Données énergétiques des charges et décharges durant la saison de culture 2019	93
7.1	Paramètres fixes du modèle de la serre	133
7.2	Paramètres du modèle de la serre soumis au processus de calibration .	134
7.3	Résultats du processus de calibration du modèle de la serre	137
8.1	Paramètres fixes du modèle de stockage	148
8.2	Paramètres du modèle de stockage soumis au processus de calibration	148
8.3	Résultats du processus de calibration du système de stockage minimisant $RMSE_{T_{ser}}$	150
8.4	Résultats du processus de calibration du système de stockage minimisant $RMSE_{Moy}$	152

Liste des symboles

Abréviations

AK	Alaska
APR	Appel à Projet de Recherche
ARK	Administration Régionale Kativik
BC	Colombie Britannique
CFD	Computational Fluid Dynamics
DRIIHM	Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieus
MB	Manitoba
NFT	Nutrient Film Technique (technique d'hydroponie)
NT	Territoires du Nord-Ouest
NU	Nunavut
OHMi	Observatoire Hommes-Milieus international
ON	Ontario
QC	Québec
RMSE	Root Mean Square Error
RPI	Raspberry Pi
VN	Village Nordique
YT	Yukon

Symboles latins

A	Surface	m^2
a	Coefficient d'absorption	-

LISTE DES SYMBOLES

Bi	Nombre de Biot	-
c_p	Capacité thermique massique	$J K^{-1} kg^{-1}$
COP	Coefficient de performance	-
D	Diamètre	m
E	Flux de vapeur d'eau	$kg s^{-1}$
F	Facteur de forme	-
g	Accélération de la pesanteur terrestre	$m s^{-2}$
G^*	Irradiance solaire globale sur le plan horizontal	$W m^{-2}$
H	Coefficient d'échange convectif	$W m^{-2} K^{-1}$
h	Hauteur	m
K	Coefficient d'extinction	-
L	Longueur	m
l	Largeur	m
LAI	Leaf Area Index	$m^2 m^{-2}$
M	Masse molaire	$kg mol^{-1}$
m	Masse	kg
Nu	Nombre de Nusselt	-
P_{H_2O}	Pression partielle de vapeur d'eau	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	-
Q	Énergie	J
\dot{Q}	Puissance	W
q_v	Débit volumique	$m^3 s^{-1}$
R	Constante universelle des gaz parfaits	$J mol^{-1} K^{-1}$
r	Coefficient de réflexion	-
Re	Nombre de Reynold	-
T	Température	$^{\circ}C$
t	Temps	s
V	Volume	m^3

v	Vitesse	m s^{-1}
-----	---------	-------------------

Symboles grecs

γ	Constante psychrométrique	Pa K^{-1}
ΔH	Enthalpie de vaporisation de l'eau	J kg^{-1}
$\Delta\varphi$	Différence d'humidité relative	%
ΔP	Pertes de charge	Pa
ΔT	Différence de température	$^{\circ}\text{C}$
Δt	Pas de temps de simulation	s
ε	Émissivité	-
ε_{lit}	Porosité (ou fraction de vide) d'un lit de roche	-
η_r	Coefficient de récupération de la chaleur	-
η_s	Coefficient de stockage	-
Λ	Coefficient de pertes de charge linéaires	-
λ	Conductivité thermique	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	Pa s
ν	Viscosité cinématique	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ξ	Coefficient de pertes de charge singulières	-
ρ	Masse volumique	kg m^{-3}
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
τ	Coefficient de transmission	-
φ	Humidité relative	%

Exposants

<i>abs</i>	Absolu
<i>CLO</i>	Courte longueur d'onde (bande spectrale 0,3–3 μm)
<i>GLO</i>	Grande longueur d'onde (bande spectrale 3–15 μm)
<i>lat</i>	Latent
<i>mes</i>	Mesuré

opt Optimal

sim Simulé

Indice

air Air intérieur d'une serre

c Charge

can Canopée

d Décharge

elec Électrique

ent Entrée d'un lit de roche

env Enveloppe

ext Extérieur

f Final

feu Feuille

fui Fuite

i Initial

int Intérieur de la serre

lit Lit de roches

max Maximum

min Minimum

roc Roches

ser Serre

sol Sol

sor Sortie d'un lit de roche

tuy Tuyau

vent Vent

venti Ventilation

Introduction

Le laboratoire d'excellence « Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieus » (LabEx DRIIHM) a été mis en place en 2012 et renouvelé pour cinq ans en décembre 2019 [1]. Son objectif est de soutenir le développement des Observatoires Hommes-Milieus (OHM), qui forment un dispositif de recherche créé par le centre national de la recherche scientifique (CNRS) en 2007 et qui dépendent actuellement de l'Institut écologie et environnement (INEE) du CNRS.

Ces OHM ont pour mission de travailler sur des systèmes socio-écologiques affectés par « un événement fondateur », i.e. une perturbation majeure d'origine humaine [2] (e.g. la fermeture d'une mine [3], la construction d'une route désenclavant un territoire [4], etc.). Les OHM vont alors étudier de manière pluridisciplinaire (sciences économiques et sociales, sciences de la géosphère et de la biosphère) les réactions de l'Homme et de son environnement face à cet événement fondateur.

Parmi les 13 OHM, il existe un OHM international (OHMi) s'intéressant au Nunavik qui est la région québécoise située au-dessus du 55^e parallèle nord (cf. Figure 1). Environ 13 000 personnes habitent sur ce territoire, dont près de 90 % sont des Inuits [5].

L'événement fondateur de l'OHMi Nunavik est constitué par la création de la Société du Plan Nord en 2015 qui est chargée de mettre en application le Plan Nord, un programme proposé par le gouvernement du Québec en 2011 visant au développement socio-économique des régions nordiques québécoises dans le cadre des impacts cumulatifs du changement global (climatique, économique, social) [7]. L'OHMi Nunavik étudie différents aspects de ces changements [2] (e.g. l'acceptabilité sociale de l'ouverture de mine, la dynamique de la végétalisation, la dynamique de pentes rocheuses, etc.) à travers des appels à proposition de recherche (APR) financées par le LabEx DRIIHM.

En particulier, l'OHMi Nunavik s'intéresse aux problématiques d'alimentation à travers deux APR renouvelés à plusieurs reprises : l'APR Niqiliriniq (« s'occuper de la nourriture » en inuktitut, une des langues inuites) dont les objectifs sont d'améliorer la souveraineté alimentaire en s'intéressant aux habitudes alimentaires des populations locales, et en sensibilisant les habitants du Nunavik à la culture de plantes autochtones notamment en serre [5]. Le second APR, Siqiniq (« soleil » en inuktitut), étudie l'as-



FIGURE 1 – Territoire du Nunavik, Québec, Canada [6]

pect énergétique de ces serres afin d'améliorer les conditions climatiques de culture en minimisant la consommation d'énergies fossiles. Le laboratoire de thermique, énergétique et procédés (LaTEP) de Pau a été associé au projet Siqiniq dans la mesure où l'optimisation énergétique est un des axes de recherche de ce laboratoire. C'est au sein du LaTEP et dans le cadre du projet Siqiniq que s'inscrit cette thèse de doctorat dont les déplacements et le matériel d'instrumentation ont été financés chaque année par cet APR.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier les serres nordiques d'un point de vue énergétique afin d'identifier les pistes possibles d'amélioration du climat intérieur. Pour cela, la première partie de ce travail s'est attachée à recenser les serres nordiques existantes au travers d'une étude bibliographique. Le but de cette revue de littérature est de caractériser ces serres, notamment de manière énergétique, afin de déterminer les adaptations existantes ou envisageables face au climat polaire. A la suite de cette étude, deux axes ont été considérés : l'amélioration thermique de serres existantes et l'optimisation de la conception de serres futures. La seconde partie de ce manuscrit se focalise sur le premier axe, qui est exploré à l'aide de l'aspect expérimental. Ce dernier consiste à instrumenter une serre nordique, analyser les données recueillies et concevoir, construire et évaluer un système de stockage de la chaleur dans le but d'améliorer le comportement thermique de la serre. La troisième partie de cette recherche s'est focali-

sée sur la modélisation de la serre étudiée et du système de stockage thermique proposé. Ce travail numérique permettra ultérieurement d'optimiser les serres nordiques à travers les deux axes soulevés : soit en modifiant des serres existantes soit en améliorant leur conception en amont.

Première partie

Les serres et le Nord

Chapitre 1

Les serres

Sommaire

1.1	Intérêt d'utilisation et fonctionnement	8
1.2	Les différents types de serre	9
1.2.1	Les géométries	9
1.2.2	Les matériaux d'enveloppe	11
1.3	Évaluation des paramètres climatiques optimaux dans les serres	13

1.1 Intérêt d'utilisation et fonctionnement

Les serres sont des constructions utilisées pour créer un climat plus favorable que le climat extérieur pour la production végétale (légumes, fruits ou fleurs) [8]. Elles sont apparues à la Renaissance (entre le 16^e et le 17^e siècle) et se sont considérablement développées au cours du 20^e siècle [9]. En 2010, la surface estimée de serres dans le monde était de $1,905 \times 10^6$ ha (19 050 km², environ 3 % de la superficie de la France) dont plus de 85 % était située en Asie [10].

Les serres modifient l'environnement naturel afin de remplir divers objectifs : optimiser la productivité des cultures, améliorer la qualité des produits récoltés, étendre la période de production ou agrandir la surface de culture [9]. D'une part les serres protègent les cultures de plusieurs facteurs : le vent, la pluie, la neige, la grêle mais aussi les insectes nuisibles, les maladies ou les prédateurs. D'autre part, elles servent à créer un climat favorable au développement des plantes en permettant d'optimiser et/ou de contrôler plusieurs paramètres climatiques tels que l'ensoleillement, la température, l'humidité ou le taux de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air [10].

L'ensoleillement est physiquement diminué par l'installation de serres car leur enveloppe transmet entre 80 % et 95 % du rayonnement solaire direct et entre 61 % et 85 % du rayonnement solaire diffus selon le matériau utilisé [11]. Selon la région et le moment de l'année, il est alors possible d'avoir un déficit d'ensoleillement (notamment en hiver) qui peut être comblé grâce à de l'éclairage artificiel.

Le taux de CO₂ dans l'air à l'intérieur d'une serre varie du fait de la présence des végétaux. Durant le jour, il diminue à cause de la photosynthèse des plantes qui absorbe le dioxyde de carbone alors que pendant la nuit, il augmente en raison de la respiration des cultures végétales. Une solution au manque de CO₂ qui peut subvenir en journée et limiter le développement des plantes est de ventiler la serre ou d'utiliser des systèmes d'enrichissement.

L'humidité à l'intérieur d'une serre est fortement impactée par l'évapotranspiration de la végétation : sous l'effet de la chaleur et du soleil, les plantes relâchent de l'eau qui s'évapore afin de les refroidir. Ceci a pour effet d'augmenter l'humidité absolue (teneur de l'air en vapeur d'eau) de la serre pendant la journée. Durant la nuit, la température baisse ce qui a pour effet d'augmenter l'humidité relative (rapport de la teneur de l'air en vapeur d'eau et de la capacité maximale de l'air à en contenir pour des conditions de température et de pression données) et peut amener à avoir de la condensation sur les plantes ou les parois de la serre. Une humidité relative trop importante peut être abaissée grâce à la ventilation de la serre tandis qu'une humidité relative trop faible peut être corrigée à l'aide d'un brumisateur par exemple.

La température à l'intérieur de la serre est souvent plus élevée que la température

à l'extérieur grâce à deux mécanismes. Premièrement l'effet de confinement : le fait d'avoir un espace clos réduit grandement les échanges convectifs avec l'air extérieur et augmente donc la température à l'intérieur de la serre. Cet effet est visible même pour des serres étant très perméable à l'air [10]. Secondement, « l'effet de serre » : l'enveloppe des serres est fait de matériau transmettant en grande partie le rayonnement solaire (dont la longueur d'onde s'étend de $0,3\mu\text{m}$ à $2,5\mu\text{m}$) qui est ainsi majoritairement cédé au sol ainsi qu'aux plantes, induisant leur réchauffement. Ces derniers réémettent cette chaleur sous forme de rayonnement infrarouge (d'une longueur d'onde d'environ $10\mu\text{m}$). Or l'enveloppe des serres transmet moins – voire pas du tout – le rayonnement infrarouge (coefficient de transmission compris entre 0 et 0,7 selon les matériaux [11]). La chaleur réémise par le sol et les plantes est donc emprisonnée à l'intérieur de la serre ce qui, couplé à l'effet de confinement, augmente la température de la serre. Cet effet est utile quand la température extérieure est trop basse mais il se révèle néfaste quand le rayonnement solaire est trop important, entraînant une surchauffe de la serre. Il est possible de contrôler la température au moyen d'un système de chauffage quand elle est trop basse ; avec un écran d'ombrage, un système de ventilation ou de climatisation quand elle est trop élevée ; ou encore de la réguler à l'aide d'un système de stockage thermique.

Les serres servent donc à créer des conditions favorable à la culture horticole. Cependant, en fonction du climat extérieur, du type de culture, des objectifs de production et du coût d'investissement, différents genres de serre peuvent être envisagées.

1.2 Les différents types de serre

Les serres se distinguent entre elles principalement par deux critères : leur géométrie et le matériau de leur enveloppe.

1.2.1 Les géométries

Un grand nombre de géométrie de serres existe, mais deux catégories peuvent être distinguées : les serres multi-chapelles (cf. Figure 1.1) et les serres simples [8, 10]. Les serres multi-chapelles ont l'avantage d'optimiser l'utilisation de la surface au sol et d'être moins chères à chauffer [10] mais ont un coût d'investissement plus élevé. Pour cette raison, elles sont préférées dans le cas de culture à forte valeurs ajoutée (fleurs, concombres, tomates, etc.) alors que les serres simples sont plutôt utilisées pour du maraîchage (faible valeur ajoutée) [8].



FIGURE 1.1 – Serre multi-chapelles [12]

Parmi les serres simples, il existe également une grande variété de géométries différentes. Dans le cadre de son étude sur l'impact de la géométrie sur la disponibilité du rayonnement solaire à l'intérieur de serres, Sethi [13] distingue cinq types de géométrie (cf. Figure 1.2).

Après avoir simulé la disponibilité du rayonnement solaire et la température intérieure pour chacune des géométries mentionnées sur la Figure 1.2 et pour différentes latitudes, Sethi [13] conclut que la géométrie quonset devrait être choisie pour des emplacements situés à 10° de latitude nord car elle reçoit moins de rayonnement solaire durant chacun des mois de l'année tandis que la géométrie « uneven-span » (cf. Figure 1.2) devrait être préférée pour des endroits situés à 50° de latitude nord dans la mesure où cette géométrie reçoit plus de rayonnement solaire tout au long de l'année.

Il existe également des serres dites géodésiques, en forme de dôme (cf. Figure 1.3). Cette géométrie a l'avantage d'avoir une meilleure résistance au vent ainsi que la plus petite surface d'enveloppe possible pour un volume intérieur donné, ce qui minimise les pertes de chaleurs à travers les parois [14].

Enfin, un dernier type de serre existant est la « serre solaire chinoise » (« chinese solar greenhouse », Figure 1.4). Ces serres sont apparues en Chine dans les années 1930 et peuvent être utilisées quand la température extérieure moyenne est de -10°C sans système de chauffage [16]. Ces serres sont caractérisées par une forme asymétrique, avec une grande façade exposée plein sud et un mur nord isolé, qui peut remplir un rôle de stockage thermique s'il a une inertie suffisante. De plus elles ont souvent une

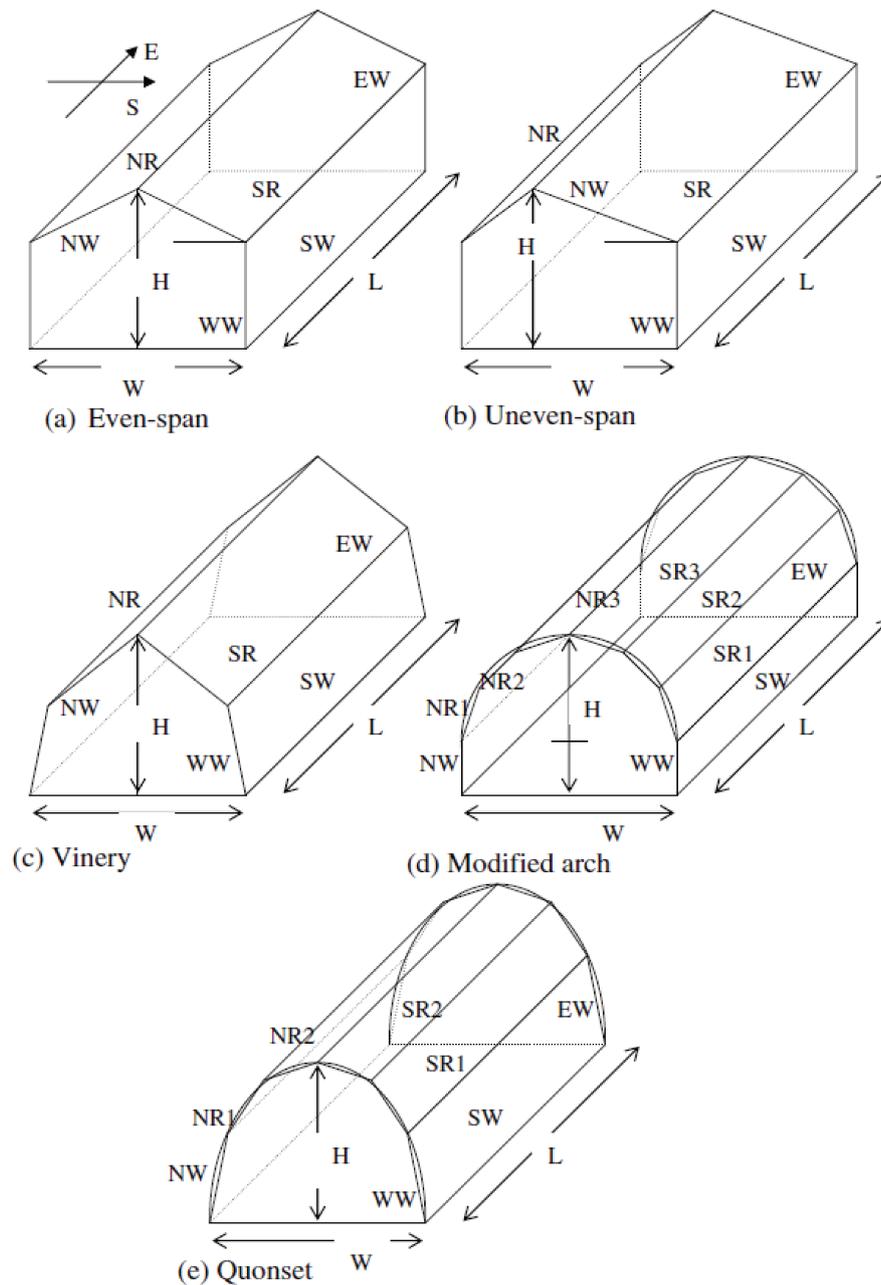


FIGURE 1.2 – Les principales géométries de serre (repris de Sethi (2009) [13])

couverture thermique dans le but de limiter les pertes de chaleur durant la nuit [17].

Ces différentes géométries peuvent ensuite être associées à différents types d'enveloppe selon le climat et le coût d'investissement envisagé.

1.2.2 Les matériaux d'enveloppe

Il existe principalement trois catégories de matériau d'enveloppe pour les serres : le verre, les plastiques rigides et les plastiques souples. Parmi les plastiques souples les plus utilisés on peut citer le polyéthylène, le film de polychlorure de vinyle (PVC)



FIGURE 1.3 – Serres géodésique [15]

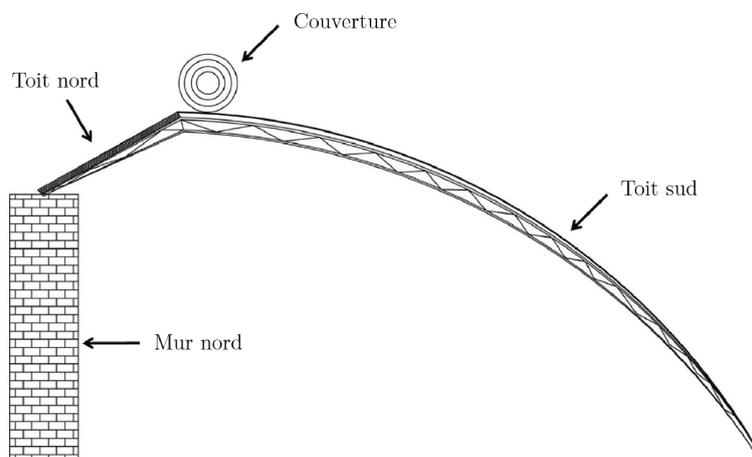


FIGURE 1.4 – Principe d'une serre chinoise (traduit de Cao et al. (2019) [18])

et le copolymère d'éthylène-acétate de vinyle (EVA). Les plastiques rigides les plus communs regroupent le polycarbonate, le PVC rigide et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA).

Les plastiques souples ont plusieurs avantages : ils sont légers (souvent moins de $0,2 \text{ kg m}^{-2}$) et peu chers (entre $0,3 \text{ €/m}^2$ et $1,5 \text{ €/m}^2$) [10]. Ils sont souvent utilisés avec la géométrie quonset (géométrie tunnel) et sont particulièrement répandus dans les zones au climat méditerranéen ou tropicaux [11]. Cependant, ils ont de mauvaises propriétés thermique (faible isolation et coefficient de transmission infrarouge compris entre 0,1 et 0,7) et une faible durabilité, comprise entre 1 et 3 ans lorsqu'ils ne sont pas traités à l'aide d'additifs [10].

A contrario, le verre possède de très bonnes propriétés optiques et thermiques dans le cadre de la serriculture. Il transmet 90% du rayonnement solaire direct et il est opaque au rayonnement infrarouge ce qui renforce l'effet de serre. Par ailleurs, le verre bénéficie d'une durabilité supérieure à 20 ans. Il comporte néanmoins plusieurs défauts : son poids (10 kg m^{-2}), son prix (environ 18 €/m^2) ainsi que sa vulnérabilité aux chocs

[10]. Il est donc souvent utilisé dans des serres à but commercial pouvant supporter le coût d'investissement élevé.

Les plastiques rigides sont un compromis entre les plastiques souples et le verre. Ils sont plus légers (entre $1,5 \text{ kg m}^{-2}$ et 5 kg m^{-2}), moins chers (entre 9 €/m^2 et 15 €/m^2) [10] et moins rigides que le verre, les rendant ainsi moins sensibles aux chocs mécaniques. Ils transmettent environ 80 % du rayonnement solaire direct et sont généralement opaques au rayonnement infrarouge. Leur durée de vie est comprise entre 10 ans et 20 ans.

En combinant les différentes géométries ainsi que les divers matériaux d'enveloppe, une grande variété de serres peut être envisagée. Nous allons voir quels critères peuvent être utilisés pour comparer leur efficacité énergétique.

1.3 Évaluation des paramètres climatiques optimaux dans les serres

L'objectif d'une serre étant de créer un climat favorable au développement des plantes, on peut en évaluer l'efficacité à sa capacité à maintenir certains paramètres climatiques dans des plages données.

Par exemple, d'après Baptista [19], les limites inférieures et supérieures d'humidité relative à l'intérieur d'une serre sont respectivement 55 % et 95 %. Une humidité relative trop faible peut entraîner un stress hydrique des plantes tandis qu'une humidité relative trop importante peut provoquer une réduction de la croissance et une augmentation du développement des maladies fongiques. La limite inférieure d'ensoleillement extérieur journalier pour une production végétale est quant à elle de 1 kWh m^{-2} [11].

En ce qui concerne les températures, deux types sont à distinguer : les températures nécessaires à la survie des cultures et les températures optimales pour les plantes. Ainsi, dans la mesure où le gel peut tuer les végétaux, la température minimale absolue à l'intérieur d'une serre (T_{min}^{abs}) est de 0 °C [11]. La température intérieure maximale absolue (T_{max}^{abs}) se situe entre 35 °C et 40 °C . Les températures optimales (T_{min}^{opt} et T_{max}^{opt}) se situent entre 10 °C - 12 °C et 30 °C pour la majorité des cultures [10]. Il peut cependant y avoir des différences entre les espèces : cette plage de température est de 7 °C à 25 °C pour les légumes comme les laitues ou les fraises quand elle est de 18 °C à 35 °C pour des cultures tel que les concombres ou les melons [10].

En fonction du climat extérieur, les serres auront des objectifs différents. Dans des zones situées en climat tropical, une serre peut être évaluée par sa capacité à maintenir une température plus basse que la température extérieure et à protéger les

cultures des pluies et vents très intenses et d'un ensoleillement trop important [20]. A contrario, dans des zones où la température est trop basse, l'efficacité d'une serre peut être estimée par la différence de température qu'elle arrive à maintenir avec l'extérieur. Cette différence est par exemple utilisée pour décrire les serres chinoises qui peuvent avoir une température intérieure entre 21 °C et 25 °C plus élevée que la température extérieure [16]. Le même critère est utilisé dans l'évaluation d'une serre expérimentale installée à Elie (Manitoba, Canada) qui peut garder une température positive quand la température extérieure atteint -30 °C [21] (cf. partie 2.2.3). Plusieurs auteurs [22–25] utilisent également ce critère afin d'étudier l'impact de l'installation de systèmes de stockage sur la température intérieure de serres situées à différents endroits (Algérie, Maroc et Turquie).

Un autre moyen pour évaluer l'efficacité d'une serre peut être de déterminer le nombre de jours consécutifs compris dans une certaine plage de température (température nécessaires ou optimales). Par exemple, afin de quantifier les effets d'améliorations possibles sur la serre d'Iqaluit (Canada), Henshaw [26] prend en compte le nombre de jours consécutifs ayant une température supérieure à 4 °C. La température maximale n'est pas prise en compte dans la mesure où la température à l'intérieur de la serre ne dépasse jamais 30 °C.

La température sera le critère principal considéré au cours de ce travail de recherche dans la mesure où cette thèse se focalise sur les aspects thermiques des serres nordiques. Le prochain chapitre sera consacré aux serres nordiques existantes afin d'en déterminer les caractéristiques actuelles.

Chapitre 2

Les serres en Amérique du Nord

Sommaire

2.1	Contexte	16
2.2	Les serres nordiques existantes	17
2.2.1	Les serres communautaires	17
2.2.2	Les serres commerciales	23
2.2.3	Les serres de recherche	26
2.2.4	Les projets en cours de développement	30
2.3	Discussion	35
2.3.1	Choix des cultures	37
2.3.2	Conception et saison de culture	38

2.1 Contexte

La serriculture dans les communautés nordiques isolées connaît un regain d'intérêt car il apparaît que la production locale de fruits et de légumes frais au sein de serres, notamment communautaires, comporte plusieurs bénéfices. Cette production locale permet un meilleur accès aux légumes, engendrant une augmentation de leur consommation et donc une amélioration du niveau de santé [27, 28]. Mais l'implantation de serres communautaires va au-delà du simple aspect alimentaire. Il y a des bénéfices sociaux dans la mesure où avoir un espace collectif pour jardiner permet d'avoir une activité extérieure, de rencontrer des gens [28], et de participer au sentiment d'appartenance et à l'engagement communautaire [27]. L'aspect social comprend également un côté éducationnel, puisque les serres sont une bonne opportunité d'apprendre aux enfants le jardinage et comment sont produits les légumes. Un autre bénéfice réside dans l'aspect économique. En effet, le fait de produire localement permet de cultiver ses propres légumes ou d'économiser les coûts de transport quand les légumes sont vendus. De plus, certaines serres communautaires sont gérées par un employé salarié, générant ainsi de l'emploi local. Enfin, il y a un aspect environnemental [28] : en vendant ou consommant des produits locaux, on réduit le bilan carbone associé au transport de ces marchandises. En outre, la production de légumes en terre permet de recycler les déchets végétaux sous forme de compost.

Cette partie a pour vocation de lister les différentes serres nordiques (au-dessus du 50^e parallèle) documentées en Amérique du Nord et, quand les données sont disponibles, les adaptations énergétiques spécifiques au climat nordique. Ce travail se concentrera sur les communautés isolées en particulier. Les serres recensées ont différentes finalités. Elles peuvent être communautaires (mis à disposition de la communauté afin que chacun puisse faire pousser ses légumes gratuitement ou avec une faible participation) ou commerciales (production destinée à être vendue localement). Elles peuvent également servir à produire de la nourriture pour un point de restauration (restaurants ou cantines scolaires) ou servir comme outil de recherche ou d'éducation. Cependant, la littérature scientifique à propos des serres en climat nordique est très peu développée [28, 29], notamment au niveau des technologies liées à l'énergie mises en place (isolation, chauffage, stockage, éclairage). Par ailleurs, le rapport d'AgriTeam Canada Consulting [29] note que les communautés nordiques ne sont pas en position de tester ou développer de nouvelles technologies. On peut supposer que cela est dû au fait que ces communautés sont isolées et qu'il n'y a donc pas d'université ou de centre de recherche capables de développer des technologies sur place. En outre, l'acheminement de matériel a un coût élevé dans la mesure où il doit être apporté par avion ou par bateau.

Dans la mesure du possible, les références proviendront de publications issues de journaux scientifiques, mais des sources d'informations variées seront également utili-

sées (rapports techniques, articles de journaux, sites internet des serres, vidéos, entretiens téléphoniques ou par mail, terrains de recherche).

2.2 Les serres nordiques existantes

Les différentes serres nordiques recensées sont présentées et classées par genre sur la Figure 2.1.

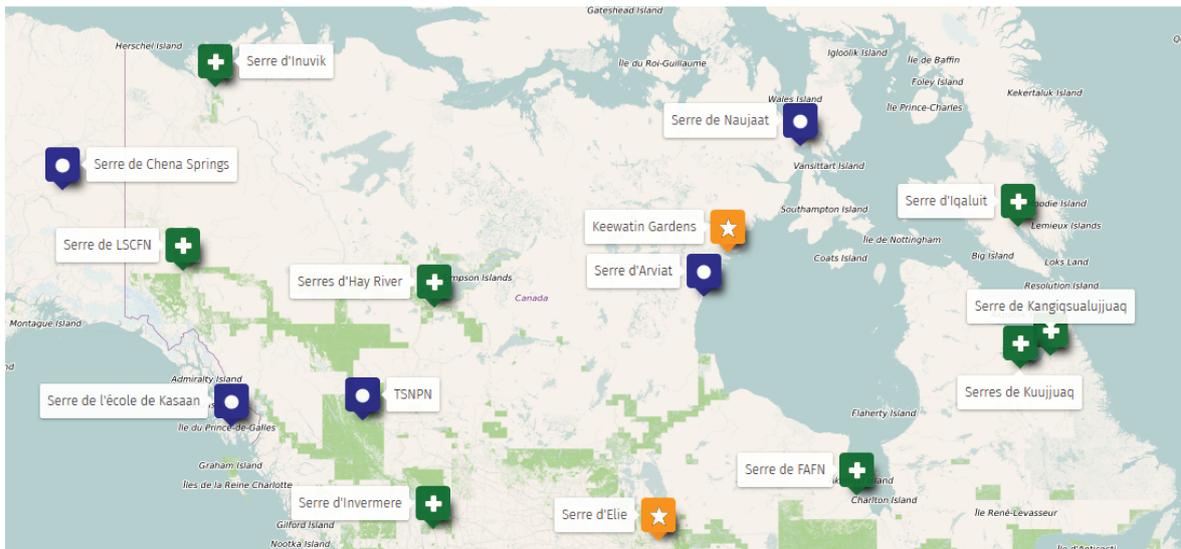


FIGURE 2.1 – Carte des différentes serres recensées : communautaires (croix, vert), commerciales (rond, bleu) et les projets de recherche (étoile, orange)

2.2.1 Les serres communautaires

Les serres de Kuujuaq, QC, Canada

Kuujuaq est un village du Nunavik situé à 58° de latitude nord. Deux serres communautaires quasiment identiques y ont été construites, l'une au début des années quatre-vingt-dix [28], l'autre en 2013.

Ces serres, d'environ 140 m² chacune, sont construites en polycarbonate alvéolé double vitrage, et ne comportent aucun système de chauffage ou de stockage. Afin d'éviter de trop hautes températures en été, les serres sont équipées d'un système de ventilation automatique. La première étape est une ventilation active avec la mise en route d'un ventilateur, la seconde est une ventilation passive avec l'ouverture du toit (cf. Figure 2.2). Ces serres sont la propriété du Village Nordique (VN, équivalent d'une mairie) de Kuujuaq et comportent 46 parcelles de jardinage [5] (cf. Figure 2.3). Ces parcelles sont attribuées gratuitement aux résidents du village lors d'un tirage au sort



FIGURE 2.2 – Vue extérieure des serres de Kuujjuaq¹



FIGURE 2.3 – Vue intérieure d’une des serres de Kuujjuaq

annuel. La culture se compose principalement de légumes verts (laitues, choux kale, courgettes, bok choy) cultivés en terre et la capacité de production est d’une tonne par an pour les deux serres [5] soit $4,1 \text{ kg m}^{-2}$. La saison de culture dure 4 mois, de fin mai à fin septembre, notamment car les températures nocturnes peuvent être négative jusqu’à fin mai.

La serre d’Iqaluit, NU, Canada

Iqaluit est la capitale du territoire du Nunavut, au Canada, localisée au niveau du 63^e parallèle nord. Après deux tentatives d’installation de serres dans les années 1960 et en 1976, une association de résidents a décidé de construire une nouvelle serre communautaire en 2007 [28].



FIGURE 2.4 – Vue extérieure de la serre d’Iqaluit [30]



FIGURE 2.5 – Vue intérieure de la serre d’Iqaluit [31]

Cette nouvelle serre de 90 m^2 , composée de double vitrage de 8 mm de polycarbonate posé sur un cadre en aluminium (cf. Figure 2.4), ne dispose pas de moyen de chauffage. Elle dispose cependant de stockage thermique passif sous la forme de vingt bidons

1. Les photos non référencées sont issues de la collection personnelle de l’auteur.

d'eau de 114L chacun et le toit s'ouvre lorsque la température excède 30 °C dans la serre [26]. La saison de culture s'étend de début juin à septembre [32] ou début octobre [33] selon les sources, et les légumes récoltés se composent d'épinards, de blettes, de laitues, de choux kale, de carottes, de haricots ou de pois [34]. Les légumes poussent dans des bacs de terre surélevés [26] (cf. Figure 2.5). Un article reporte la production de 50 kg de laitue en 2015 [35], sans mentionner les quantités des autres légumes.

Cette serre a été modélisée à l'aide du logiciel TRNSYS afin de trouver des solutions pour augmenter la saison de culture, en simulant la mise en place de mesures de conservation de l'énergie [26]. La saison de culture est ici définie comme le nombre de jours consécutifs où la température de l'air est au-dessus de 4 °C. Sans amélioration, la simulation du comportement thermique de la serre montre que la saison de culture dure 95 jours, du 6 juin au 9 septembre. Les scénarios d'amélioration envisagés comprenaient :

1. L'ajout de réservoirs d'eau sous les lits de culture afin d'augmenter l'inertie thermique.
2. L'augmentation de l'isolation en installant un sas d'entrée et en réduisant l'infiltration d'air au niveau du toit quand il est fermé.
3. Le remplacement du plancher en contreplaqué par du béton pour augmenter la masse thermique.
4. Le recouvrement du cadre extérieur en aluminium avec de la mousse, minimisant ainsi la perte de chaleur à travers cet élément.
5. Le déploiement d'une couverture nocturne afin de bloquer les radiations intérieures, afin de conserver la chaleur à l'intérieur de la serre la nuit.

Les résultats de la simulation de ces scénarios montrent que le moins cher et le plus facile à mettre en œuvre est l'ajout de réservoirs d'eau (canettes d'aluminium) sous les lits de culture, augmentant ainsi la saison de culture de 42 jours, soit une augmentation de 44 %. La saison durerait ainsi du 10 mai au 24 septembre. L'élargissement de la saison est plus prononcé au début de celle-ci car la ressource solaire est plus abondante en mai qu'en septembre. L'isolation du mur nord à l'aide d'une mousse opaque augmente la durée de culture de 49 jours mais est plus cher.

La serre d'Inuvik, NT, Canada

Inuvik est une ville située à 68° de latitude nord, dans les Territoires du Nord-Ouest. Une serre y a vu le jour en 1999 (cf. Figure 2.6).

Cette serre est connue pour être la serre commerciale la plus au nord de l'Amérique [28] et est subdivisée en deux parties : une partie commerciale de 370 m² et une partie



FIGURE 2.6 – Vue extérieure de la serre d'Inuvik [36]



FIGURE 2.7 – Vue intérieure de la serre d'Inuvik [37]

communautaire de 440 m² [38]. La partie communautaire est divisée en 148 parcelles, pouvant être louées moyennant une somme de 50 \$ CA. Cette serre est une ancienne patinoire dont le toit a été remplacé par du polycarbonate et qui dispose d'un toit ouvrant automatique pour évacuer l'excédent de chaleur en été [39]. Les légumes cultivés se composent d'épinards, de blettes, de laitues, de tomates, de carottes, de pois, de courgettes ou encore de fraises [40]. Ils poussent dans de la terre pour la partie communautaire (cf. Figure 2.7) et en hydroponie (technique de culture hors-sol sur des substrats inertes alimentés par une solution aqueuse nutritive) dans la partie commerciale [39] de fin mai à fin septembre [41].

La serre de Fort Albany First Nation, ON, Canada

Fort Albany First Nation (FAFN) est une réserve de la Première Nation Cri¹, positionnée au-dessus du 52^e parallèle nord. Afin de produire des légumes frais et locaux, une serre de 30 m² (cf. Figure 2.8) y a été construite en 2010 [42].

La serre est ouverte à tous, ce qui a permis à plus de 75 personnes (dont une quarantaine d'enfants) de venir aider aux semis ou à l'arrosage des plantes. La serre est faite en cinq couches de panneaux de polycarbonate pour avoir une bonne isolation et être théoriquement incassable. Cependant, ce quintuple vitrage doit avoir des effets négatifs sur la transmission de la lumière mais ceux-ci ne sont pas décrits dans la publication. Deux souffleurs d'air chaud alimentés en propane liquide ont également été installés afin de fournir la chaleur nécessaire à la culture des plantes en période froide. La consommation n'est pas donnée. La saison de culture dure entre 6 et 7 mois.

1. Peuple algonquiens d'Amérique du Nord. Les Premières Nations (parfois improprement appelé « Amérindiens ») désignent les peuples autochtones du Canada n'étant ni des Inuits ni des Métis.



FIGURE 2.8 – Vue extérieure de la serre de FAFN [43]

Les serres d'Hay River, NT, Canada

Hay River est une ville des Territoires du Nord-Ouest, située au niveau du 61^e parallèle nord. Une société à but non lucratif y a vu le jour en 2013 : le Northern Farm Training Institute (NFTI). Cette société s'est installée sur un terrain de plus d'un kilomètre carré et a pour objectif d'enseigner l'agriculture nordique à travers des stages proposés toute l'année [44]. Le NFTI possède 3 serres : une serre principale, une serre géodésique et une serre pour les semis [45]. La serre pour les semis a été construite en 2005 et fait 40 m². Son enveloppe est en polycarbonate, elle fonctionne de mars à novembre grâce à des réservoirs d'eau pour stocker la chaleur et une chaudière à bois dont la consommation n'est pas précisée. La serre principale fait 420 m² et a été construite en 2013. C'est une serre en polyéthylène simple couche dont la saison de culture s'étend d'avril à septembre et qui ne comporte pas de système de stockage de la chaleur ou de chauffage. Sa production moyenne annuelle est de 2 500 kg ce qui représente 6 kg m⁻². Enfin, une serre géodésique de 75 m² a été bâtie en 2015. Elle est en polycarbonate, ne possède pas de système de stockage ou de chauffage et fonctionne d'avril à septembre. Elle produit 450 kg de légumes par an ce qui représente également 6 kg m⁻².

La serre d'Invermere, BC, Canada

Invermere est une communauté de Colombie-Britannique située à 50° de latitude nord. En 2008, une serre communautaire de 186 m² [46] y a été construite (cf. Figure 2.9) par plus de 300 volontaires [47].



FIGURE 2.9 – Vue extérieure de la serre d’Invermere [48]

Contrairement aux autres serres communautaires, celle-ci a été spécifiquement conçue pour un climat froid. D’une part elle adopte une géométrie de style chinois (cf. partie 1.2.1) avec une façade orientée vers le sud et un mur nord opaque et doté d’une masse thermique en béton [49]. D’autre part, un système de stockage saisonnier géothermique a été installé afin de réguler la température au cours de l’année permettant ainsi d’avoir une saison de culture de 10 mois [47]. Ce système appelé Annualized Geosolar (AGS) consiste à collecter l’air chaud en haut de la serre durant l’été et à le faire passer dans le sol afin de le réchauffer à l’aide d’un système de canalisations et de ventilateurs [50]. En hiver, l’air froid de la serre circule dans le sol plus chaud afin de garder une température positive à l’intérieur de la serre malgré une température extérieure de -10°C [50]. Lors de la construction, des panneaux photovoltaïques pouvant fournir une puissance électrique totale de 1 kW ont également installés [51].

Autres serres

Deux autres serres existantes ont été recensées mais très peu d’informations sont disponibles sur celles-ci. Une serre a été construite en 2000 à Little Salmon/Carmacks First Nation (LSCFN) [52], une des 14 communautés des Premières Nations du Yukon (Canada). En 2018, une serre a été construite à Kangiqsualujjuaq [53], un des 14 villages nordiques du Nunavik, Canada.

2.2.2 Les serres commerciales

Les serres de Naujaat et d'Arviat, NU, Canada

Naujaat est un petit village du Nunavut, localisé au-dessus du 66^e parallèle nord. En 2015, une serre y a été construite afin d'approvisionner le village en légumes frais.



FIGURE 2.10 – Vue extérieure de la serre de Naujaat [54]

Cette serre est spécialement conçue pour le climat nordique. Elle a été construite par Growing North [54] (depuis renommée Green Iglu [55]), une entreprise créée par des étudiants de l'université de Ryerson (ON, Canada). Cette société a pour but de développer des serres nordiques dans les communautés isolées afin d'initier une réponse à la problématique de l'insécurité alimentaire. La serre de Naujaat est un dôme géodésique (cf. Figure 2.10) de 120 m² dont l'enveloppe est composée de polycarbonate double vitrage [56]. La serre n'est pas chauffée mais dispose d'une cuve d'eau agissant comme masse thermique. Des réflecteurs installés sur la face intérieure nord permettent d'augmenter le flux solaire venant chauffer la cuve durant la journée. Un système de toit ouvrant automatique alimenté par l'énergie solaire a également été mis en place pour la ventilation. Malgré un climat rude, la saison de culture s'étend de mars à novembre, et les récoltes se composent essentiellement de légumes verts (laitues, choux kale, blettes) mais aussi de tomates, concombres, haricots ou pois. Deux systèmes de culture coexistent, l'un en terre et l'autre en hydroponie verticale, ce qui permet de gagner de l'espace par rapport à la surface au sol. La capacité de production est évaluée à 6 tonnes par an [57], soit 50 kg m⁻². Ce chiffre est important, mais il s'agit d'une estimation de l'entreprise prenant en compte un potentiel fonctionnement annuel de la serre. Ces légumes sont ensuite vendus localement. Deux dômes similaires à celui de Naujaat ont été installés à Arviat (Nunavut, Canada) [58].

La serre Chena Fresh, AK, États-Unis

La serre Chena Fresh est située sur le complexe hôtelier de Chena Hot Spring, à 65° de latitude nord, en Alaska. Ce complexe a décidé de faire pousser des légumes et a commencé les expérimentations de serriculture en 2004 avant de construire une grande serre de 550 m² en 2006 afin de produire des fleurs ainsi que des salades et des tomates en hydroponie (technologie NFT, Nutrient Film Technique) pour son restaurant [59].



FIGURE 2.11 – Vue extérieure de la serre Chena Fresh [60]



FIGURE 2.12 – Vue intérieure de la serre Chena Fresh [61] (photo : Denise Ferree)

Cette serre a la particularité de fonctionner toute l'année grâce à une source géothermale située à côté du complexe. Grâce à cette source, les propriétaires ont été capables d'installer un système de chauffage de 146 kW ainsi qu'une centrale géothermique produisant 62 kW d'électricité [62]. Cette électricité est utilisée pour faire fonctionner divers appareils électriques dont des lampes à halogénure métallique et des lampes à vapeur de sodium haute pression [59] qui permettent de compenser la faible durée des journées en hiver. L'enveloppe est constituée d'une double couche de polyfilm de 6 mm entre lesquelles est insufflé de l'air chaud afin d'isoler la serre. Une « entrée arctique » est également utilisée, qui consiste à avoir un sas au niveau de la porte afin d'éviter des déperditions de chaleur trop importantes lorsque l'on entre ou on sort. Il est reporté la production de 100 000 fleurs par an, ainsi que 4 tonnes de tomates en 2016 [63] ce qui représente une récolte de 7,3 kg m⁻² en ne comptant pas les fleurs.

La serre de l'école de Kasaan, AK, États-Unis

Un rapport de l'AEA (Alaska Energy Authority) et du CCHRC (Cold Climate Housing Research Center) sur les serres chauffées à la biomasse est paru en mars 2017 [64]. Ce rapport comporte 9 études de cas assez similaires, notamment sur des écoles

équipées de serres afin de produire de la nourriture pour le restaurant scolaire et pour éduquer les enfants à l'agriculture.



FIGURE 2.13 – Vue extérieure de la serre de Kasaan [64]

Un exemple est la serre de l'école de Kasaan (cf. Figure 2.13), un hameau d'Alaska positionné à proximité du 55^e parallèle nord. L'école a installé une serre de 80 m² en 2015 dont l'enveloppe est composée d'une double couche de polycarbonate. Le système de culture choisi est l'aquaponie (système couplant l'élevage de poisson et la culture de plantes, cf. Figure 2.14), notamment à cause du manque de terre fertile dans le sud-est de l'Alaska. Elle est équipée d'une chaudière à bois qui chauffe l'eau des poissons et l'air de la serre. La consommation estimée est de 60 cordes de bois par an, soit environ 215 m³ apparents de bois. En considérant un pouvoir calorifique inférieur (PCI) du bois de 4 kWh kg⁻¹ [65] et une masse volumique de 500 kg m⁻³ de bois [66], on peut estimer la consommation annuelle à 430 MWh. L'école peut ainsi produire en majorité des salades mais aussi du chou kale, des carottes, des navets et des radis. Les légumes sont ensuite vendus à la cafétéria de l'école ou aux épiceries locales.

Twin Sisters Native Plants Nursery, BC, Canada

La TSNPN (Twin Sisters Native Plants Nursery) est une entreprise fondée en 2012, située à côté du lac Moberly (BC, Canada) au niveau du 56^e parallèle nord. Elle est spécialisée dans les plantes autochtones dans un but de restauration écologique : renouveler et restaurer des zones endommagées par les activités humaines [68].

À cet effet, deux serres de 650 m² chacune (cf. Figure 2.15) ont été construites en 2013 et 2017 [69]. Ce sont des serres en polycarbonate fonctionnant toute l'année dont le système de chauffage ou de stockage n'est pas décrit.

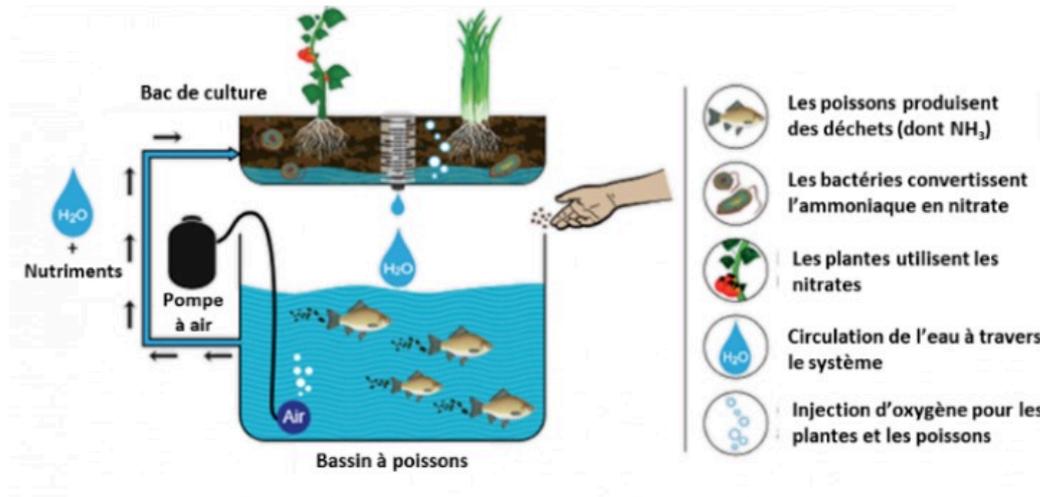


Figure 1 : Les éléments de l'unité aquaponique qui doivent être contrôlés et équilibrés

FIGURE 2.14 – Schéma simplifié du fonctionnement de l'aquaponie [67]



FIGURE 2.15 – Vue extérieure de la TSNPN [69]

2.2.3 Les serres de recherche

Keewatin Gardens, Pond Inlet Gardens et Green Igloos Farm, NU, Canada

Entre 1979 et 1986, l'Université de Toronto a lancée une série d'expérience sur l'agriculture arctique [70]. Ces projets étaient répartis sur trois sites : Keewatin Gardens (KG) situé à Rankin Inlet (62°N, appelé Kangiqliniq par les Inuits) ; Pond Inlet Gardens (PIG) qui était sur l'île de Baffin (72°N) et Green Igloos Farm (GIF) localisé au niveau du Fiord Alexandra (78°N) sur l'île d'Ellesmere.

Les objectifs de ces expériences étaient : de voir s'il était possible d'initier des projets de jardinage dans les communautés arctiques ; d'évaluer les effets de l'utilisation de châssis froids (« cold frames ») et de « structures igloo » sur la production de plantes



FIGURE 2.16 – Vue extérieure de Keewatin Gardens [70]



FIGURE 2.17 – Vue extérieure de Green Igloos Farm [70]

et de comparer la productivité de plantes de la toundra avec des plantes de climat plus tempéré. Ainsi, de 1979 à 1982, 40 châssis froids de $3,55\text{ m}^2$ chacun ont été installés à KG (cf. Figure 2.16). Ils étaient isolés du pergélisol par de la mousse de polystyrène, et certains châssis froids ont été couverts de polyéthylène transparents. Une extension du projet de KG a pris place à PIG de 1985 à 1986. Une serre solaire conventionnelle, des systèmes hydroponiques et des châssis froids y ont été installés, afin d'y faire pousser 18 espèces de plantes venant de zones au climat tempéré durant 6 mois. Enfin, l'expérience menée à GIF a duré de 1982 à 1985. Plusieurs serres géodésiques avec une enveloppe en plastique ont été montées (cf. Figure 2.17), certaines faisant 7 m^2 , d'autres 28 m^2 . Le cadre en bois était peint en noir à l'extérieur afin d'optimiser l'absorption de la chaleur, et en blanc à l'intérieur afin de maximiser la réflexion de la lumière.

Les résultats montrent que les châssis froids couverts de polyéthylène de KG avaient une température intérieure de $6,5^\circ\text{C}$ au-dessus des châssis laissés ouverts. De plus les espèces issues de la toundra ont, en moyenne, commencé à fleurir deux semaines plus tôt que les plantes issues de milieu au climat tempéré. Les expériences menées à PG montrent que les espèces les plus propices à la culture sous serre sont les haricots, les betteraves, les choux chinois, les concombres, les laitues, les tomates, les navets ainsi que les courgettes. Il a également été montré à GIF que l'utilisation de paillis disposé sur le sol pouvait augmenter la température de la couche superficielle (10 cm) de celui-ci de 3°C à 6°C . De manière plus générale, ces expériences font partie des premières études universitaires sur la serriculture nordique [28] et elles démontrent la faisabilité de projets de jardinage simples et à moindre coûts dans les communautés arctiques, pour peu que l'on ne fasse pas pousser des légumes l'hiver [70].

La serre d'Elie, MB, Canada

Elie est une petite ville se situant au niveau du 49° parallèle nord, dans le Manitoba. Une serre y a été construite en 2004 (cf. Figure 2.18) dans le cadre d'une série

d'expériences sur les serres solaires, lancée par Manitoba Hydro, une société publique s'occupant de la production et du transport de l'électricité [71]. Ces études se sont concentrées sur le comportement thermique des serres en climat froid.



FIGURE 2.18 – Vue extérieure de la serre d'Elie [72]

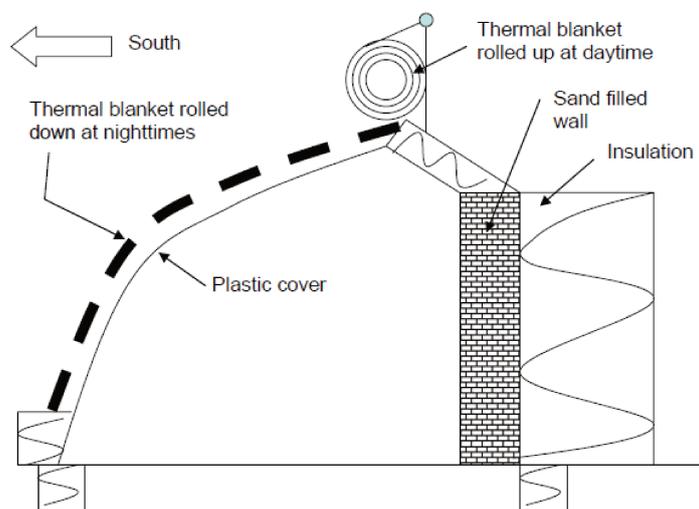


FIGURE 2.19 – Structure de la serre d'Elie [21]

Cette serre de 210 m^2 a les caractéristiques des serres chinoises (cf. partie 1.2), avec un mur nord isolé et rempli de sable pour stocker la chaleur de la journée (cf. Figure 2.19). La façade sud est composée d'une mono-couche de polyéthylène de 6 mm, et la couverture thermique est en coton [73]. Des géraniums ont été plantés en terre afin de se rapprocher du comportement réel d'une serre [21]. Afin de comprendre et de comparer son comportement thermique, la serre a été instrumentée à l'aide de thermocouples de type K ainsi que d'une station météo pour le climat extérieur (ensoleillement, température, humidité relative, vitesse et direction du vent). Une serre conventionnelle située à Landmark (à environ 100 km d'Elie) a également été instrumentée pour comparer les performances énergétiques des deux serres.

Les résultats montrent que la serre d'Elie peut maintenir une température jusqu'à 20 °C au-dessus de la serre traditionnelle (cf. Figure 2.20) durant la nuit et qu'elle peut maintenir une température positive quand la température extérieure chute à -30 °C .

Des tests effectués sur l'influence de la couleur du mur nord intérieur montrent que la température du mur peint en noir (« painted » sur la Figure 2.21) est 5 °C à 6 °C supérieur à la surface argentée non peinte (« unpainted » sur la Figure 2.21), accumulant ainsi 17% d'énergie supplémentaire [21]. Une autre analyse montre que le système de stockage du mur nord (sable) peut emmagasiner environ 10% de l'énergie solaire disponible, et qu'il relâche plus de 95% de l'énergie stockée vers la serre [73].

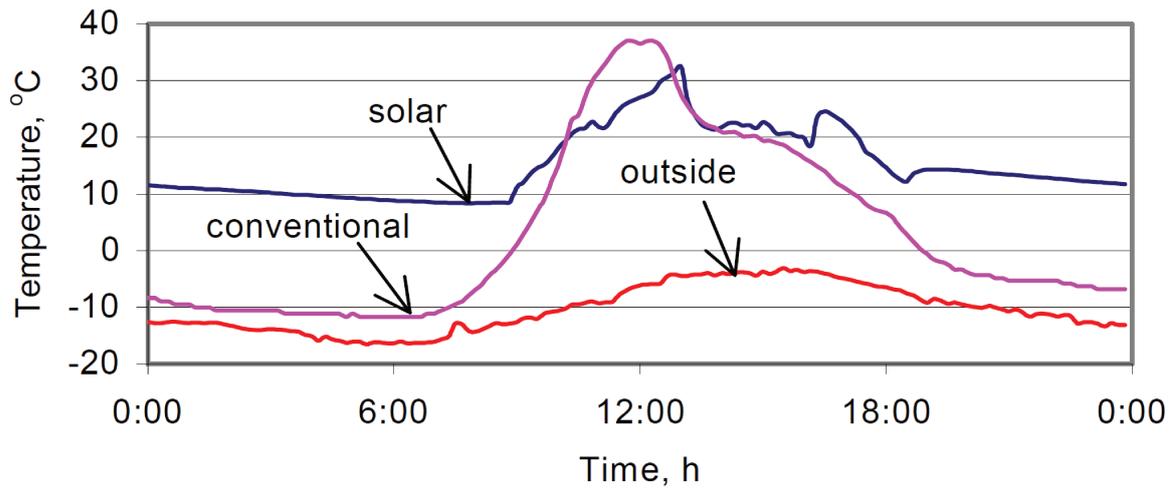


FIGURE 2.20 – Comparaison des températures du 20 Mars 2005 entre la serre conventionnelle et la serre chinoise (« solar » sur le graphique) [21]

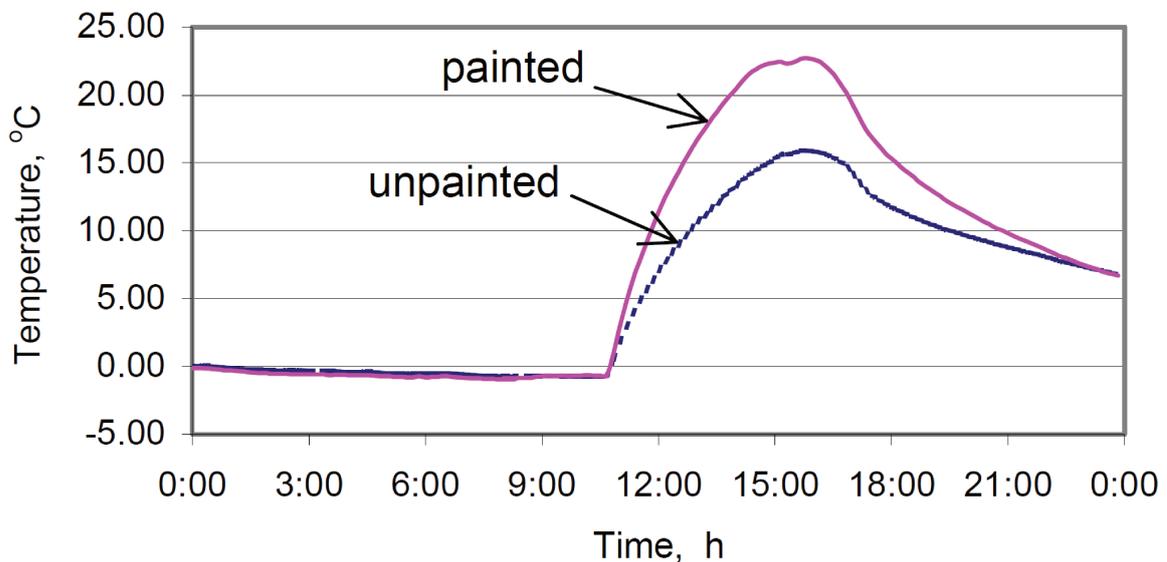


FIGURE 2.21 – Températures à une profondeur de 2 cm pour les surfaces peintes et non-peintes du mur nord [21]

Par ailleurs, cette serre a fait l'objet d'un travail de modélisation de la part d'Ahamed et al. (2018) [74] qui concluent que les « serres chinoises » sont un moyen permettant de réduire les coûts de chauffage dans le cadre de la serriculture nordique.

The Arthur Clarke Mars Greenhouse, NU, Canada

La Arthur Clarke Mars Greenhouse (ACMG) est une serre construite en 2002 sur l'île Devon (cf. Figure 2.22), à 72° de latitude nord. Elle mesure 21 m² de surface et a pour but d'étudier la culture de plantes et la régulation climatique en milieu extrême dont certaines caractéristiques pourront être retrouvées sur Mars (endroit isolé avec un accès ponctuel, une production d'électricité et de chaleur limitée et un environnement

extrême pour les plantes) [75].



FIGURE 2.22 – Vue extérieure de la ACMG [76]

Son enveloppe est composée d'une double couche de polycarbonate de 6 mm d'épaisseur, et elle est équipée d'un sas d'entrée afin d'éviter les déperditions de chaleur quand on ouvre la porte. Les données (température, humidité relative, flux solaire, vitesse et direction du vent et pression atmosphérique) relevées toutes les 10 min par les capteurs sont envoyées au centre de contrôle, situé à 3 500 km de la serre, à l'Université Simon Fraser en Colombie Britannique. Afin de maintenir la température désirée à l'intérieur de la serre, le contrôle du climat intérieur est entièrement automatisé. Il s'effectue à l'aide de ventilateur quand la température est trop élevée, et de trois chaudières au propane quand il fait trop froid. L'électricité de la serre est fournie grâce à un système hybride éolien-solaire couplé à un groupe de batteries. La culture se fait en hydroponie dans de la laine de roche associée à un système d'irrigation au goutte à goutte. Les recherches se sont principalement tournées vers l'instrumentation, le contrôle à distance de la serre et la possibilité d'installation de piles à hydrogènes [77] mais pas sur la culture des plantes à proprement parler.

2.2.4 Les projets en cours de développement

Le projet de serres nordiques du Yukon College, YT, Canada

Le Yukon College est une université dont le campus principal se situe à Whitehorse (YT, Canada) dont Cold Climate Innovation (CCI) fait partie. Il s'agit d'une structure aidant le développement et la commercialisation de technologies liées au climat froid

[78]. En 2011, CCI a commencé un projet sur la conception de serres nordiques en kit. Le constat était que beaucoup de serres n'étaient pas adaptées au climat nordique. Il fallait donc des serres avec les murs nord, est et ouest isolés, et capables de stocker la chaleur journalière afin de la réutiliser durant la nuit [79]. Le projet de conception a été achevé en 2016, et un site internet [80] a été créé pour vendre des serres adaptées au climat nordique (cf. Figure 2.23).



FIGURE 2.23 – Vue extérieure d'une serre de Solar Growing [80]

Ces serres sont en polycarbonate, et incorporent un espace sous les lits de culture pour y mettre de l'eau ou de la roche en tant que masse thermique. Dans les zones où les températures sont susceptibles de descendre en dessous de 0°C, il est conseillé de mettre de la roche pour éviter le gel de la masse thermique. De plus, elles comportent un système de ventilation automatique pour évacuer la chaleur excédentaire. Le modèle de base fait 6 m², et est destiné à être vendu à des particuliers.

Canadian Integrated Northern Greenhouse, Université McGill, Montréal, QC, Canada

La CING (Canadian Integrated Northern Greenhouse) est issue d'un projet d'étudiants en conception technique [81]. Il s'agit d'un système spécifiquement conçu pour les communautés nordiques situées au-dessus de 60° de latitude nord dans la mesure où c'est un système hybride agissant comme une serre durant l'été, et comme une chambre de culture durant l'hiver.

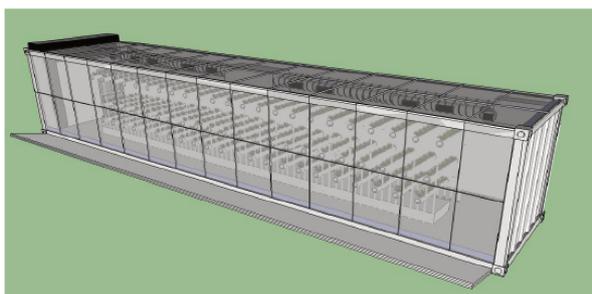


FIGURE 2.24 – Schéma de la CING [81]

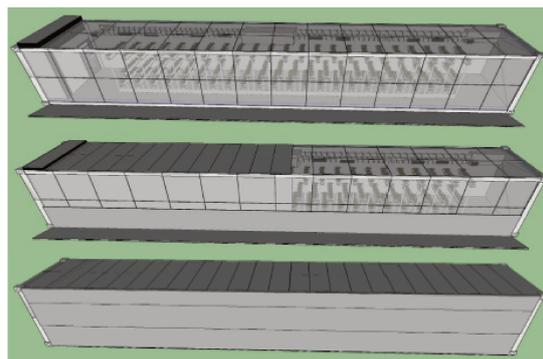


FIGURE 2.25 – Transformation de la CING de serre (haut) en chambre de culture (bas) [81]

Il s'agit d'un container de 33 m^2 (cf. Figure 2.24) orienté suivant l'axe est-ouest et dont le toit et le mur sud ont été remplacés par du polycarbonate de 3 mm d'épaisseur. Les autres parois (plancher, mur nord et latéraux) sont isolés grâce à des panneaux de polystyrène. Le passage du mode serre au mode chambre de croissance se fait grâce au déploiement de panneaux en acier isolés sur les parois latérales (cf. Figure 2.25). Au niveau de la culture des plantes, un système vertical d'hydroponie sur film nutritif (nutrient film technique, NFT) (cf. Figure 2.26) a été choisie afin d'optimiser l'espace disponible. De plus, ce système est équipé de moteur permettant aux bacs de culture de pivoter par rapport à un axe vertical en fonction de la luminosité pour maximiser l'absorption de lumière par les plantes.

Quand la CING est en mode chambre de culture ou quand les nuits sont trop longues, un système de diode électroluminescente (DEL) prend le relais pour apporter de la lumière aux végétaux. Certaines diodes sont fixées en haut du container, d'autres sont fixées au bas des systèmes hydroponiques (cf. Figure 2.27) afin d'éviter les effets d'ombrage et d'éclairer les systèmes situés plus bas. Un système CVC (chauffage, ventilation et climatisation) a également été conçu. Il sert à réguler le taux d'humidité et la température du container. Il est équipé d'un échangeur de chaleur pour limiter le refroidissement de la serre, ainsi que d'un condenseur pour récupérer l'eau contenue dans l'air intérieur. Un chauffe-air électrique a également été dimensionné pour les cas



FIGURE 2.26 – Système hydroponique (NFT) pivotant [81]

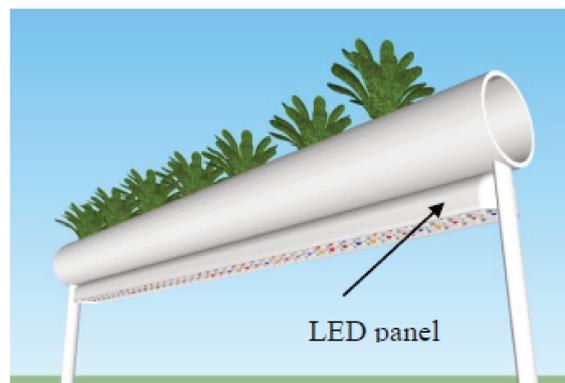


FIGURE 2.27 – Intégration de DEL sur le système hydroponique [81]

où l'isolation et la chaleur des DEL ne suffirait pas.

Enfin, une étude de coût a été menée. Elle conduit à une estimation de 35 700 \$ CA pour la construction du premier prototype. Les coûts d'opération, incluant l'électricité, l'eau, les nutriments et les graines sont évalués à 4 860 \$ CA par an tandis que la main d'œuvre (un salarié) serait de 25 000 \$ CA par an. La production a été estimée à 5 800 laitues par an. En considérant un poids moyen de 250 g par laitue [82], cela représente une production de 44 kg m^{-2} . Les auteurs concluent que sans salarié, la CING serait rentabilisée en 10 ans avec un prix de 1,45 \$ CA par laitue. Avec un salarié, le prix augmente à 5,8 \$ CA par laitue pour avoir un temps de retour sur investissement de 10 ans. Le prix des légumes dans le Nord est variable selon l'isolement de la communauté. Par exemple, une laitue coûte 1,50 \$ CA à Yellowknife (NWT, Canada) et 8,1 \$ CA à Paulatuk (NWT, Canada). Ainsi, selon le lieu de vente envisagé, les auteurs suggèrent de remplacer le salarié de la CING par des bénévoles de la communauté considérée.

Arctic Salad, le design de la serre d'Arviat, NU

Des étudiants de l'université de Guelph (Canada) ont imaginé un complexe composé de deux serres et d'une chambre de germination : Arctic Salad [83]. Il s'agit d'une étude n'ayant pas donné lieu à une construction. Les deux serres (l'une chauffée, l'autre non) auraient une surface de 375 m^2 tandis que la chambre de germination aurait une structure géodésique de 50 m^2 . La chambre serait utilisée pour les semis et commencerait à fonctionner 4 semaines avant la saison de culture qui durerait 26 semaines. Le système de culture utilisé serait l'hydroponie en raison de la plus grande facilité de contrôle de la croissance des plantes par rapport à la culture en sol, et du coût élevé d'importation de sol cultivable à Arviat. La serre chauffée grâce à des chauffages électriques ferait pousser des tomates, des poivrons, des concombres et des laitues. La serre non chauffée abriterait des pommes de terre, des oignons et des carottes. La puissance électrique nécessaire pour les chauffages, les pompes et les lampes pour la chambre de germination

est estimée en moyenne à 19 kW durant la saison de culture. Cette électricité serait fournie par une éolienne de 100 kW, le surplus d'énergie étant revendu au fournisseur d'électricité local (Nunavut Power Corporation). Cependant, il n'est pas fait mention d'un système de stockage de l'électricité produite.

Une étude économique a également été menée. La production annuelle des deux serres a été estimée à 8 800 kg, soit $11,8 \text{ kg m}^{-2}$. En vendant cette production localement, les serres pourraient ainsi générer 73 500 \$ CA par an. Cela représente un coût moyen de 8 \$ CA kg^{-1} . En ajoutant la revente de l'excédent d'énergie, l'estimation de la recette annuelle est de 86 000 \$ CA. L'évaluation du coût annuel d'opération est de 28 600 \$ CA. La construction du complexe est estimée à 896 000 \$ CA ce qui représente un gros coût d'investissement par rapport aux autres serres recensées (Naujaat, Iqaluit). On peut ainsi calculer un temps de retour sur investissement de plus de 15 ans.

L'étude sur la serre communautaire du nord de Slokan, BC

Slokan est une ville située en Colombie-Britannique, à 50° de latitude nord. Une étude de faisabilité sur la construction d'une serre communautaire a été effectuée en 2010 [84]. Cette étude envisage la construction de deux serres de 135 m^2 pour faire pousser des tomates, concombres, poivrons et salades en terre ainsi que l'aménagement de deux parcelles de 45 m^2 en extérieur pour cultiver des baies (fraises et framboises). Les serres seraient communautaires dans la mesure où elles permettraient aux habitants de cultiver leur légumes, mais il y aurait également un aspect commercial avec la vente de la production horticole aux membres de la communauté et aux restaurants locaux. L'enveloppe des serres serait constituée de polycarbonate double vitrage et des lampes seraient utilisées pour stimuler la croissance des plantes. Un système de ventilation serait également mis en place afin de refroidir la serre l'été. Ce système ainsi que celui d'éclairage seraient alimentés par des panneaux photovoltaïques disposés près des serres. Le chauffage serait assuré par une chaudière à gazéification du bois.

Les auteurs de cette étude ont développé un logiciel leur permettant d'estimer la production des serres en fonction des plantes cultivées. Leurs résultats envisagent une production annuelle potentielle de 5 800 kg (soit 18 kg m^{-2}). Les coûts d'opération annuels (salaire d'un gérant de serre, énergie) sont estimés à 45 500 \$ CA tandis que l'investissement initial pour la construction des serres est évalué à 75 000 \$ CA. En prenant en compte les bénéfices de la vente des légumes et des baies, et en incluant une levée de fonds locale de 5 000 \$ CA par an, les auteurs calculent un temps de retour sur investissement de 16 ans. Ce temps de retour est le même que dans l'étude précédente sur la serre d'Arviat alors que l'investissement initial est dix fois moins élevé. Cela vient du fait que le coût annuel d'opération envisagé pour Arviat est moins élevé que pour

Slocan tandis que les recettes considérées sont plus importantes grâce à une production végétale plus élevée et à la revente de l'énergie produite excédentaire.

2.3 Discussion

Les caractéristiques principales des serres nordiques recensées sont résumées dans le Tableau 2.1. Les prototypes et les études de faisabilité de la partie 2.2.4 n'ont pas été incluses dans ce tableau. La géométrie de type arche modifiée (cf. partie 1.2.1) a été intégré à la catégorie quonset pour plus de lisibilité.

Parmi les 20 serres recensées, 10 sont communautaires, 7 sont à but commercial et 3 sont des serres dédiées à la recherche. On peut tout d'abord remarquer que la construction de serres nordiques est un phénomène relativement récent. Hormis le projet de recherche de Keewatin Garden et al. (cf. partie 2.2.3) dont les constructions n'existent plus, toutes les serres nordiques recensées ont été bâties entre 1999 et 2018 (cf. Figure 2.28). Un peu plus de la moitié de ces serres ont été construites après 2010.

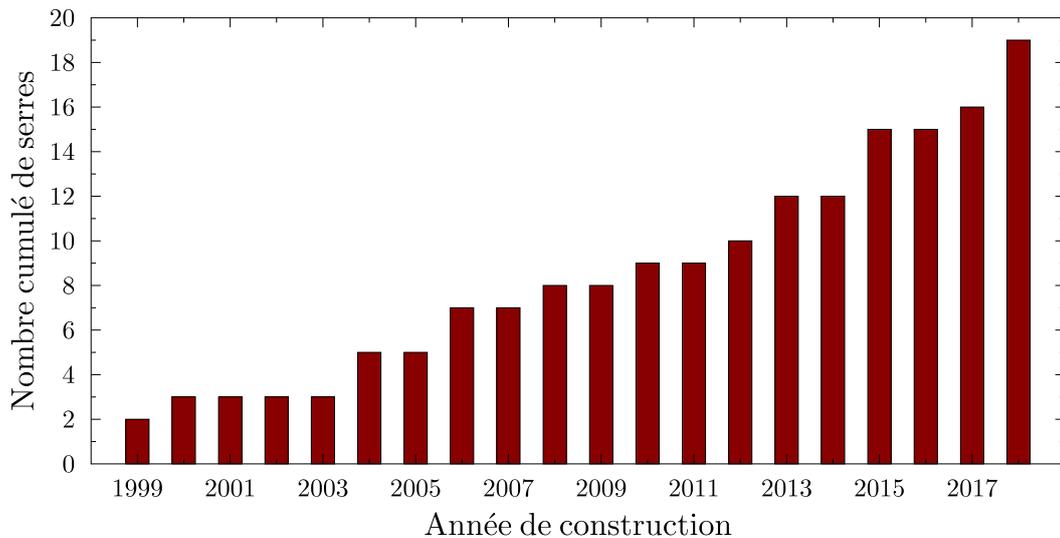


FIGURE 2.28 – Nombre cumulé du nombre de serres en fonction de l'année de construction

On peut également noter que la répartition de la superficie des serres est très disparate. Les superficies varient entre 21 m^2 pour la plus petite, ACMG, et 810 m^2 pour la plus grande, Inuvik. La moyenne des superficies relevées est de 247 m^2 avec un écart-type de 251 m^2 ce qui montre la grande dispersion des valeurs.

TABLEAU 2.1 – Les différentes serres nordiques et leurs principales caractéristiques

Lieu	Année de construction	Surface (m ²)	Géométrie	Enveloppe	Saison de culture (mois)	Chauffage/Stockage
<i>Serres communautaires</i>						
Kuujuuaq	1999/2012	2×140	Quonset	Polycarbonate	4	Aucun
Inuvik	1999	370 + 440	Quonset	Polycarbonate	4	Aucun
LSCFN	2000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Iqaluit	2006	90	Even-span	Polycarbonate	4	Stockage journalier (20 bidons de 114 L d'eau)
Invermere	2008	186	Serre chinoise	Polycarbonate	10	Stockage saisonnier géothermique
FAFN	2010	30	Even-span	Polycarbonate	6	Chauffage au diesel
Hay river	2013	420	Quonset	Polyéthylène	5	Aucun
Hay river	2015	75	Dôme	Polycarbonate	5	Aucun
Kangiqualujuaq	2018	N/A	Quonset	Polycarbonate	N/A	N/A
<i>Serres commerciales</i>						
Chena Springs	2006	550	Quonset	Double poly-films	12	Chauffage basé sur une source géothermique
TSNPN	2013/2017	2×650	Quonset	Polycarbonate	12	N/A
Naujaat	2015	120	Dôme	Polycarbonate	7	Stockage journalier (eau)
Kasaan	2015	80	Quonset	Polycarbonate	N/A	Chauffage au bois
Arviat	2018	2×120	Dôme	Polycarbonate	N/A	Stockage journalier (eau)
<i>Serres de recherche</i>						
Keewatin Gardens et al.	1986	28	Dôme	Polyéthylène	N/A	Aucun
Elie	2004	210	Serre chinoise	Polyéthylène	N/A	Couverture thermique et stockage (sable)
Île Devon (ACMG)	2004	21	Even-span	Polycarbonate	N/A	Chauffage au gaz

2.3.1 Choix des cultures

Le choix des légumes cultivés dans une serre est un facteur important. En effet, un des moyens de définir la saison de culture est le nombre de jour consécutifs au-dessus d'une température seuil [26]. Or, cette température dépend fortement des cultures considérées. Par exemple, le site du ministère de l'agriculture de l'Ontario (Canada) indique que la température optimale du sol pour les semis de bok choy se situe au-dessus de 5 °C [85] alors qu'elle doit être comprise entre 25 °C et 30 °C [86] pour les concombres orientaux. Ainsi, augmenter la saison de culture passe par le choix des cultures produites, en choisissant des cultures froides pour le début et la fin de saison de culture. La plupart des serres recensées font pousser des légumes adaptés aux températures froides comme des légumes verts (épinards, blettes, laitues, bok choy, choux kale), des carottes, des pois ou des navets. Il est également possible de faire pousser des légumes nécessitant une température plus élevée (comme des tomates), mais cela doit être fait en milieu de saison. La serre de Chena Springs (cf. partie 2.2.2) fait pousser des tomates toute l'année, mais cela est possible grâce à la proximité d'une source géo-thermale fournissant de l'énergie sous forme de chaleur et d'électricité grâce à une centrale géothermique.

La quantité de culture produite est difficile à évaluer, les chiffres sont difficiles à trouver (voire inexistants) et très disparates. Par exemple, des mesures de la masse de végétaux récoltés dans la serre de Kuujjuaq montrent une production d'une tonne de légumes dans les deux serres durant toute la saison de culture [5]. Cela représente 4,1 kg m⁻² de production. Les serres de Hay River rapportent une production de 6 kg m⁻² et la serre de Chena Spring une production de 7,3 kg m⁻². La serre de Naujaat envisage de produire jusqu'à 6 tonnes par an ce qui représente 50 kg m⁻². L'écart très important entre ces chiffres s'explique par plusieurs raisons. Le chiffre de 6 tonnes par an est une projection d'une entreprise commerciale, basée sur un hypothétique fonctionnement annuel, tandis que les autres chiffres sont des mesures. Les périodes de culture prises en compte pour Kuujjuaq, Hay River et Chena Springs sont respectivement 4 mois, 5 mois et 12 mois. Ainsi, l'indicateur de culture en kg m⁻² ne prend pas en compte le temps de culture. On peut également noter que la serre de Chena Springs cultive environ 100 000 fleurs par an (cf. partie 2.2.2) qui ne sont pas comptées dans le poids des récoltes. Par ailleurs, les cultures poussent dans le sol à Kuujjuaq, Hay River et Chena Springs tandis que Naujaat utilise un système d'hydroponie verticale, optimisant ainsi la surface de culture par rapport à la surface au sol.

2.3.2 Conception et saison de culture

La durée des saisons de cultures est assez différente selon les serres. Cela peut aller de 4 mois (comme la serre d’Iqaluit) à 12 mois (comme la serre de Chena Springs, cf. Figure 2.29).

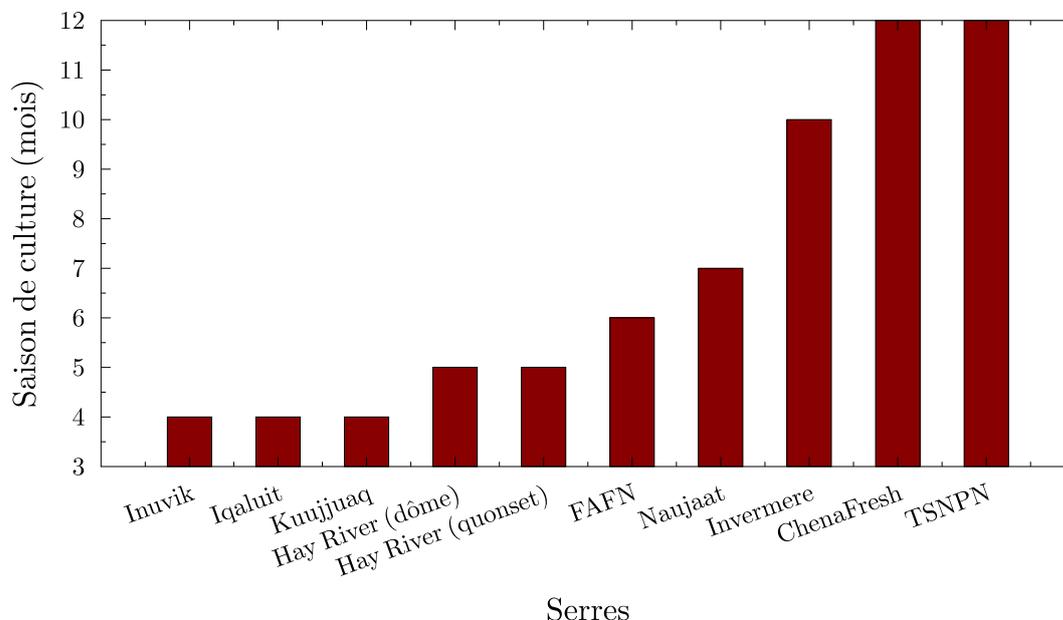


FIGURE 2.29 – Les différentes durées de saison de culture

Ces différences sont dues à plusieurs facteurs. Les serres commerciales ont un objectif de rentabilité, et augmentent donc leur saison de culture à l’aide de système de stockage ou de chauffage. La serre de Chena Springs utilise la géothermie tandis que les serres de Naujaat et d’Arviat utilisent un système de stockage de la chaleur sous forme d’une cuve d’eau. Ces serres sont également spécifiquement conçues pour un climat froid (cf. partie 2.2.2). A contrario, les serres communautaires de Kuujuaq, d’Inuvik et d’Hay River n’utilisent aucun système énergétique pour allonger leur saison de culture. La serre d’Iqaluit utilise une masse thermique sous la forme de bidons d’eau mais sa saison de culture est comparable à celle d’Inuvik. Cela est dû au fait que le climat d’Iqaluit est un peu plus froid que celui d’Inuvik [87, 88]. En effet, bien qu’Iqaluit soit à une latitude un peu plus basse, les températures locales sont influencées par les vents venant de la baie de Frobisher [32]. La serre de FAFN a une saison de culture un peu plus longue (6 mois) car elle utilise un chauffage alimenté par du propane liquide et que sa surface est petite par rapport aux autres serres (30 m^2), la rendant plus facile à chauffer. La serre d’Invermere a la saison de culture la plus longue des serres communautaires (10 mois) grâce à une géométrie pensée pour le climat froid ainsi qu’un système de stockage saisonnier de la chaleur sous forme géothermique. Le climat y est également plus clément que dans d’autres communautés puisque la moyenne mensuelle

de température y est de -10°C lors du mois le plus froid de l'année (janvier) [89] quand elle est de -25°C à Kuujuaq [90].

La plupart des serres communautaires ne sont donc pas pensées pour le climat nordique en amont de la conception. Ce sont souvent des serres importées du sud du Canada, sans aucune modification. Il s'agit donc de serres « conventionnelle », n'ayant aucun mur isolé, avec une enveloppe faite de polycarbonate ou de polyéthylène. Parmi les 20 serres recensées, 9 ont une géométrie quonset, 5 sont des dômes, 3 ont une géométrie even-span et seulement 2 sont de type « serres chinoises ». Or les travaux sur la serre d'Elie et l'exemple de la serre d'Invermere montrent que les serres chinoises sont plus adaptées aux climats froids. Les paramètres clés semblent être l'isolation du mur nord, et une orientation est-ouest de l'axe long afin d'avoir une grande surface vitrée exposée directement au sud.

Conclusion et objectifs de la thèse

Cette première partie nous a permis de mieux définir les objectifs de cette thèse. Le premier chapitre a permis de se familiariser avec les serres en présentant leur utilité, leur fonctionnement climatique général, les différentes géométries de ces structures ainsi que les principaux matériaux utilisés pour l'enveloppe.

Ensuite, nous avons vu que les serres communautaires actuelles sont peu adaptées au climat circumpolaire. Encore récemment, une serre identique à celle de Kuujjuaq a été construite durant l'été 2018 à Kangiqsualujjuaq (Nunavik, Canada). La construction de serres qui ne sont pas spécifiquement conçues pour le Nord est due au manque de recherches scientifiques dans ce domaine [28,29] et au manque d'information sur le sujet pour les communautés concernées. Le manque de retour d'expériences et de données, notamment énergétiques (températures, consommations de chauffage ou d'électricité), rend également difficile l'analyse et l'amélioration du comportement thermique de telles serres. Bien que la géométrie des serres chinoises apparaît comme la plus adaptée au climat froid, il semble difficile d'adapter cette géométrie à des serres existantes sans les reconstruire. Ce travail de recherche s'est donc tournée dans un premier temps vers l'amélioration du comportement thermique d'une serre déjà construite, en l'occurrence celle de Kuujjuaq. Afin d'éviter d'utiliser trop d'énergies fossiles, la piste du stockage de chaleur a été préférée à celle du chauffage et cela s'est fait en plusieurs étapes.

Tout d'abord, nous avons vu que l'instrumentation de serres nordiques est un point important. Cela permet d'acquérir des données de température extérieure et intérieure, d'ensoleillement et d'humidité notamment. Ces données sont cruciales pour comprendre le comportement thermique des serres, envisager des pistes d'optimisation et quantifier les besoins énergétiques des serres nordiques. Ces données quasiment inexistantes dans la littérature pourraient servir à la communauté scientifique afin de faire des analyses ou de la recherche sur le sujet. Dans ce but, l'instrumentation et l'analyse des données récoltées au sein de la serre de Kuujjuaq est présenté dans le chapitre 3.

Ensuite le développement de systèmes permettant d'améliorer le comportement des serres existantes semble nécessaire. À ces fins, la conception et la construction d'un système de stockage de la chaleur dans la serre de Kuujjuaq est exposé dans le chapitre 4 et l'impact de l'installation de ce système sur le climat à l'intérieur de la

serre est analysé dans le chapitre 5.

Enfin, le développement d'un modèle du comportement thermique de serres apparaît comme important. Les communautés nordiques sont souvent isolées et peuvent être accessibles uniquement par avion ou par bateau. Cela engendre un coût de transport pour le matériel et les personnes. Il est donc important de pouvoir simuler la mise en place de systèmes de chauffages ou de stockage thermique afin de limiter ces coûts. Par ailleurs, la simulation du comportement thermique de serre nordique permettrait d'en améliorer la conception en effectuant des études paramétriques sur la géométrie ou l'orientation. Ainsi, le développement d'un modèle numérique du climat sous serre est présenté dans le chapitre 6. Le chapitre 7 se focalise sur la calibration des valeurs numériques des paramètres de ce modèle afin de le valider. Finalement, le développement d'un modèle du système de stockage, indépendant de celui de la serre, est détaillé et calibré au sein du chapitre 8.

Deuxième partie

Approche expérimentale : la serre de Kuujuaq

Chapitre 3

Étude initiale de la serre

Sommaire

3.1	Présentation de Kuujjuaq et de ses serres	46
3.2	Instrumentation	48
3.3	Analyse des données	51
3.3.1	Le climat extérieur	51
3.3.2	Le climat intérieur	53

Ce chapitre présente la serre de Kuujuaq qui sera celle étudiée par la suite. Après une présentation de cette dernière dans la partie 3.1, l'ensemble des capteurs installés afin de recueillir les données climatiques est décrit dans la partie 3.2 tandis que l'étude du comportement thermique de la serre basée sur l'analyse des données collectées est présentée dans la partie 3.3.

3.1 Présentation de Kuujuaq et de ses serres

Le Nunavik est le territoire septentrional du Québec, situé au-delà du 55^e parallèle nord. Quatorze communautés inuites se trouvent sur ce territoire dont la capitale régionale, Kuujuaq, qui est un village de près de 3000 habitants situé à 58° de latitude nord (cf. Figure 3.1).



FIGURE 3.1 – Localisation de Kuujuaq (GoogleEarth)

Comme les treize autres communautés du Nunavik, Kuujuaq est un territoire isolé : aucune route terrestre ne permet de s'y rendre et le village dispose d'un réseau électrique autonome basé sur des génératrices électriques fonctionnant au gazoil.

Deux serres communautaires quasiment identiques y ont été construites, l'une au début des années quatre-vingt-dix [28] (surnommée l'ancienne serre, à droite sur la Figure 3.2), l'autre en 2013 (surnommée la nouvelle serre, à gauche sur la Figure 3.2). La nouvelle serre a été l'objet d'étude d'une partie de la thèse d'Ellen Avard (2015) [28] qui a démontré la faisabilité technique ainsi que l'acceptabilité sociale de ce projet par la plupart des Kuujjuamiut (habitants de Kuujuaq).

Ces serres, d'environ 140 m² chacune, sont construites en polycarbonate alvéolé double vitrage, et ne comportent aucun système de chauffage ou de stockage thermique.



FIGURE 3.2 – Vue extérieure des serres de Kuujuaq

Elles ont une géométrie quonset et sont orientées nord-est/sud-ouest suivant leur axe long (cf. Figure 3.3).



FIGURE 3.3 – Vue aérienne des serres de Kuujuaq (CNES)

Afin d'éviter de trop hautes températures en été, les serres sont équipées d'un système de ventilation automatique. La première étape est une ventilation active avec la mise en route d'un ventilateur, la seconde est une ventilation passive avec l'ouverture du toit. Ces serres sont la propriété du Village Nordique (VN, équivalent d'une mairie) de Kuujuaq et comportent 46 parcelles de jardinage (24 pour la nouvelle serre et

22 pour l'ancienne serre), d'environ 4 m^2 [5] (Figure 3.4). Ces parcelles sont attribuées gratuitement aux résidents du village lors d'un tirage au sort. Chaque personne ayant accès à un lot de jardinage est libre d'y faire pousser ce qu'il veut, tant que cela est à but alimentaire.



FIGURE 3.4 – Vue intérieure d'une des serres de Kuujuaq

En 2018, Lamalice et al. [5] ont demandé à six propriétaires de parcelles de peser leurs récoltes afin d'évaluer le type et la quantité de légumes produits. Les résultats montrent que la culture se compose principalement (à 64 %) de légumes verts (bok choy, choux kale, laitues, courgettes) cultivés en terre et que ces six parcelles avaient produit 148,3 kg de légumes en 2016. En extrapolant ces résultats aux 46 parcelles de jardinage, on obtient une capacité de production de 1 137 kg par an pour les deux serres [5] soit $4,1\text{ kg m}^{-2}$. La saison de culture dure 4 mois, de fin mai à fin septembre.

Afin de mieux comprendre le comportement thermique de ces serres et d'envisager des pistes pour allonger la saison de culture, une campagne d'instrumentation a été menée en 2016.

3.2 Instrumentation

Les campagnes se sont déroulées dans la serre la plus récente. Ainsi, à moins d'une indication contraire, on parlera de la serre de Kuujuaq pour désigner la nouvelle serre. La première campagne d'instrumentation s'est déroulée avant le début de cette thèse, en juin 2016 dans le cadre de l'étude de Lamalice et al. [5] (APR Niqiliriniq et Siqiniq, cf. chapitre). Cette campagne a permis d'installer un pyranomètre (CMP3 de

Kipp & Zonen, Figure 3.5) ainsi que 9 capteurs de température et d'humidité relative (enregistreur de température et d'humidité DL-121TH de Voltcraft, Figure 3.6).



FIGURE 3.5 – Pyranomètre CMP3 [91]



FIGURE 3.6 – Enregistreur de température et d'humidité DL-121TH [92]

Le pyranomètre (P1 sur la Figure 3.7) sert à mesurer l'éclairement énergétique (aussi appelé irradiance) solaire globale sur un plan horizontal. Cela signifie qu'il mesure l'ensemble du rayonnement solaire (diffus et direct) dans un champ visuel de 180° et dans une gamme spectrale allant de 300 à 2800 nm (rayonnement visible et infrarouge proche) [91]. Il fonctionne grâce à une sonde à thermopile qui convertit la mesure de l'irradiance en tension. Cette tension est ensuite envoyée à un enregistreur de données (« datalogger », Logbox-DA-64k-IP65 de Novus) qui stocke les valeurs d'irradiance. Ce datalogger externe au pyranomètre a une capacité de 64 000 points. La période d'acquisition choisie étant de 10 min la capacité de stockage du datalogger est de 444 jours consécutifs. Les plages de mesures et l'incertitude du pyranomètre et des enregistreurs DL-121TH peuvent être trouvés dans le Tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques des capteurs utilisés lors de l'étude initiale

Capteur	Plage de mesure	Incertainitude	Modèle	Fournisseur
Pyranomètre	0 W m^{-2} à 2000 W m^{-2}	20 W m^{-2}	CMP3	Kipp & Zonen
Thermomètre	-40°C à 70°C	1°C	DL-121TH	Voltcraft
Hygromètre	0 % à 100 %	3 %	DL-121TH	Voltcraft

Les enregistreurs de température et d'humidité relative sont intrinsèquement reliés à des dataloggers ayant une capacité d'enregistrement de 16 000 points. La période d'acquisition choisie étant de 30 min la capacité de stockage du datalogger est de 333 jours consécutifs. Un de ces capteurs a été placé à l'extérieur (T10 sur la Figure 3.7) tandis

que les autres ont été placés à diverses positions à l'intérieur de la serre (cf. Figure 3.7 et Figure 3.8) afin de pouvoir mesurer les gradients verticaux et horizontaux de température. Tous ces capteurs étaient placés dans des abris naturellement ventilés (i.e. munis de trous, Figure 3.9) afin de ne pas recevoir un flux solaire direct.

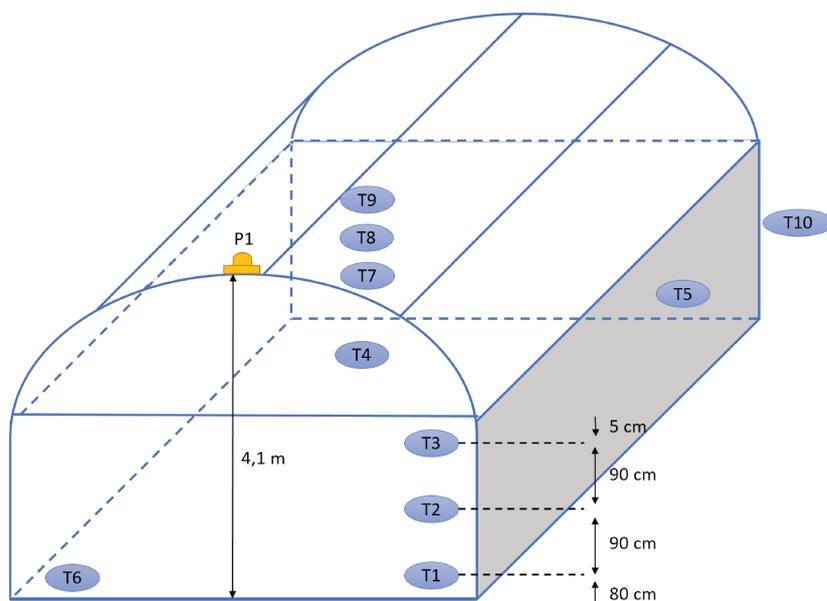


FIGURE 3.7 – Position des différents capteurs

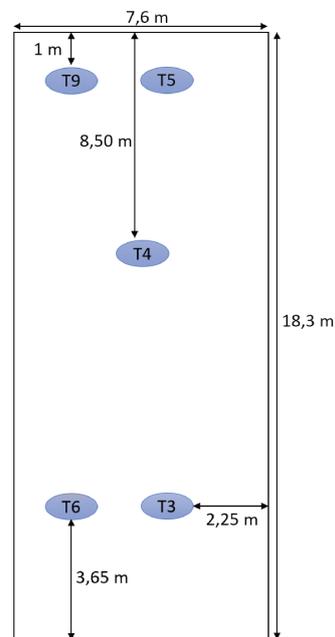


FIGURE 3.8 – Vue de dessus des capteurs

L'installation de ces capteurs a permis de récolter des données du 4 juin 2016 au 20 mai 2018, couvrant ainsi la majeure partie de la saison de culture 2016 et l'intégralité de la saison de culture 2017. Une analyse de ces données menant à l'étude du comportement thermique de la serre est proposée dans la prochaine partie.



FIGURE 3.9 – Abris des enregistreur de température et d’humidité DL-121TH

3.3 Analyse des données

La serre de Kuujjuaq est communautaire, ce qui signifie que chaque utilisateur est libre de venir arroser son lot quand il le souhaite. Or nous n’avons pas de contrôle sur cet intrant d’eau qui constitue un apport hydrique inconnu. Nous avons donc choisi de privilégier l’étude des températures et du flux solaire afin de caractériser le comportement thermique de la serre, en excluant l’analyse de l’évolution de l’humidité relative.

3.3.1 Le climat extérieur

D’après la classification des différents climats de Köppen-Geiger, Kuujjuaq fait partie des zones à climat polaire [93]. La Figure 3.10 présente l’ensoleillement journalier moyen par mois et les températures extérieures moyennes mensuelles de Kuujjuaq et De Bilt (Pays-Bas). Les Pays-Bas ont été choisis d’une part car la latitude de De Bilt (52°N) est du même ordre de grandeur que celle de Kuujjuaq (58°N) et d’autre part car les Pays-Bas sont souvent un des pays les plus froids à être étudié en terme de

serriculture. Par exemple Vanthoor (2011) [94] a développé un modèle thermique de serre ayant pour but de simuler leur climat intérieur, en fonction de leur emplacement géographique. Il a validé son modèle sur quatre serres étant situées dans trois zones climatiques différentes : le Texas et l'Arizona (USA) pour un climat semi-aride, la Sicile (Italie) pour un climat méditerranéen et les Pays-Bas pour un climat marin tempéré.

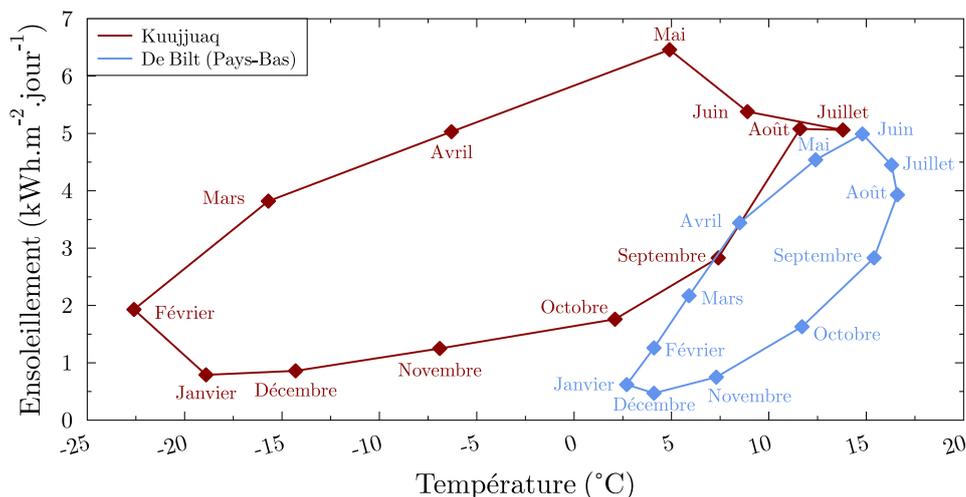


FIGURE 3.10 – Ensoleillement moyen journalier et températures extérieures moyennes mensuelles de Kuujjuaq et De Bilt (adapté de Castilla [10])

Cette figure doit être considérée qualitativement dans la mesure où les données de Kuujjuaq sont celles de l'année 2017 issues de la campagne d'instrumentation précédemment présentée, tandis que les données de De Bilt sont antérieures à l'année 1996 et correspondent à une année moyenne [10]. On peut cependant remarquer que les ensoleillements sont comparables tandis que les températures moyennes de Kuujjuaq sont bien inférieures. En effet la température moyenne la plus basse est de $-22,6^{\circ}\text{C}$ à Kuujjuaq en février tandis qu'elle est de $2,7^{\circ}\text{C}$ en janvier à De Bilt. A contrario, la température moyenne la plus haute est de $13,8^{\circ}\text{C}$ en juillet à Kuujjuaq alors qu'elle est de $16,6^{\circ}\text{C}$ à De Bilt en août. Toutefois, il faut noter que les archives climatiques canadiennes indiquent une température moyenne de $11,8^{\circ}\text{C}$ en juillet à Kuujjuaq entre 1981 et 2010 [95].

La Figure 3.11 présente les températures journalières moyennes, minimales et maximales à Kuujjuaq du 1^{er} mai 2017 au 31 octobre 2017. La saison de culture 2017 à Kuujjuaq s'est étendue du 30 mai 2017 au 07 octobre 2017.

Cette figure permet de se rendre compte de la difficulté à obtenir des légumes à Kuujjuaq : des températures extérieures minimales négatives avant et après la saison de culture ($-5,7^{\circ}\text{C}$ le 25 mai et $-6,8^{\circ}\text{C}$ le 18 octobre) mais également pendant la saison de culture ($-1,5^{\circ}\text{C}$ le 6 juin, $-0,1^{\circ}\text{C}$ le 30 juin et le 26 août, $-3,5^{\circ}\text{C}$ le 25 septembre par

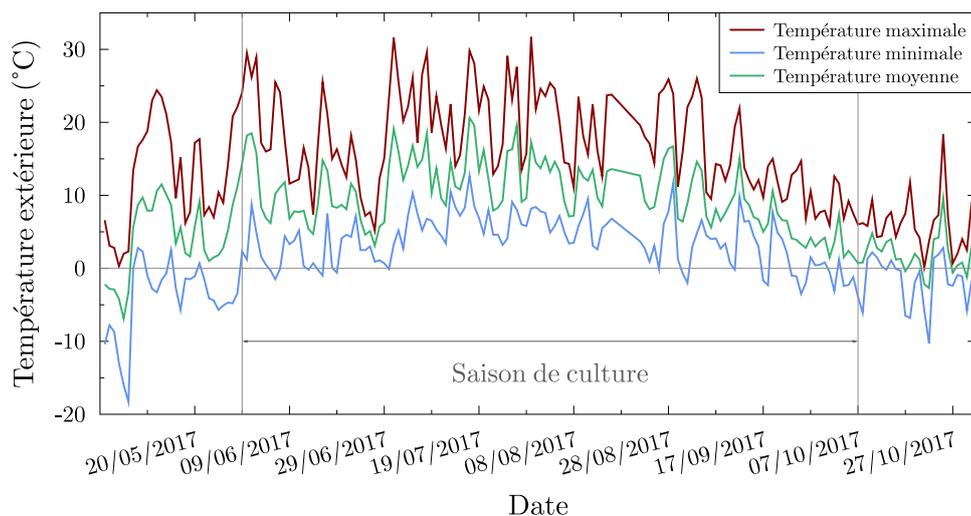


FIGURE 3.11 – Températures journalières moyennes, minimales et maximales à Kuujuaq en 2017

exemple). Ainsi, le nombre maximal de jours consécutifs sans température négative est de 55 jours (du 1^{er} juillet au 30 août). Or, selon Henshaw (2017) [26], un des moyens de définir la saison de culture est justement le nombre de jours consécutifs au-dessus d'une température seuil. Par ailleurs, la durée de la saison de culture à Kuujuaq est régie par le gel : elle commence quand la température journalière minimale est au-dessus de 0 °C (dans la mesure du possible) et s'arrête au moment des premières gelées de l'automne. En effet, le gel est susceptible de tuer les plantes [11]. Ainsi, si l'on applique le critère de Henshaw à une température de 0 °C, on aurait une saison de culture en extérieur de 55 jours. En outre, durant la saison de culture, les températures maximales oscillent entre 5,2 °C (le 27 juin) et 31,7 °C (le 30 juillet) et la température extérieure moyenne est de 10,1 °C. Ces différents éléments illustrent la nécessité d'une production horticole sous serre. Afin d'observer l'effet de ces températures extérieures sur le climat de la serre, une analyse des températures à l'intérieur de la serre est nécessaire.

3.3.2 Le climat intérieur

Homogénéité de la température

Plusieurs capteurs de température ont été installés à différentes positions (cf. Figure 3.7 et Figure 3.8) afin d'analyser l'homogénéité de la température intérieure de la serre. La Figure 3.12 présente la répartition de l'écart de température horizontal et de l'écart de température vertical au sein de la serre entre le 4 juin 2016 et le 15 octobre 2016. L'écart horizontal de température est calculé comme étant la différence maximale de température entre les capteurs 1, 5 et 6 tandis que l'écart vertical de

température est la différence maximale entre les capteurs 1, 2 et 3 (cf. Figure 3.7). Les données sont acquises à un pas de temps de 30 min et moyennées sur 1 h. Ces écarts sont présentés sur la Figure 3.12.

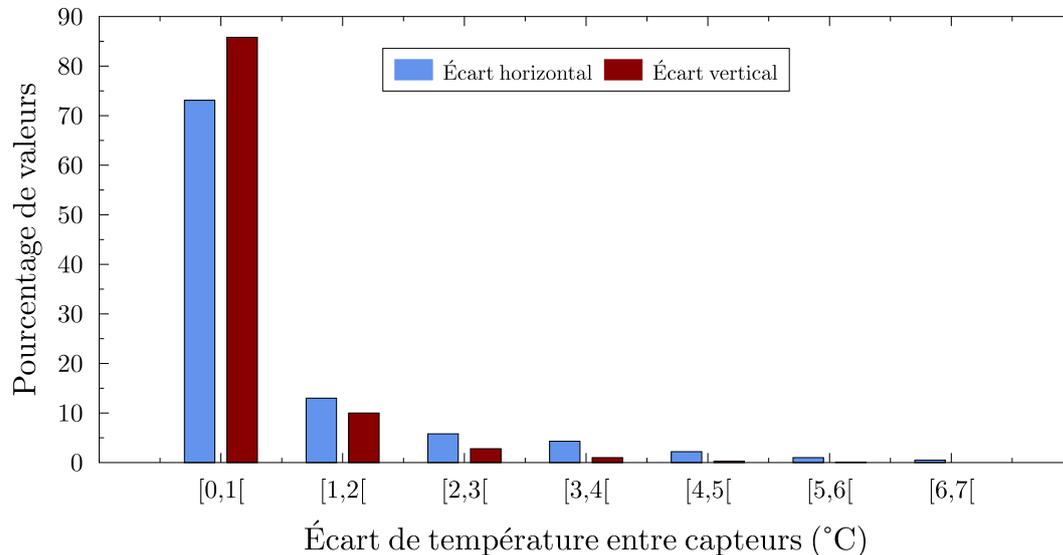


FIGURE 3.12 – Écart de température horizontal et vertical à l’intérieur de la serre durant la saison de culture 2016

Cette figure montre que 95,8% des valeurs d’écart vertical et 86,1% des valeurs d’écart horizontal sont strictement inférieures à 2°C. Or, les capteurs de température ont une précision de 1°C (cf. Tableau 3.1), ce qui signifie qu’un écart inférieur à 2°C est non significatif et peut être considéré comme négligeable. On peut donc en déduire que la température à l’intérieur de la serre est globalement homogène. Cependant, il faut noter que le capteur le plus élevé se trouve à 2,6 m de hauteur quand la serre a une hauteur maximale de 4,1 m. On peut alors supposer que la température dans le haut de la serre est un peu plus élevée que dans la partie basse, à cause des forces de flottabilité impliquant que l’air chaud (moins dense que l’air plus froid) se déplace vers le haut.

Étant donné l’homogénéité globale de la température à l’intérieur de la serre, l’analyse de cette température portera sur une moyenne des différents capteurs de température.

La température intérieure

La Figure 3.13 présente les températures journalières maximales et minimales à l’intérieur de la serre, ainsi que l’ensoleillement extérieur journalier du 1^{er} mai 2017 au

31 octobre 2017, soit les mêmes dates que celles utilisées pour l'analyse du climat extérieur. L'ensoleillement extérieur journalier est obtenu en intégrant sur chaque journée l'irradiance extérieure mesurée par le pyranomètre.

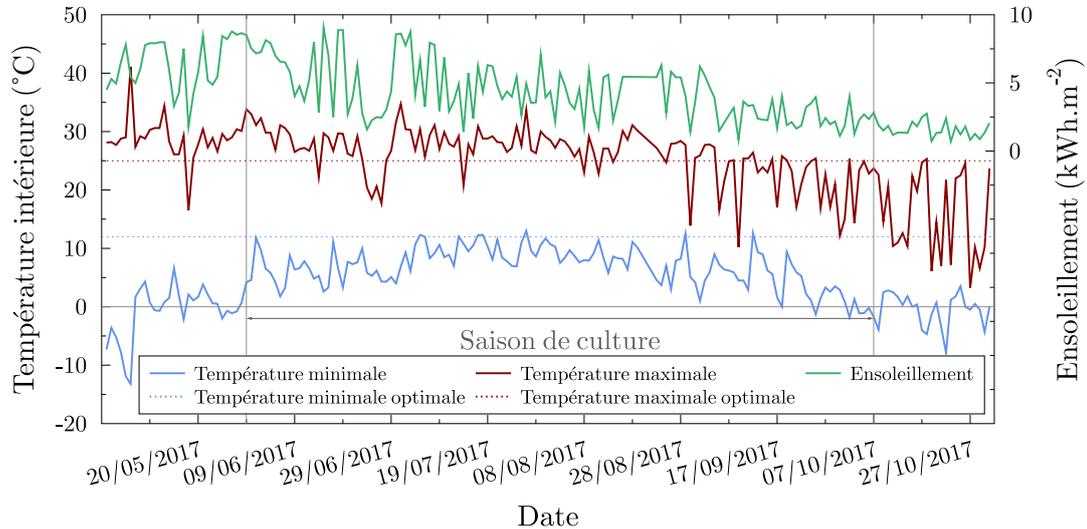


FIGURE 3.13 – Températures journalières minimales et maximales à l'intérieur de la serre et ensoleillement journalier extérieur en 2017

D'après Zabeltitz [11], la croissance et le développement des légumes cultivés dans une serre sont affectés quand la température descend au-dessous de 12°C (T_{min}^{opt}). Selon Castilla [10], la température maximale optimale (T_{max}^{opt}) pour le type de légumes cultivé à Kuujuaq (laitues, bok choy, choux kale) est de 25°C . Ces deux optimums de température sont indiqués sur la Figure 3.13.

On peut tout d'abord remarquer que l'installation d'une serre permet de fournir un climat plus propice à la culture. En effet, le nombre maximal de jours consécutifs sans température négative est de 118 jours (du 29 mai au 24 septembre), des dates très proches de la saison de culture réelle (130 jours, du 30 mai au 07 octobre). Cette période de 118 jours correspond à plus du double de la durée sans température négative à l'extérieur (55 jours, cf. partie 3.3.1). Ensuite, on peut noter que les températures minimales sont en-deçà de la température minimale recommandée. En effet, la température minimale moyenne à l'intérieur de la serre durant la saison de culture est de $6,7^{\circ}\text{C}$, soit plus de 5°C en dessous de la température minimale optimale. Plus de 92 % des nuits de la saison de culture ont connu une température inférieure à 12°C . La température maximale moyenne à l'intérieur de la serre durant la saison de culture est de $26,1^{\circ}\text{C}$, un peu plus de 1°C au-dessus de la température maximale optimale. Plus de 71 % des journées de la saison de culture ont connu une température supérieure à 25°C . On peut également noter un amenuisement de la ressource solaire durant la fin de la saison de culture : l'ensoleillement journalier est en moyenne de 5 kWh m^{-2} du 30 mai

au 3 septembre alors qu'il est de $2,5 \text{ kWh m}^{-2}$ du 4 septembre au 7 octobre. On peut voir un effet direct de la baisse de l'ensoleillement sur les températures journalières maximales qui chutent à partir du 30 août sur la Figure 3.13.

On peut remarquer qu'il existe un fort écart entre les températures diurnes et nocturnes : la moyenne de la différence entre les températures journalières maximales et minimales est de $19,4^\circ\text{C}$ durant la saison de culture 2017. Ce phénomène de forte amplitude thermique entre le jour et la nuit est particulièrement visible si on analyse les données à l'échelle d'une journée. La Figure 3.14 présente la température à l'intérieur de la serre le 11 et 12 mai 2017, une période qui fait partie des moments avec une température légèrement négative durant la nuit, empêchant la saison de culture de commencer plus tôt.

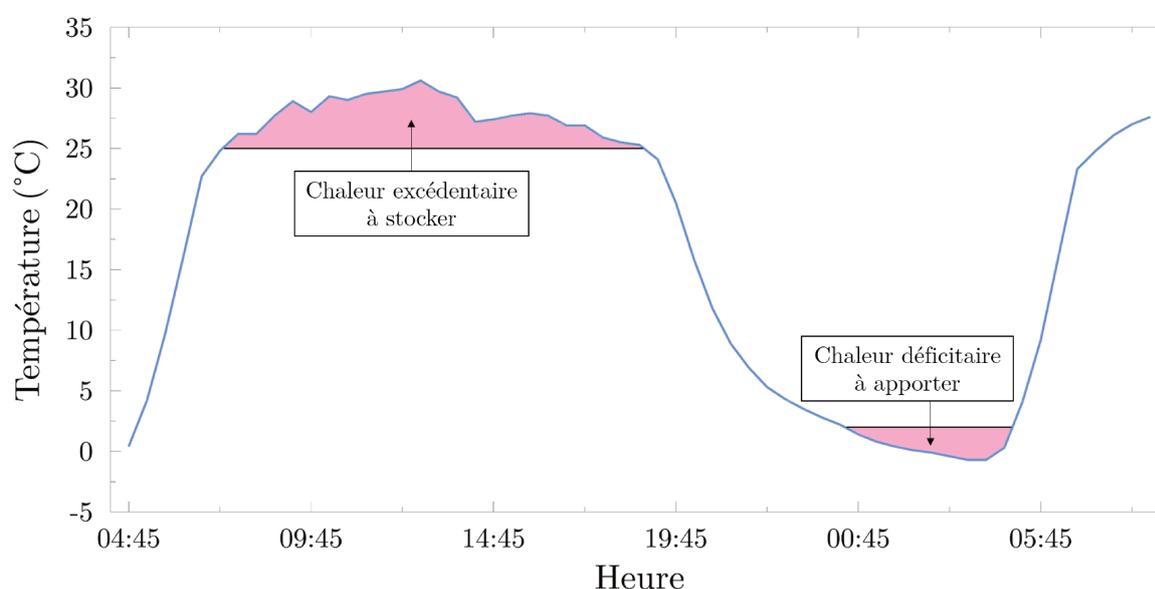


FIGURE 3.14 – Température à l'intérieur de la serre entre le 11 mai et le 12 mai 2017

Les températures maximale et minimale sur la Figure 3.14 sont respectivement de $30,6^\circ\text{C}$ et $-0,7^\circ\text{C}$, ce qui donne un écart de température jour/nuit de $31,3^\circ\text{C}$. Deux zones sont mises en évidence sur cette figure : la première représente la période où la température est supérieure à 25°C , la température maximale optimale selon Castilla [10]. La seconde zone représente la période où la température est inférieure à 2°C . Cette température seuil représente la température à partir de laquelle il devient possible de commencer à faire pousser des plantes ($T_{min}^{abs} = 0^\circ\text{C}$) assortie d'une marge de sécurité de 2°C .

L'analyse de la Figure 3.13 et de la Figure 3.14 montre donc que la température à l'intérieur de la serre est trop élevée durant la journée et trop basse pendant la nuit. Cette situation implique deux problèmes : le premier réside dans le fait que la température à l'intérieur de la serre est négative avant le début et après la fin de la saison de culture expliquant ainsi la courte période de culture à Kuujjuaq ; le second

est que la température au cours de la majorité de la saison de culture n'est pas optimale pour la croissance des plantes, pouvant ainsi freiner leur développement. Or ces deux problématiques peuvent être améliorées en considérant l'installation d'un système de stockage de la chaleur. Il est difficile d'estimer l'impact d'un tel système sans un modèle dynamique prenant en compte la ressource solaire et la température extérieure. Cependant, à titre d'exemple, un système de stockage permettant d'augmenter la température journalière minimale de 5 °C aurait pour effet d'augmenter de 41 % (49 jours) le nombre de jours consécutifs sans température négative et donc d'allonger la saison de culture. Cela permettrait également d'avoir plus de 50 % de la saison de culture avec une température minimale supérieure à 12 °C. Le fonctionnement du système de stockage serait alors de stocker la chaleur excédentaire de la journée pour la restituer durant la nuit comme indiqué sur la Figure 3.14.

En partenariat avec le comité des serres de Kuujjuaq, l'Administration Régionale Kativik (ARK, gouvernement local) et le VN de Kuujjuaq, il a été décidé de concevoir et d'installer un système de stockage afin de répondre aux problématiques évoquées ci-dessus. Ce travail a commencé par une étude bibliographique afin de déterminer le type de système à mettre en place.

Chapitre 4

Conception d'un système de stockage thermique

Sommaire

4.1	Étude bibliographique	60
4.1.1	Type de stockage	60
4.1.2	Les systèmes air/roches récents	61
4.1.3	Les indicateurs de performance	64
4.2	Conception et dimensionnement	66
4.2.1	Principe	66
4.2.2	Calcul des pertes de charge	68
4.3	Construction et mise en fonctionnement	70

Le chapitre précédent a mis en avant la pertinence de l'installation d'un système de stockage thermique dans la serre de Kuujuaq. Ce chapitre présente le choix d'un tel système et de ses indicateurs de performance en se basant sur une étude bibliographique dans la partie 4.1, la conception et le dimensionnement du système dans la partie 4.2 ainsi que sa construction et sa mise en fonctionnement dans la partie 4.3.

4.1 Étude bibliographique

Les contenus de cette sous-partie et du chapitre 5 sont partiellement issus de l'article de Piché et al. (2020) [96].

4.1.1 Type de stockage

Il existe trois types de stockage de l'énergie thermique : sensible, latent et thermo-chimique. Si les technologies de stockage thermo-chimique sont encore à l'échelle de laboratoire, les stockages sensible et latent bénéficient de technologies matures déployées à l'échelle industrielle [97]. Ces technologies sont utilisées depuis plus de 40 ans dans le domaine de la sericulture. Taki et al. (2017) [98] ont effectué une revue de littérature des principaux systèmes de stockage au sein de serres, portant sur une cinquantaine de publications scientifiques parues entre 1978 et 2005. Parmi les systèmes étudiés, 20 % étaient basés sur du stockage latent, 20 % utilisaient du stockage sensible dans de la roche, 25 % se servaient d'un stockage sensible dans le sol (stockage géo-thermique) et 35 % utilisaient de l'eau en tant que matériau de stockage sensible. Le stockage sensible dans des matériaux solides est une bonne option car ce processus est moins cher que le stockage latent ou thermo-chimique et qu'il est plus facile à mettre en place [97]. Il paraît donc mieux adapté à des régions isolées telles que le Nunavik, d'autant plus qu'il permet l'utilisation de matériaux locaux (comme les roches). Par ailleurs, les roches semblent mieux adaptées que l'eau dans la mesure où on évite les problèmes de changement volumique en cas de température négative. La recherche bibliographique s'est donc tournée vers les systèmes de stockage dans les serres se basant sur l'air en tant que fluide caloporteur et sur la roche comme matériau de stockage. Santamouris et al. (1994) [99] ont identifié 14 systèmes air/roches installés dans des serres entre 1978 et 1989. Les résultats indiquent que l'installation d'un tel type de système permet d'augmenter la température intérieure de 3 °C à 6 °C par rapport à la température extérieure.

4.1.2 Les systèmes air/roches récents

Quatre études plus récentes portant sur des systèmes air/roches au sein de serres ont également été identifiées. Les caractéristiques principales de ces systèmes sont indiqués dans le Tableau 4.1.

Ce tableau montre que deux types de système de stockage sont utilisés. Le premier consiste à enterrer les roches dans des tubes cylindriques et à souffler directement l'air dans ces tubes à l'aide d'un ou plusieurs ventilateurs. Ce concept a été testé en 1996 dans une serre de 240 m² en Algérie [22] (cf. Figure 4.1) et en 2019 dans une serre de 15 m² au Maroc [25] (cf. Figure 4.2). Le second type consiste à creuser le sol de la serre pour former des canaux à remplir de roches. L'air est soufflé grâce à des ventilateurs ainsi qu'un système de distribution d'air. Ce genre de système a également été testé à deux échelles différentes : en 2003 dans une serre de 15 m² en Turquie [23] (cf. Figure 4.3) et en 2018 dans une serre de 165 m² au Maroc [24] (cf. Figure 4.4).

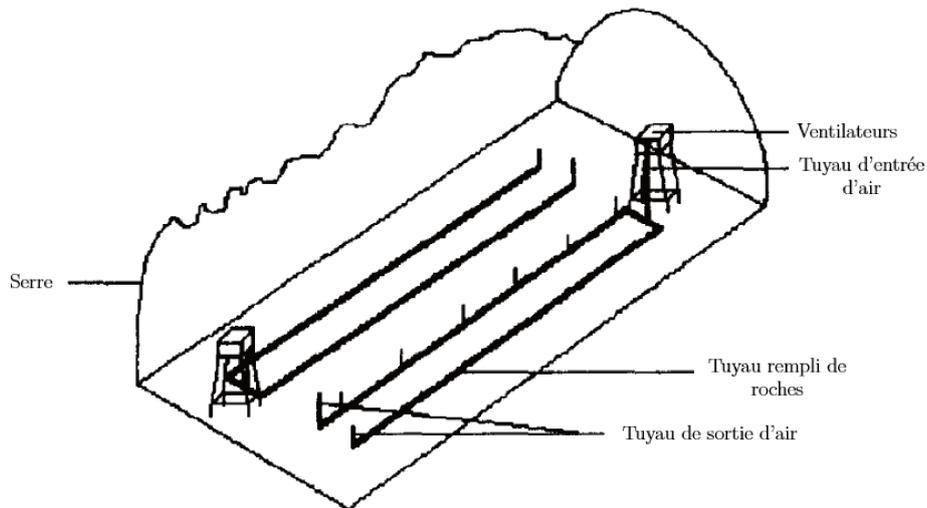


FIGURE 4.1 – Système de stockage installé à Alger en 1996 (adapté et traduit de Bouhjdjar et al. (1996) [22])

La granularité de la roche (diamètre des roches, D_{roc}) au sein de ces systèmes varie entre 0,032 m et 0,1 m avec une moyenne de 0,06 m. La moyenne de la porosité (ou fraction de vide, ε_{lit} , définie par le rapport du volume d'air sur le volume total du système) est de 0,41. La masse de roches installée est très différente d'un système à l'autre. Afin de pouvoir les comparer, la masse surfacique de roche (masse de roche par unité de surface de la serre) a été calculée et est disponible dans le Tableau 4.1. La masse surfacique des systèmes présentés par Bouhjdjar et al. (1996) [22], Bazgaou et al. (2018) [24] et Gourdo et al. (2019) [25], respectivement 29 kg m⁻², 63 kg m⁻² et 15 kg m⁻² est du même ordre de grandeur, tandis que le système décrit par Kürklü et al. (2003) [23] contient beaucoup plus de roches : 536 kg m⁻².

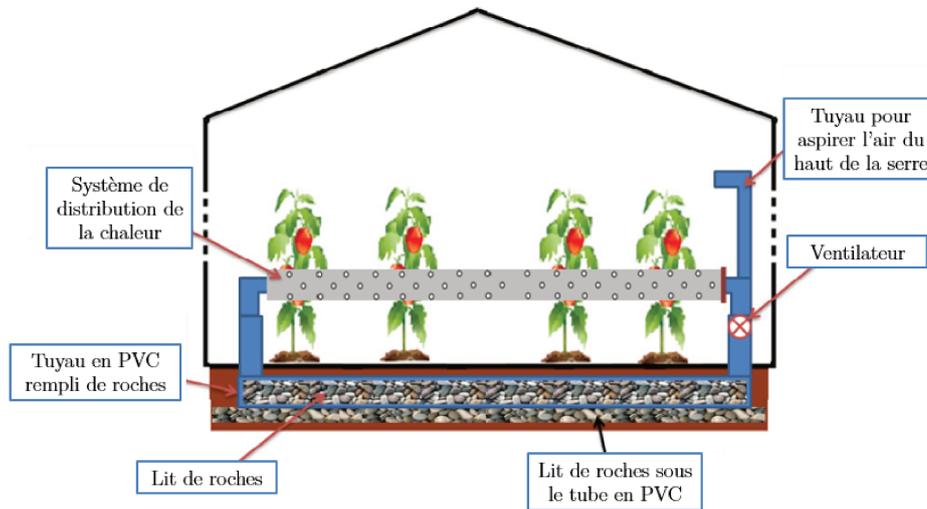


FIGURE 4.2 – Système de stockage mis en place à Agadir en 2019 (adapté et traduit de Gourdo et al. (2019) [25])

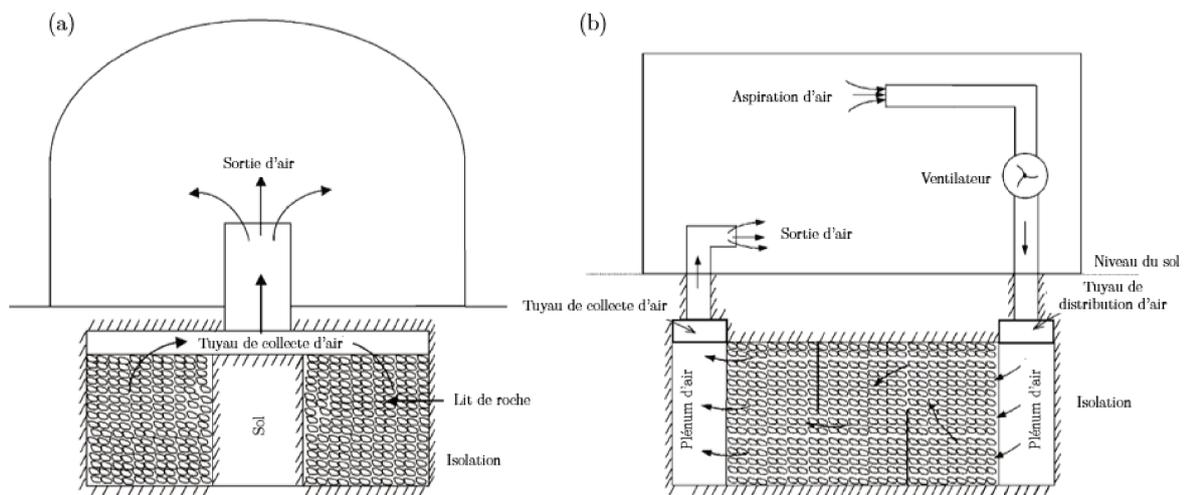


FIGURE 4.3 – Vue de face (a) et vue de côté (b) du système de stockage mis en place à Antalya en 2003 (adapté et traduit de Kurklu et al. (2003) [23])

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques principales des systèmes de stockage de la chaleur air/roches disponibles dans la littérature (adapté de Piché et al. (2020) [96])

Lieu (année de construction)	Type de système	D_{roc} (m)	ε_{lit}	m_{roc} (kg)	q_v ($m^3 h^{-1}$)	A_{ser} (m^2)	Géométrie	Enveloppe (épaisseur)	Masse surfacique de roches ($kg m^{-2}$)	Résultats
Alger, Algérie (1996) [22]	Roches contenues dans deux conduits cylindriques (diamètre = 0,25 m) enterrés à 0,6 m de profondeur dans le sol de la serre. L'air est directement injecté dans les conduits.	0,05 - 0,1	N/A	6 860	500	240	Quonset	Polyéthylène (0,18 mm)	29	Coefficient de performance de stockage : $\eta_s=8\%$. Le coefficient de récupération de la chaleur (η_r) est défini mais pas calculé.
Antalya, Turquie (2003) [23]	Deux lits de roches dans des canaux creusés sous la serre (dimensions : 3x1,25x0,75 m) L'air est soufflé dans les lits à l'aide d'un ventilateurs et d'un système de tuyaux.	0,032	0,49	8 043	1 100	15	Even-span	Polyéthylène (0,2 mm)	536	$\eta_s = 34\%$; $\eta_r = 80\%$. Durant la nuit, $\Delta T=9^\circ C$ et $\Delta\varphi=-13\%$. Pendant la journée, $\Delta T=-8^\circ C$ et $\Delta\varphi=13\%$.
Agadir, Maroc (2018) [24]	Six lits de roches dans des canaux creusés sous la serre (dimensions : 5,6x0,5x0,5 m) Chaque canal dispose de son système de ventilateurs et de tuyaux pour souffler l'air.	0,05 - 0,1	0,35	10 338	N/A	165	Quonset	Polyéthylène (N/A)	63	Durant la nuit, $\Delta T=2,6^\circ C$ et $\Delta\varphi=-10\%$. Pendant la journée, $\Delta T=0^\circ C$ et $\Delta\varphi=0\%$ à cause de la ventilation. Augmentation de la production végétale de 29%.
Agadir, Maroc (2019) [25]	Roches contenues dans un conduit cylindrique en PVC (diamètre = 0,2 m) enterré à 1 m de profondeur dans le sol de la serre. L'air est soufflé dans les lits à l'aide d'un ventilateurs et d'un système de tuyaux. La sortie d'air est constituée d'un tube en plastique percé qui est suspendu à une hauteur de 1,2 m.	0,04 - 0,06	0,38	225	130	15	Even-span	Polyéthylène (0,2 mm)	15	Durant la nuit, $\Delta T=3^\circ C$ et $\Delta\varphi=-5\%$. Pendant la journée, $\Delta T=-1,9^\circ C$ et $\Delta\varphi=4\%$. Augmentation de la production végétale de 22%.

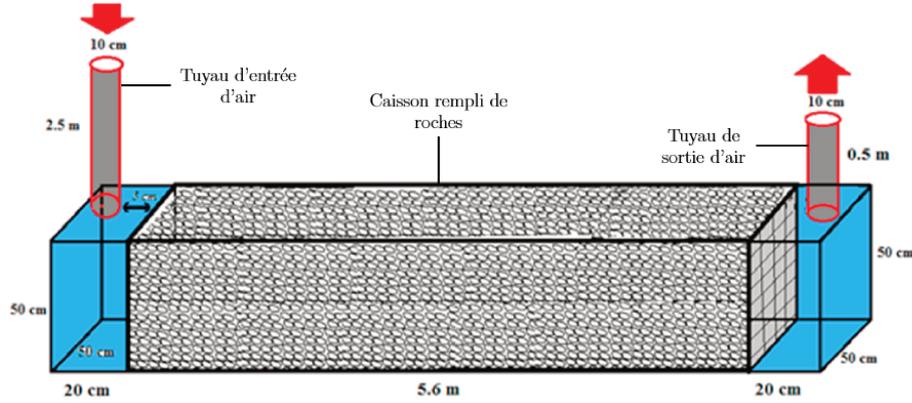


FIGURE 4.4 – Système de stockage mis en place à Agadir en 2018 (adapté et traduit de Bazgaou et al. (2018) [25])

4.1.3 Les indicateurs de performance

Afin de mesurer la performance de ces systèmes de stockage, on peut d'abord calculer la puissance thermique \dot{Q}_{StoAir} transmise par le stock (roche et air) à l'air extérieur au caisson (i.e. l'air intérieur de la serre) en utilisant l'équation (4.1) [22, 23] :

$$\dot{Q}_{StoAir} = q_v \rho_{air} c_{p,air} (T_{sor} - T_{ent}) \quad [\text{W}] \quad (4.1)$$

Où q_v représente le débit volumique et T_{ent} et T_{sor} représentent respectivement la température à l'entrée et à la sortie des lits de roches.

L'énergie du stock peut être assimilée à l'énergie contenue dans la roche. En effet, pour un écart de température donné, l'énergie stockée par un élément sera proportionnelle au produit de sa masse par sa capacité thermique massique. Or, la masse de la roche m_{roc} est donnée par $m_{roc} = \rho_{roc} V_{roc} = \rho_{roc} (1 - \varepsilon_{lit}) V_{lit}$ et la masse de l'air m_{air} est calculée par $m_{air} = \rho_{air} \varepsilon_{lit} V_{lit}$. Ainsi le rapport entre l'énergie stockée dans la roche, E_{roc} , et celle contenue dans l'air à l'intérieur des lits de roches, E_{air} , est exprimée par le rapport :

$$\frac{E_{roc}}{E_{air}} = \frac{\rho_{roc} (1 - \varepsilon_{lit}) c_{p,roc}}{\rho_{air} \varepsilon_{lit} c_{p,air}}$$

Ce rapport vaut environ 2700 en considérant $\rho_{roc} = 2700 \text{ kg m}^{-3}$, $c_{p,roc} = 900 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [100], $\rho_{air} = 1,25 \text{ kg m}^{-3}$, $c_{p,air} = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et $\varepsilon_{lit} = 0,41$ qui est la moyenne de la porosité des systèmes recensés ci-dessus. Il y a donc environ 2700 fois plus d'énergie contenue dans la roche que dans l'air du stock, ce qui permet de négliger l'énergie stockée par l'air à l'intérieur du caisson.

Ensuite, deux principaux indicateurs sont utilisés pour évaluer l'efficacité de ces systèmes de stockage : le coefficient de stockage, η_s , et le coefficient de récupération de la chaleur, η_r qui sont tous deux des ratios d'énergie. η_s représente la quantité de chaleur stockée dans les roches par rapport à la quantité totale de chaleur disponible dans la serre (cf. équation (4.3) [23]) tandis que η_r est le ratio de la quantité de chaleur déchargée pendant la nuit par rapport à la quantité de chaleur stockée le jour précédent (cf. équation (4.2) [22, 23]). L'énergie thermique transmise par les roches à l'air de la serre durant une phase de décharge est alors calculée en intégrant la puissance \dot{Q}_{StoAir} entre le temps de début et le temps de fin de la phase de décharge, respectivement $t_{d,i}$ et $t_{d,f}$. L'énergie thermique transmise par l'air aux roches durant une phase de charge est calculée en intégrant l'opposé de la puissance \dot{Q}_{StoAir} entre le temps de début et le temps de fin de la phase de charge, respectivement $t_{c,i}$ et $t_{c,f}$. L'énergie thermique disponible à l'intérieur de la serre est calculée en intégrant le produit de l'irradiance à l'intérieur de la serre, G_{int}^* , et de la surface au sol de la serre A_{ser} . Ce calcul implique que les pertes de chaleur du lit de roches sont négligées [23].

$$\eta_r = \frac{\int_{t_{d,i}}^{t_{d,f}} \dot{Q}_{StoAir} dt}{\int_{t_{c,i}}^{t_{c,f}} -\dot{Q}_{StoAir} dt} \quad [-] \quad (4.2)$$

$$\eta_s = \frac{\int_{t_{c,i}}^{t_{c,f}} -\dot{Q}_{StoAir} dt}{\int_{t_{c,i}}^{t_{c,f}} G_{int}^* A_{ser} dt} \quad [-] \quad (4.3)$$

Ensuite, les auteurs utilisent souvent les différences de température (ΔT) et d'humidité relative ($\Delta \varphi$) entre une serre équipée d'un système de stockage et une serre témoin sans système. Durant la journée, les serres équipées de système de stockage ont une température plus faible (ΔT négatif) et une humidité relative plus importante ($\Delta \varphi$ positif) que les serres témoins. À l'inverse, durant la nuit, les serres équipées de stockage ont une température plus élevée et une humidité relative plus faible. D'après Gourdo et al. (2019) [25] et Kürkü et al. (2003) [23], la différence d'humidité relative est due à la différence de température, étant donné que l'humidité relative diminue quand la température augmente.

L'étude menée en Turquie semble avoir les meilleurs résultats. D'une part, le coefficient de stockage η_s est de 34 % tandis qu'il est de 8 % dans l'étude menée en Algérie [22]. Kürkü et al. avancent plusieurs hypothèses pour expliquer cette différence : un débit d'air élevé, l'isolation du lit de roches, un fort ensoleillement et des propriétés thermiques des roches différentes. D'autre part, la serre équipée d'un système de stockage a une température nocturne supérieure de 9 °C à la serre témoin alors que cette différence atteint entre 2,6 °C et 3 °C pour les études menées au Maroc [24, 25]. Gourdo

et al. (2019) [25] expliquent cette différence par un débit d'air plus élevé ainsi qu'un volume de roches plus conséquent.

Les systèmes de stockage ont un effet positif sur la production végétale mais il est difficile de tirer des conclusions basées sur les deux valeurs du Tableau 4.1. En effet, l'étude de Gourdo et al. (2019) [25] a un plus grand ΔT que l'étude de Bazgaou et al. (2018) [24] (3°C et $2,6^{\circ}\text{C}$ respectivement) mais une plus faible augmentation de la production végétale (22 % et 29 % respectivement). Ces chiffres mettent en lumière la difficulté de comparer l'impact des systèmes de stockage sur la production végétale dans la mesure où cette dernière dépend de nombreux facteurs (usage d'engrais et/ou de pesticides, type de sol, arrosage, etc.).

Cette étude bibliographique nous a permis d'identifier le type de système de stockage qui sera un système utilisant la roche en tant que matériau de stockage et l'air en tant que fluide caloporteur. Par ailleurs, plusieurs indicateurs de performance ont pu être définis afin de quantifier l'efficacité du système. La prochaine partie présente la conception et le dimensionnement de ce système.

4.2 Conception et dimensionnement

En concertation avec le comité des serres et l'ARK, il a été décidé de construire un système de stockage se décomposant en deux sous-systèmes : l'un passif et l'autre actif.

4.2.1 Principe

Le système passif est fait d'une dalle de béton au milieu de la serre et de roches dans des gabions (sorte de grillages, cf. Figure 4.5). Ce système est passif car il emmagasine et restitue la chaleur par convection naturelle et rayonnement, sans consommation d'énergie externe au système.

La conception et le dimensionnement du système actif ont été menés au cours de cette thèse et sont donc présentés ici. Le système actif est composé de quatre caissons indépendants, dans lesquels un système de ventilateurs et de tuyaux percés peut faire circuler de l'air (cf. Figure 4.6). L'air est aspiré dans la partie haute de la serre, passe à travers les roches à l'aide d'un tuyau percé et est rejeté au niveau de l'allée centrale en béton. Le système aéraulique est basé sur le principe de Tichelmann [101] qui permet, sous réserve que la roche soit disposée de manière homogène au sein du caisson, d'éviter les chemins préférentiels et donc d'assurer l'uniformité du flux d'air dans tout le lit de roches.



FIGURE 4.5 – Photo d'un pan de gabion installé dans la serre de Kuujjuaq

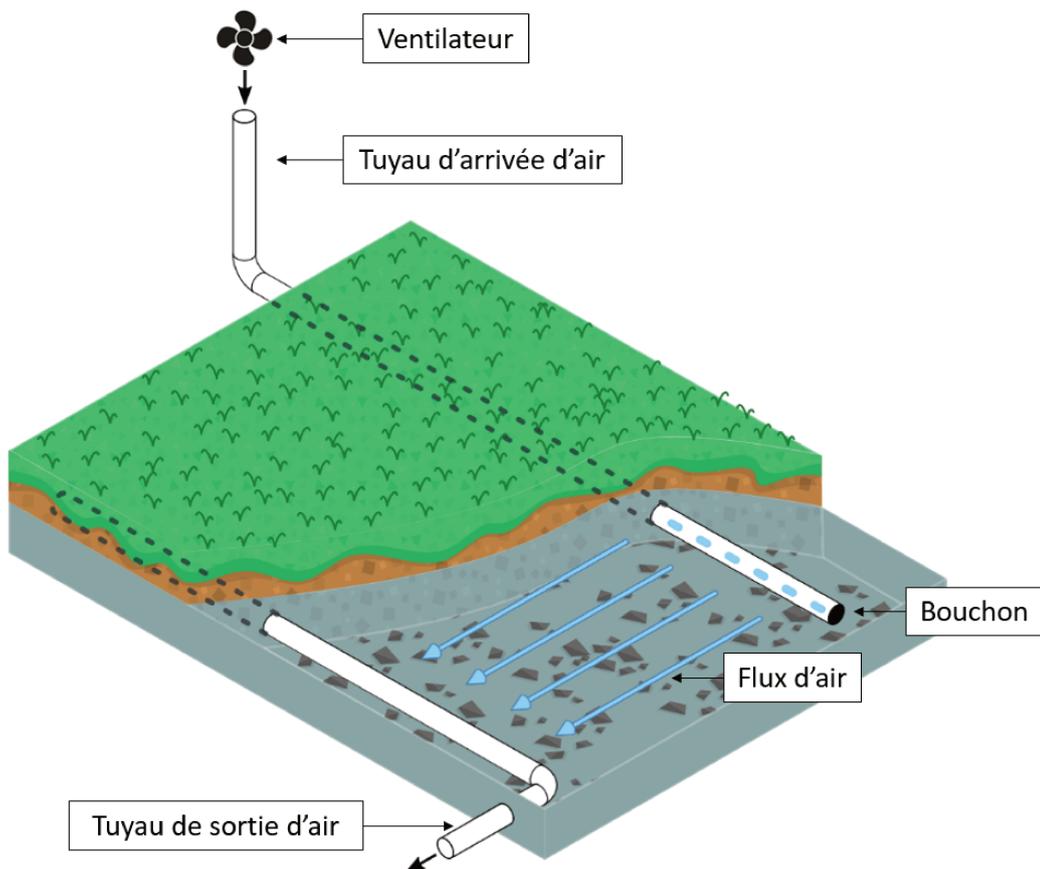


FIGURE 4.6 – Schéma de fonctionnement du lit de roches

Pendant la journée, l'air chaud de la serre est soufflé sur les roches plus froides. L'air transmet ainsi de l'énergie thermique aux roches ce qui a pour effet de les réchauffer et de refroidir l'air de la serre : c'est la phase de stockage (ou de charge du stock). Durant la nuit, l'inverse se produit : l'air froid est soufflé sur les pierres chauffées durant la journée. Les pierres cèdent donc de la chaleur à l'air ce qui le réchauffe en refroidissant les roches : c'est la phase de déstockage (ou de décharge du stock).

Le volume de roches a été imposé par des contraintes géométriques. La longueur et la largeur des caissons étaient fixées par la surface de la serre, tandis que la hauteur des caissons était déterminée par le fait qu'il était très difficile de creuser le sol en dessous de la serre, qui était gelé au moment de la construction. Par ailleurs, ce volume de roches va créer des pertes de charge s'opposant au flux d'air. Il faut donc calculer ces pertes de charge induites par le lit de roches ainsi que par les autres éléments du système (tuyaux, coudes, etc.) afin de choisir un ventilateur dont les caractéristiques permettront d'obtenir un débit d'air approprié assurant ainsi le bon fonctionnement du système.

4.2.2 Calcul des pertes de charge

Les pertes de charge se décomposent en deux catégories : les pertes de charge linéaires, dues aux frottements de l'air au sein des éléments rectilignes, et les pertes de charge singulières, dues à des éléments divers du système de ventilation (entrée d'air, coudes, changement de section...). Les pertes de charge linéaire se calculent généralement à partir de l'équation de Darcy-Weisbach [102] (équation (4.4)) :

$$\Delta P = \Lambda \frac{L_{tuy} \rho_{air} v_{air,tuy}^2}{D_{tuy}} \quad [\text{Pa}] \quad (4.4)$$

Où Λ est le coefficient de pertes de charge linéaire, L_{tuy} est la longueur du tuyau, D_{tuy} est le diamètre du tuyau, ρ_{air} est la masse volumique de l'air et $v_{air,tuy}$ est la vitesse de l'air dans le tuyau. Une valeur de 0,2 m a été choisie pour le diamètre des tuyaux. Le coefficient de perte de charge peut se calculer par la corrélation de Blasius [102] (équation (4.5)) qui est valide pour des tuyaux lisses, ce qui est le cas ici puisque les tuyaux sont en PVC.

$$\Lambda = 0,3164 \text{Re}_{tuy}^{-0,25} \quad [-] \quad (4.5)$$

Avec Re_{tuy} le nombre de Reynolds dans le tuyau, calculé selon l'équation (4.6).

$$\text{Re}_{tuy} = \frac{v_{air,tuy} D_{tuy}}{\nu_{air}} \quad [-] \quad (4.6)$$

Où ν_{air} représente la viscosité cinématique de l'air.

Les pertes de charge singulières peuvent être calculées à partir de l'équation (4.7) :

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_{air} v_{air,tuy}^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (4.7)$$

où ξ est le coefficient de pertes de charge singulières dont la valeur varie selon les éléments considérés. Ces valeurs peuvent être trouvées notamment dans l'ouvrage de I.E. Idel'cik (1986) [103].

La perte de charge au sein du lit de roches ne peut pas être calculée ni par l'équation (4.4) ni par l'équation (4.7). On peut cependant utiliser l'équation d'Ergun [100] (équation (4.8)) :

$$\frac{\Delta P}{l_{lit}} = A \frac{(1 - \varepsilon_{lit})^2}{\varepsilon_{lit}^3} \frac{\mu_{air} v_{air,lit}}{D_{roc}^2} + B \frac{(1 - \varepsilon_{lit})}{\varepsilon_{lit}^3} \frac{\rho_{air} v_{air,lit}}{D_{roc}} \quad [\text{Pa m}^{-1}] \quad (4.8)$$

avec l_{lit} la longueur du lit de roches dans le sens de l'écoulement (ici sa largeur, cf. Figure 4.6), ε_{lit} la fraction de vide du lit de roches, μ_{air} la viscosité dynamique de l'air, $v_{air,lit}$ la vitesse de l'air au sein du lit de roches, D_{roc} le diamètre moyen des roches et A et B des constantes empiriques déterminées par Ergun : $A = 150$ et $B = 1,75$. Afin de pouvoir calculer la perte de charge au sein du lit, les valeurs moyennes de D_{roc} et ε_{lit} (respectivement 0,06 m et 0,41) basées sur les quatre études les plus récentes portant sur des systèmes de stockage air/roches ont été considérées (cf. partie 4.1.2).

La vitesse de l'air au sein du tuyau ainsi que celle à l'intérieur du lit de roches sont toutes deux reliées au débit volumique par les équations (4.9) et (4.10) respectivement :

$$v_{air,lit} = \frac{q_v}{L_{lit} h_{lit}} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (4.9) \quad v_{air,tuy} = \frac{q_v}{\pi \left(\frac{D_{tuy}}{2}\right)^2} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (4.10)$$

Il est donc possible de calculer les pertes de charge induites par l'ensemble du système de stockage et de les tracer en fonction du débit volumique (Figure 4.7). Les courbes caractéristiques de différents ventilateurs présélectionnés (Série VTX de la compagnie Vortex [104]) peuvent ensuite être tracées sur le même graphique. L'intersection des courbes du système et de celles des ventilateurs donnent le point de fonctionnement, i.e. le débit et les pertes de charge attendues.

Ces ventilateurs ont tous un diamètre de 0,2 m, soit le même diamètre que les tuyaux choisis. Pour éviter que le flux d'air ne prennent des chemins préférentiels, une perte de charge minimale de 50 Pa est recommandée [105], ce qui exclut le VTX 400. Afin de limiter la vitesse de l'air dans les tuyaux pour ne pas occasionner une trop grande gêne sonore aux utilisateurs de la serre, et dans le but de limiter la consommation

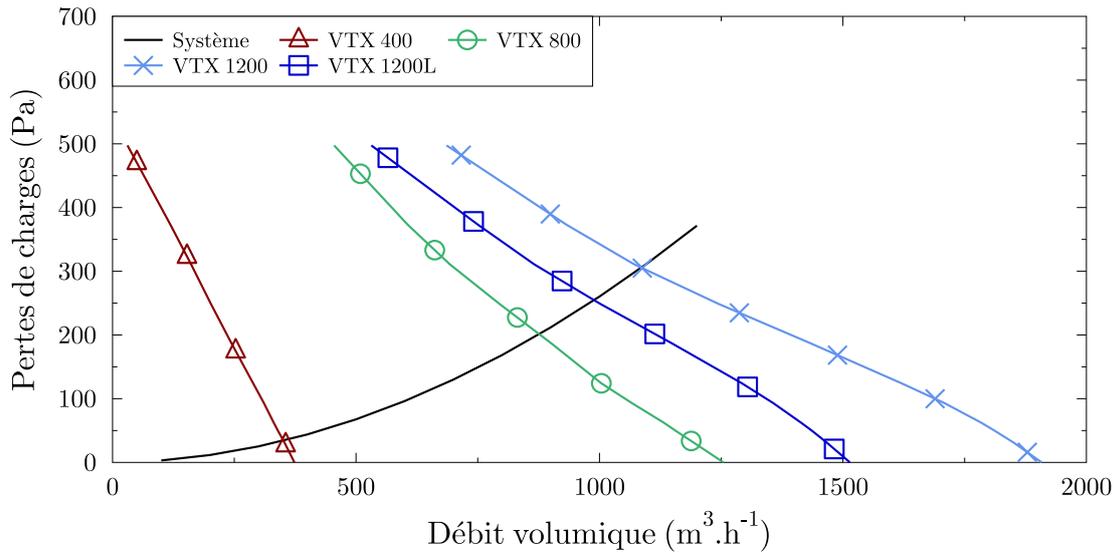


FIGURE 4.7 – Pertes de charge du système et des ventilateurs envisagés

électrique, les ventilateurs VTX 800 ont été choisis. Le débit volumique théorique est alors de $870 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ et les pertes de charge attendues sont de 200 Pa. Cette valeur de débit est comprise dans la plage des autres systèmes décrit dans la partie 4.1.2, entre $130 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ et $1100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (cf. Tableau 4.1).

4.3 Construction et mise en fonctionnement

La construction du système de stockage a démarré début novembre 2018. Ce chantier a fait l'objet d'un terrain de recherche durant toute la durée des travaux (environ deux mois) afin de superviser l'installation des lits de roches et de participer à toutes les étapes de construction des systèmes, actif et passif. Ce terrain avait également pour objectif d'instrumenter un lit de roches. La Figure 4.8 présente une chronologie du chantier du système de stockage de la chaleur.

La Figure 4.8 (a) présente l'état initial de la serre avant les travaux. La première étape a été de creuser l'allée centrale jusqu'au sol en dessous de la serre et de poser des plaques de polystyrène expansé (styromousse) afin d'isoler la dalle de béton du sol (cf. Figure 4.8 (b)). Les dimensions de la dalle de béton sont de $18 \text{ m} \times 0,8 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ soit environ $4,3 \text{ m}^3$ de volume. En considérant une masse volumique de $2,4 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ [106] pour le béton, on peut estimer la masse totale de béton à $10 \times 10^3 \text{ kg}$. L'étape suivante a été d'installer les gabions, de les remplir avec des roches allant de 0,05 à 0,3 m, de creuser les espaces situés de part et d'autre de la dalle de béton et de poser des plaques de styromousse (cf. Figure 4.8 (c)) afin d'isoler les lits de roches du sol. Ensuite,

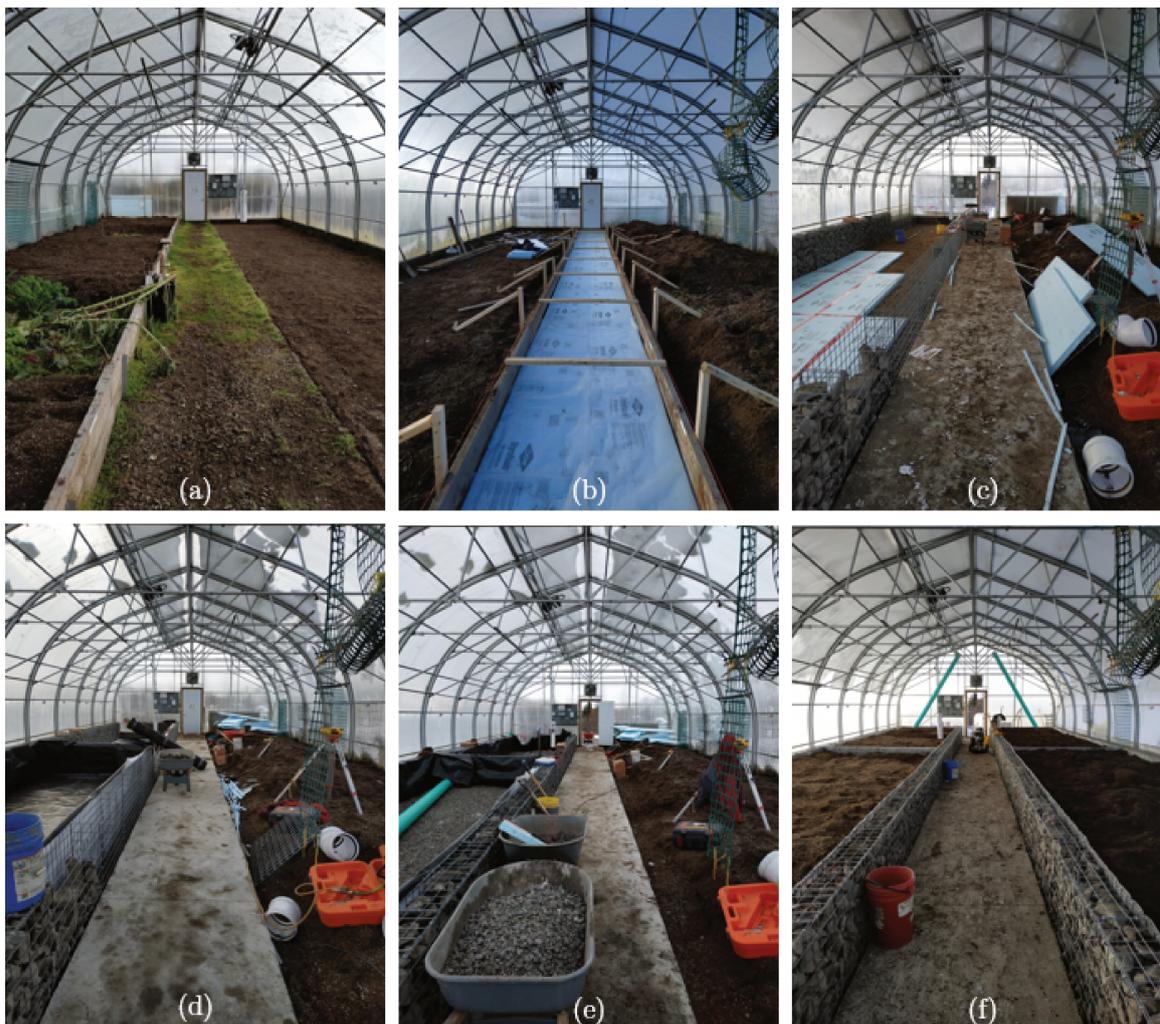


FIGURE 4.8 – Les différentes étapes de construction du système de stockage de la chaleur

ces deux espaces ont été séparés en deux afin de créer quatre caissons indépendants et une bâche étanche à l'eau et à l'air a été positionnée dans chacun des quatre espaces (cf. Figure 4.8 (d)). Puis, chaque caisson a commencé à être rempli de petites roches issues d'une carrière locale (cf. Figure 4.8 (e)). Il avait été envisagé un diamètre moyen des roches de 6 cm (cf. partie 4.2). Cependant, les roches livrées durant le chantier étaient de toutes tailles, allant du sable jusqu'à environ 5 cm de diamètre. Un tamis a alors été construit sur place (cf. Figure 4.9) pour réduire la proportion de roche de taille inférieure à 1 cm, afin d'éviter des pertes de charge trop importante au sein des lits de roches. Cependant, une certaine proportion de particules rocheuses inférieures à 1 cm s'est retrouvée dans les lits de roches et le diamètre moyen des roches est donc estimé à 1 cm. Quand les caissons ont été remplis à environ la moitié, des tuyaux en PVC de 0,2m de diamètre préalablement percés ont été positionnés dans les lits de roches (cf. Figure 4.10 et Figure 4.13).



FIGURE 4.9 – Tamis utilisé pour filtrer les roches



FIGURE 4.10 – Perçage d'un tuyau en PVC

Avant de finir de remplir les caissons, un des lit de roches a été instrumenté. Ainsi, cinq sondes de température de type Pt100 ont été régulièrement réparties comme le montre la Figure 4.14. Les fils de connexion des Pt100 ont été placés dans un réseau de protection en PVC afin d'éviter tout problème d'écrasement. Ensuite les caissons ont fini d'être remplis avec les roches et la bâche a été repliée et scellée à l'aide de bande de goudrons (Figure 4.11) afin d'étanchéifier le lit de roches. Finalement, une toile en géotextile (Figure 4.12) a été positionnée afin de recevoir la terre de culture. Le résultat final est visible sur la Figure 4.8 (f).

Chaque caisson a une dimension de $8,7\text{ m} \times 2,5\text{ m} \times 0,3\text{ m}$ et a donc un volume de $6,5\text{ m}^3$. Des mesures ont été effectuées en laboratoire sur un échantillon de 5 L des roches des caissons afin de déterminer la masse volumique et la fraction de vide (ou porosité) du stock. La masse volumique s'obtient en déterminant la masse de ce volume donné de roches. La fraction de vide s'obtient en remplissant un volume donné de roches et en complétant ce même volume avec de l'eau. Le rapport du volume d'eau sur le volume total donne la fraction de vide, en considérant les roches comme non poreuses. Les résultats indiquent que $\rho_{lit} = (1,56 \pm 0,03) \times 10^3\text{ kg m}^{-3}$ et $\varepsilon_{lit} = 0,42 \pm 0,03$. Chaque caisson contient donc $10 \times 10^3\text{ kg}$ de roches. La serre ayant une surface de 140 m^2 , on peut calculer que la masse surfacique du système actif (lits de roches) est de 293 kg m^{-2} , une valeur environ 1,8 fois plus petite que celle du système d'Antalya mais 5 à 19 fois supérieure aux valeurs des autres systèmes de stockage présentées dans le Tableau 4.1.



FIGURE 4.11 – Scellement de la bâche

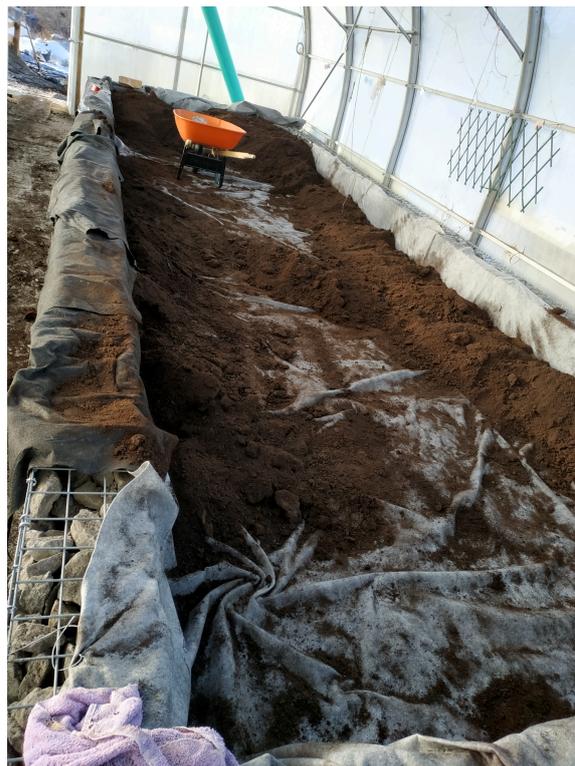


FIGURE 4.12 – Toile de géotextile

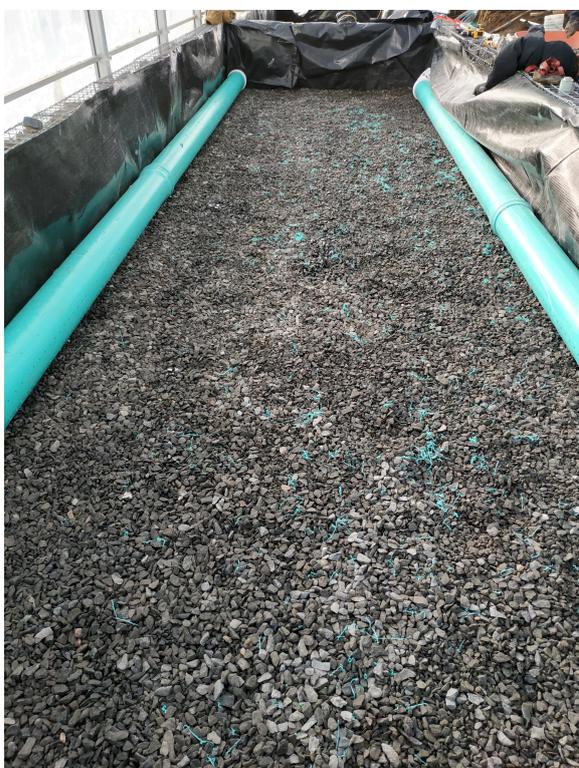


FIGURE 4.13 – Positionnement des tuyaux

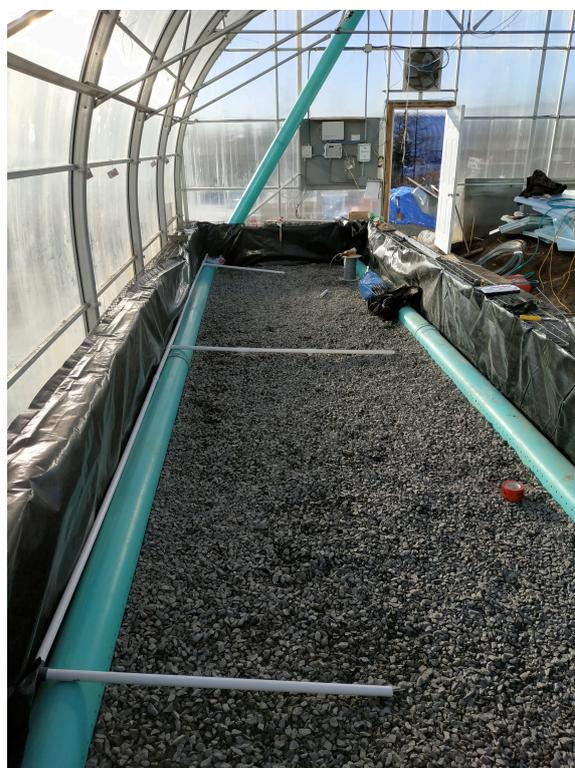


FIGURE 4.14 – Positionnement des Pt100

Par ailleurs, le calcul des pertes de charge effectué avec les valeurs $\varepsilon_{lit} = 0,42$ et $D_{roc} = 0,01$ m indique un débit théorique de $\dot{q}_v = 780 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ avec des pertes de charge totales de 243 Pa. Le tuyau de sortie de l'air étant inaccessible (coincé dans les gabions) il n'a pas été possible d'effectuer une mesure du débit réel ou des pertes de charge du système. Cette valeur de débit théorique sera donc choisie pour les calculs ou la modélisation à venir. Une étude de sensibilité menée sur D_{roc} et ε_{lit} nous amène à considérer une incertitude de 10% sur le débit. Cependant, cette estimation de l'incertitude se base sur l'équation empirique d'Ergun (cf. équation (4.8)) et il est donc probable que l'incertitude sur le débit soit sous-estimée.

Un autre terrain de recherche d'un mois et demi a eu lieu entre le milieu du mois de mai 2019 et fin juin 2019 afin de mettre en fonctionnement le système de stockage et d'améliorer le dispositif d'instrumentation. En prenant en compte les températures optimales de culture (cf. partie 1.3) et en concertation avec le comité des serres de Kuujjuaq, le système actif a été mis en fonctionnement avec les paramètres suivants : la phase de stockage démarre quand la température à l'intérieur de la serre dépasse les 20°C , et s'arrête quand la température est inférieure à 18°C . Quand la température de l'air chute en dessous de 12°C la phase de déstockage commence. Cette phase s'arrête lorsque la température de l'air passe au-dessus de 14°C . La mise en route des ventilateurs (et donc le début des phases de stockage/déstockage) est gérée par un contrôleur relié à une sonde de température Pt100 placée au milieu de la serre. C'est le même contrôleur qui gère l'ouverture du toit (quand la température de l'air dépasse 24°C) et sa fermeture (quand la température de l'air descend au-dessous de 21°C). L'ensemble de ces seuils de déclenchement est récapitulé sur la Figure 4.15.

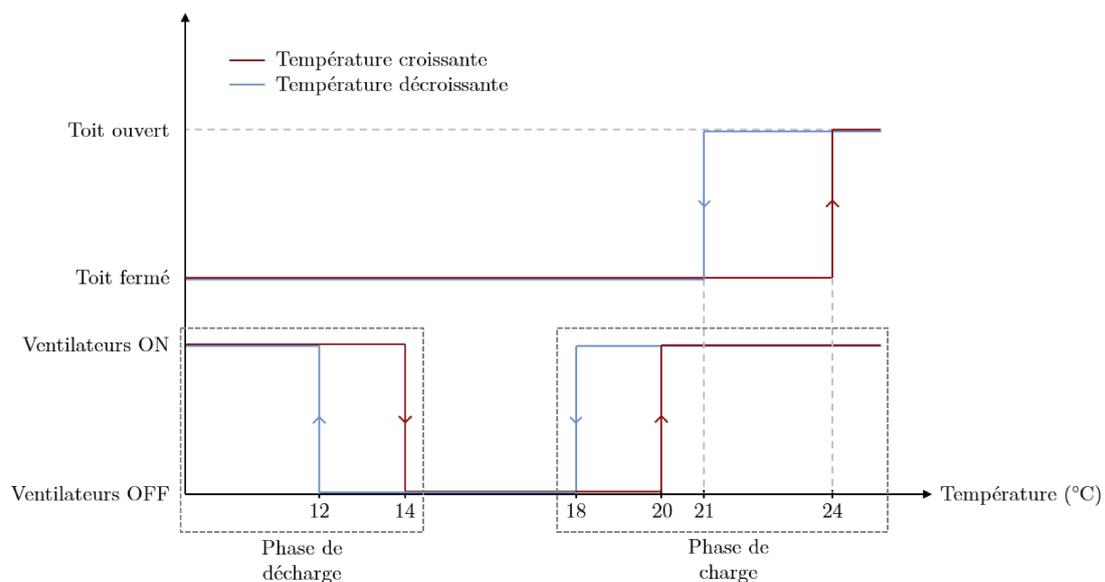


FIGURE 4.15 – Seuils de température de déclenchement des ventilateurs et d'ouverture du toit

En résumé, un système de stockage roche/air a été conçu, construit et mis en fonctionnement dans la serre de Kuujjuaq afin de réduire l'écart de température entre le jour et la nuit dans le but de rendre les températures plus propices au développement des cultures végétales. Le prochain chapitre présente le nouveau système d'instrumentation ayant permis de collecter des données durant la saison de culture 2019 ainsi que l'analyse de l'effet de l'installation du système de stockage sur le comportement thermique de la serre.

Chapitre 5

Étude de la serre avec le système de stockage

Sommaire

5.1	Instrumentation	78
5.2	Analyse des données	81
5.2.1	Analyse globale de l'impact du système de stockage	81
5.2.2	Dynamiques temporelles au sein du lit de roches	85
5.2.3	Bilan énergétique	89
5.3	Discussion	94

Le chapitre précédent a décrit le choix, la conception et la construction d'un système de stockage thermique roche/air au sein de la serre de Kuujuaq. Ce chapitre présente l'installation de nouveaux capteurs permettant notamment de collecter des données sur le fonctionnement du système de stockage dans la partie 5.1. La partie 5.2 est dédiée à l'analyse du comportement thermique du système de stockage ainsi qu'à l'étude de son impact sur la température à l'intérieur de la serre. Enfin, la partie 5.3 sera l'objet d'une discussion sur les performances de ce système ainsi que sur les améliorations envisagées.

5.1 Instrumentation

L'inconvénient des capteurs installés en 2016 était qu'ils nécessitaient un relevé des mesures *in situ* un peu plus d'une fois par an, et donc un voyage onéreux tant sur le plan financier qu'écologique. Afin de pallier cet inconvénient majeur, nous avons décidé de développer un nouveau système d'acquisition permettant, entre autres améliorations, d'accéder aux mesures à distance par le biais du réseau Internet. Ce nouveau système a été installé en mai 2019 lors du dernier terrain de recherche.

Le système est construit autour d'un nano-ordinateur (RaspberryPi 3, abrégé en RPI) responsable des tâches de haut niveau (stockage temporaire des données, communication Internet, prise de photographie, etc.) et de deux micro-contrôleurs (Arduino Uno) pour les opérations de mesures. La communication entre les différents éléments se fait à l'aide du protocole I2C [107] qui fonctionne selon un protocole maître-esclave ne nécessitant que trois fils (signal / horloge / masse). L'adressage classique utilise 7 bits ce qui permet au dispositif maître de communiquer en lecture et écriture avec potentiellement 128 dispositifs esclaves. Dans notre système, le RPI joue le rôle de maître et les Arduinos d'esclaves. L'architecture générale du système est schématisée sur la Figure 5.1.

L'Arduino local utilise deux DHT22 pour mesurer la température et l'humidité relative à l'extérieur et à l'intérieur de la serre (au centre, à proximité de T4 cf. Figure 3.7). Il intègre également un anémomètre mesurant la vitesse du vent extérieur (modèle 1733 d'Adafruit), un débitmètre (DFM-POM de Bio-Tech) permettant de mesurer la quantité d'eau utilisée pour l'arrosage, ainsi que le pyranomètre précédemment installé. Les caractéristiques de ces différents capteurs sont regroupées dans le Tableau 5.1. De plus, une carte électronique se branchant sur cet Arduino (cf. Figure 5.2) a spécialement été conçue et réalisée au laboratoire au cours de cette thèse. Celle-ci sert d'une part à intégrer une horloge en temps réel (real time clock, RTC) alimentée par pile permettant de conserver un horodatage précis des données même en cas de coupure d'alimentation électrique et d'autre part à mettre en place un dispositif ayant pour but de détecter

les ordres d'ouverture/fermeture du toit ainsi que les périodes de fonctionnement des ventilateurs.

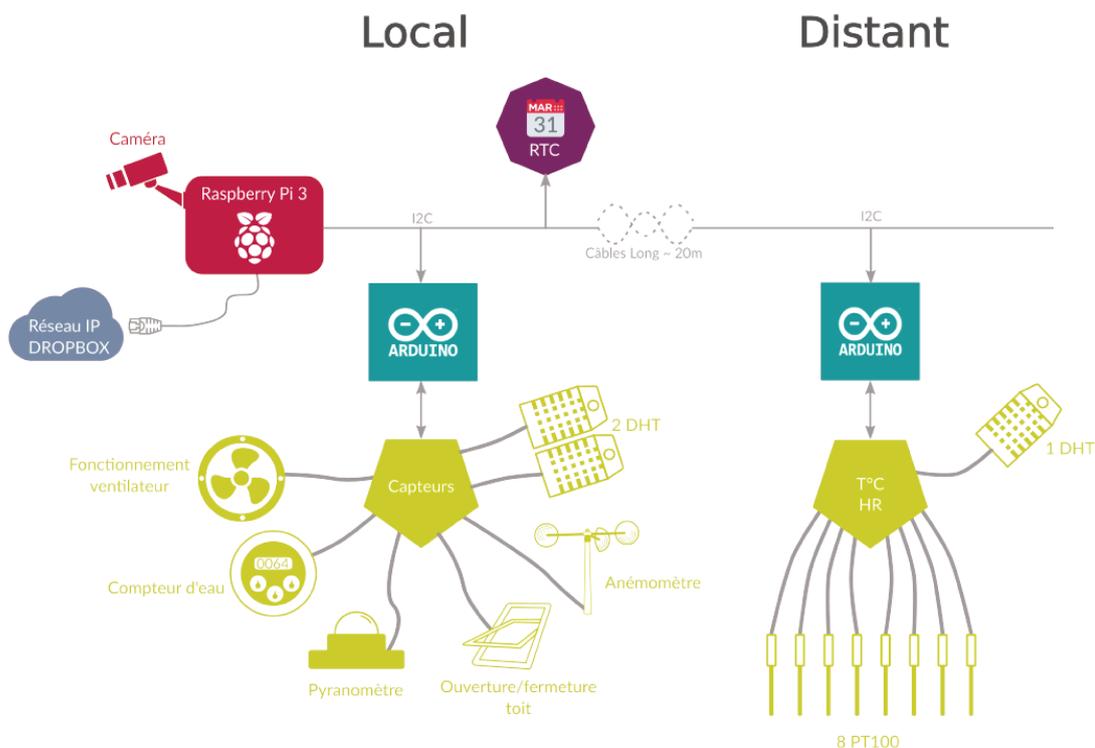


FIGURE 5.1 – Schéma de l'architecture du système d'instrumentation



FIGURE 5.2 – Carte électronique du système d'acquisition

L'Arduino distant est dédié aux mesures concernant le système de stockage. Il recueille les températures dans le lit de roches (7 capteurs dont 2 redondants, cf. partie 4.3) et la température de l'air à la sortie du stock (T_{sor}) à l'aide de sondes Pt100 ainsi que la température à l'entrée du stock par le biais d'un capteur DHT22. Le RPI et les Arduinos ont été placés dans des boîtiers étanches (cf. Figure 5.3 et Figure 5.4) afin de les protéger de l'humidité pouvant être importante à l'intérieur de la serre.

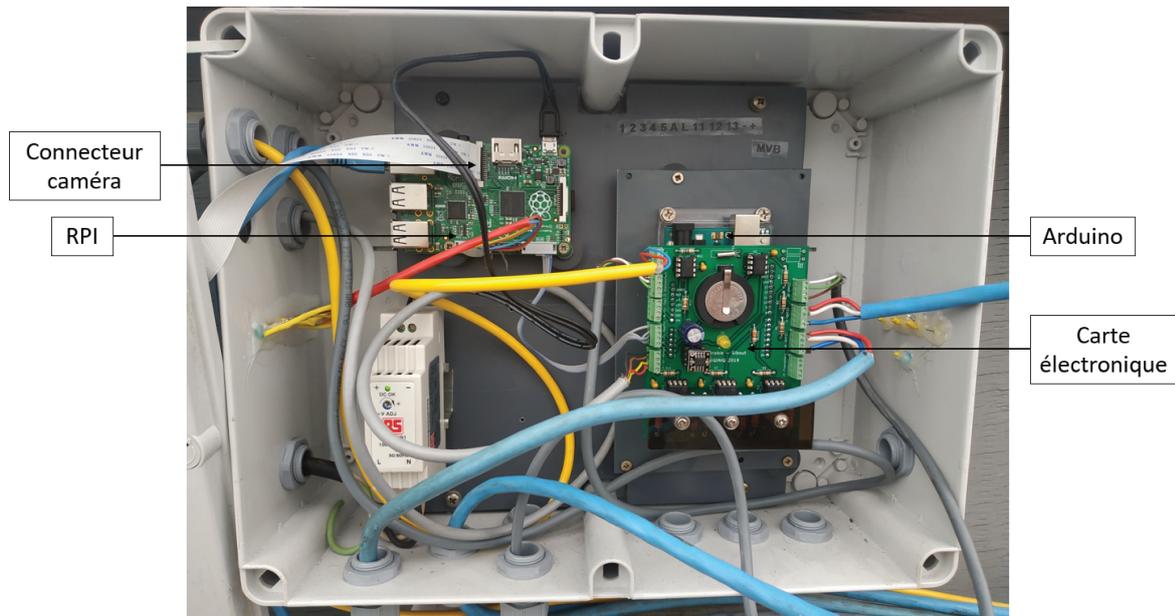


FIGURE 5.3 – Boîtier étanche regroupant l'Arduino local et le RPI

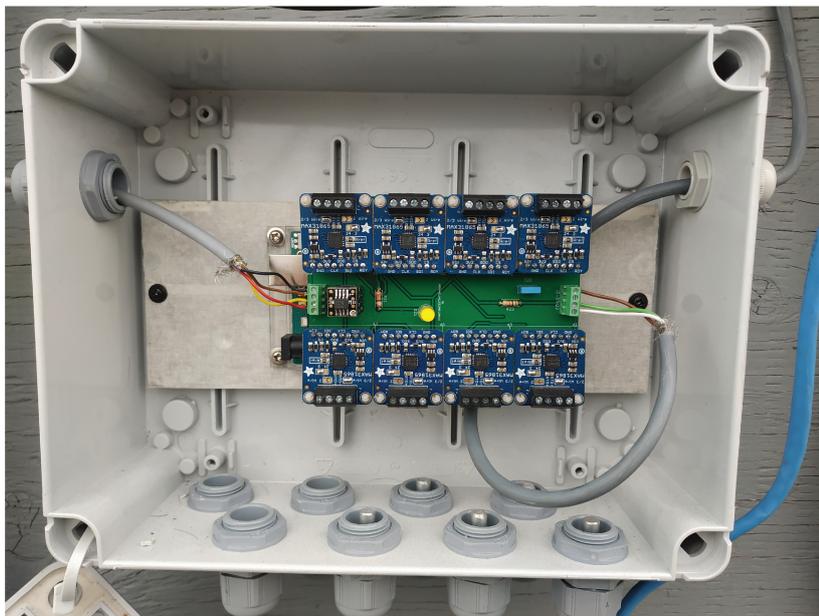


FIGURE 5.4 – Boîtier étanche de l'Arduino distant

Chaque capteur est interrogé par les Arduinos toutes les 10 secondes et une moyenne sur 5 minutes est calculée et mémorisée pour lecture ultérieure par le RPI. À intervalle

régulier, le RPI interroge les Arduinos, mémorise toutes les informations et les dépose une fois par jour sur un service de stockage en ligne (Dropbox) sous la forme d'une archive compressée contenant la photographie et les données.

TABLEAU 5.1 – Caractéristiques des capteurs utilisés

Capteur	Plage de mesure	Incertitude	Modèle	Fournisseur
Pyranomètre	0 W m^{-2} à $2\,000 \text{ W m}^{-2}$	20 W m^{-2}	CMP3	Kipp & Zonen
Anémomètre	$0,5 \text{ m s}^{-1}$ à 50 m s^{-1}	1 m s^{-1}	1733	Adafruit Industries
Thermomètre	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$ à $80 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,5 \text{ }^\circ\text{C}$	DHT22	Adafruit Industries
Hygromètre	0 % à 100 %	2 %	DHT22	Adafruit Industries
Thermomètre (lit de roches)	$-50 \text{ }^\circ\text{C}$ à $200 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,2 \text{ }^\circ\text{C}$	RTD Pt100	Omega
Débitmètre	$0,6 \text{ L min}^{-1}$ à 21 L min^{-1}	$0,3 \text{ L min}^{-1}$	DFM-POM	Bio-Tech

L'installation de ce nouveau système d'instrumentation a permis de collecter des données sur le climat à l'intérieur et à l'extérieur de la serre ainsi que sur le fonctionnement du système de stockage durant la saison de culture 2019. Nous allons maintenant analyser ces données et les comparer à celles récoltées avant l'installation du système de stockage afin d'évaluer l'effet de ce dernier.

5.2 Analyse des données

L'analyse des données se fait en trois phases. La partie 5.2.1 est une étude de l'effet du système de stockage sur la température à l'intérieur de la serre en comparant les périodes antérieures et postérieures à son installation. La partie 5.2.2 présente les dynamiques temporelles du système de stockage en étudiant les températures d'entrée, de sortie et des roches d'un caisson durant trois jours. Enfin une analyse énergétique est proposée dans la partie 5.2.3 basée sur les quantités d'énergie mises en jeu lors des phases de charges ou de décharges et sur le calcul des indicateurs de performances décrits dans le chapitre précédent (cf. partie 4.1.3).

5.2.1 Analyse globale de l'impact du système de stockage

La Figure 5.5 montre les mesures de deux jours consécutifs d'août 2016, avant l'installation du système de stockage, et d'août 2019, après son installation.

Ces deux jours ont été choisis car les conditions climatiques extérieures étaient relativement similaires. En effet, on peut voir sur la Figure 5.5 (a) que les deux journées étaient des journées ensoleillées ayant une irradiance solaire comparable dont le maximum est d'environ 800 W m^{-2} . On peut également remarquer que les températures

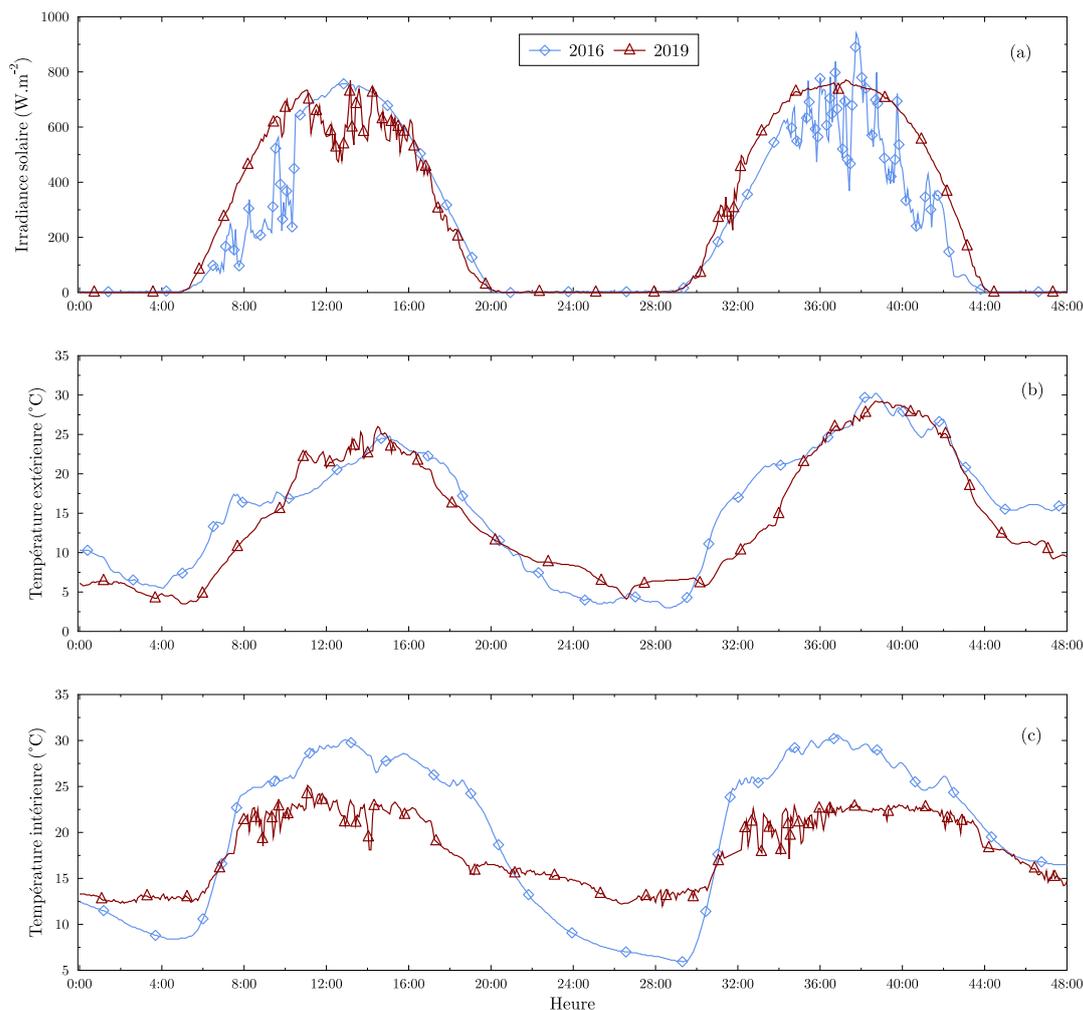


FIGURE 5.5 – Comparaison du comportement thermique de la nouvelle serre avant et après l’installation du système de stockage

extérieures étaient similaires dans les deux cas (cf. Figure 5.5 (b)) avec des températures minimales en dessous de 5°C durant la nuit et des températures maximales entre 25°C et 30°C durant la journée. On peut alors comparer la température intérieure dans les deux cas, sur la Figure 5.5 (c), afin de visualiser l’effet du système de stockage. La température intérieure est à chaque fois mesurée au centre de la serre à une hauteur de un mètre. En 2016, on remarque que la température intérieure monte au-dessus de 30°C durant la journée et atteint un minimum de 6°C pendant la nuit, une température proche de la température extérieure. En 2019, la température maximale est de 25°C tandis que le minimum est de 13°C durant la nuit, soit 8°C de plus que la température extérieure. Si l’on reprend les indicateurs présentés précédemment (cf. 4.1.3), et en considérant que la serre sans système de stockage fait office de serre témoin, on calcule que durant la nuit $\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$ et pendant la journée $\Delta T = -5^{\circ}\text{C}$. Ces valeurs sont supérieures aux expériences menées à Agadir [24, 25] mais inférieures à celle menée à Antalya [23] (cf. Tableau 4.1). Ceci n’est pas surprenant dans la mesure où la masse

surfacique de roches du système installé à Kuujuaq est 5 à 19 fois supérieure à celles mises en place à Agadir mais est 1,8 fois inférieure à celle d'Antalya.

L'indicateur d'humidité relative $\Delta\varphi$ n'a pas été représenté sur la Figure 5.5 car il est fortement impacté par la multitude d'utilisateurs arrosant leurs lots à différents moments de la journée. De plus, ce nombre important d'utilisateurs n'a pas permis de quantifier l'impact de l'installation du système de stockage sur la production végétale. En effet les personnes ayant un lot dans la serre sont différentes d'une année sur l'autre, et chacun est libre de faire pousser ce qu'il veut, ce qui rend la collecte de données très difficile.

La Figure 5.6 et la Figure 5.7 présente les minimums journaliers de température à l'intérieur et à l'extérieur de la serre du 30 mai au 25 octobre de 2017 et 2019, respectivement. Ces dates sont celles de la saison de culture de 2019. La saison de 2017 s'est terminée le 7 octobre. La saison 2019 a donc duré 18 jours de plus. Deux raisons expliquent cela : un mois d'octobre 2019 plus chaud qu'octobre 2017 et l'effet du système de stockage sur la température journalière minimale qui est visible sur la Figure 5.7.

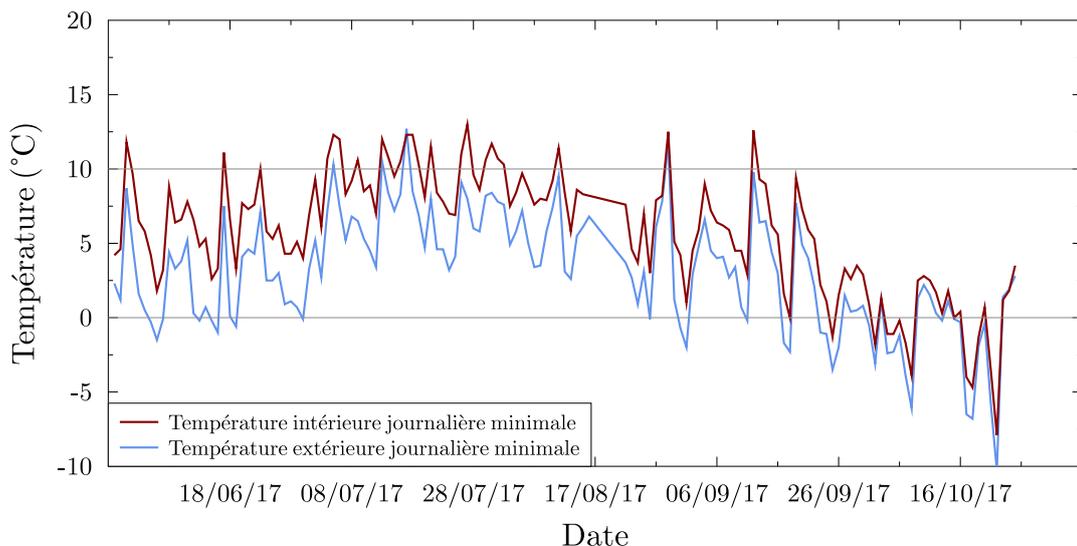


FIGURE 5.6 – Température minimale journalière à l'intérieur et à l'extérieur de la serre durant la saison de culture 2017

Ces deux figures montrent que l'installation du système de stockage de la chaleur a eu un impact significatif sur les températures minimales à l'intérieur de la serre. En 2017, plus de 92 % des nuits avaient connu des températures inférieures à $T_{min}^{opt} = 12^{\circ}\text{C}$ alors que ce pourcentage est d'un peu plus de 62 % en 2019. Cette différence entre les deux saisons de culture est encore plus significative si on considère $T_{min}^{opt} = 10^{\circ}\text{C}$ (cf. partie 1.3) : près de 82 % des valeurs de température minimale était inférieure à 10°C durant la saison de culture 2017 tandis que cette proportion est d'un peu moins de 24 % en 2019. Il faut cependant rapporter ces valeurs de température intérieure à la température extérieure.

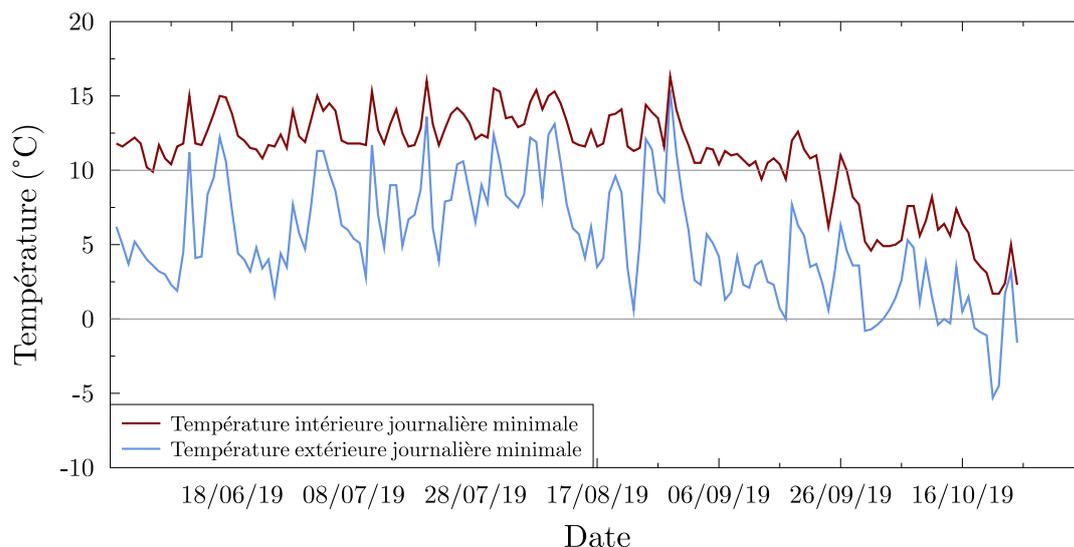


FIGURE 5.7 – Température minimale journalière à l'intérieur et à l'extérieur de la serre durant la saison de culture 2019

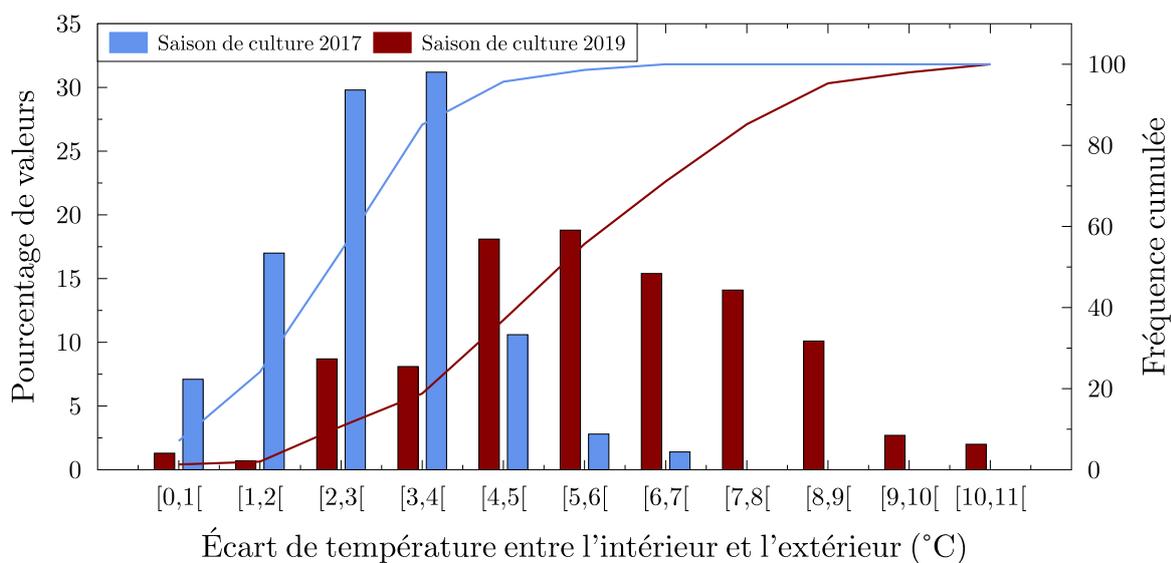


FIGURE 5.8 – Différence entre les températures minimales journalières extérieures et intérieures durant les saisons de culture 2017 et 2019

La répartition de la différence entre les températures minimales journalières extérieures et intérieures est présentée sur la Figure 5.8. L'écart moyen entre les minimums journalier de température intérieure et extérieure durant la saison de culture 2017 était de $2,7^{\circ}\text{C}$, avec une médiane de $2,8^{\circ}\text{C}$ et un écart type de $1,3^{\circ}\text{C}$. Durant la saison 2019, la moyenne et la médiane de cette différence était de $5,7^{\circ}\text{C}$, avec un écart type de $2,0^{\circ}\text{C}$. On peut noter que 54% des valeurs de cette différence sont inférieures à 3°C en 2017 alors que 44% de ces valeurs sont supérieures à 6°C en 2019. Ces résultats montrent donc que le système de stockage a rempli ses objectifs d'augmenter l'inertie

thermique de la serre et d'allonger ainsi la saison de culture. Cependant, dans la mesure où l'instrumentation de la seconde campagne a été mise en fonctionnement en même temps que le système de stockage, fin mai 2019, l'analyse de l'impact du système de stockage sur le début de la saison de culture reste encore à déterminer.

5.2.2 Dynamiques temporelles au sein du lit de roches

La Figure 5.9 présente les données obtenues durant trois jours de fonctionnement du système de stockage, du 31 mai 2019 au 3 juin 2019.

La Figure 5.9 (a) présente les données climatiques extérieures, i.e. la température et l'irradiance solaire. La température extérieure atteint un maximum de 20 °C pendant la journée et un minimum de 4 °C durant la nuit. On peut noter que ces trois jours étaient partiellement nuageux comme le montre les variations de l'irradiance, avec un maximum d'un peu plus de 830 W m⁻². On peut également voir que le soleil se lève un peu avant 04:00 et se couche après 20:00, soit des journées de plus de 16 heures, ce qui est en accord avec le diagramme solaire présenté sur la Figure 5.10, où la position de la serre est représenté par un parallélogramme rectangle. Ce diagramme solaire nous indique également que le soleil se lève au nord-est et se couche au nord-ouest, en culminant à un angle d'un peu moins de 60°.

La Figure 5.9 (b) montre la température de l'air à l'entrée du stock, T_{ent} et celle à la sortie, T_{sor} . Trois phases de fonctionnement sont visibles sur ce graphique : les phases de charge où $T_{ent} > T_{sor}$, les phases de décharge avec $T_{ent} < T_{sor}$ et les phases où le système n'est pas actif (i.e. les ventilateurs sont à l'arrêt). Les oscillations de la température d'entrée observées durant les charges 1 et 3 sont dues aux ouvertures et fermetures successives du toit. On observe ce phénomène qu'une seule fois durant la charge 2 car la journée était plus nuageuse comme le montre la Figure 5.9 (a). Par conséquent, la température à l'intérieur de la serre est plus basse, et la température seuil d'ouverture du toit (24 °C) n'est atteinte qu'une seule fois. Due à l'inertie thermique, cette température seuil permet de garder la température en dessous de la température maximale absolue dans une serre qui est de 35 °C (cf. partie 1.3).

On peut ensuite s'intéresser aux dynamiques des températures au sein du lit de roches. La Figure 5.11 montre l'emplacement exact des capteurs de température placés au sein d'un caisson (cf. partie 4.3).

La Figure 5.9 (c) présente les températures des capteurs T_1 , T_3 et T_5 présents dans le caisson instrumenté. Ces trois capteurs permettent de s'intéresser à l'homogénéité transverse de la température du stock. Étant donné que le système aéraulique a été conçu pour ne pas créer de chemins préférentiels (cf. 4.2.1), les trois températures devrait être relativement identiques. Cela s'observe pour T_1 et T_3 mais on note un

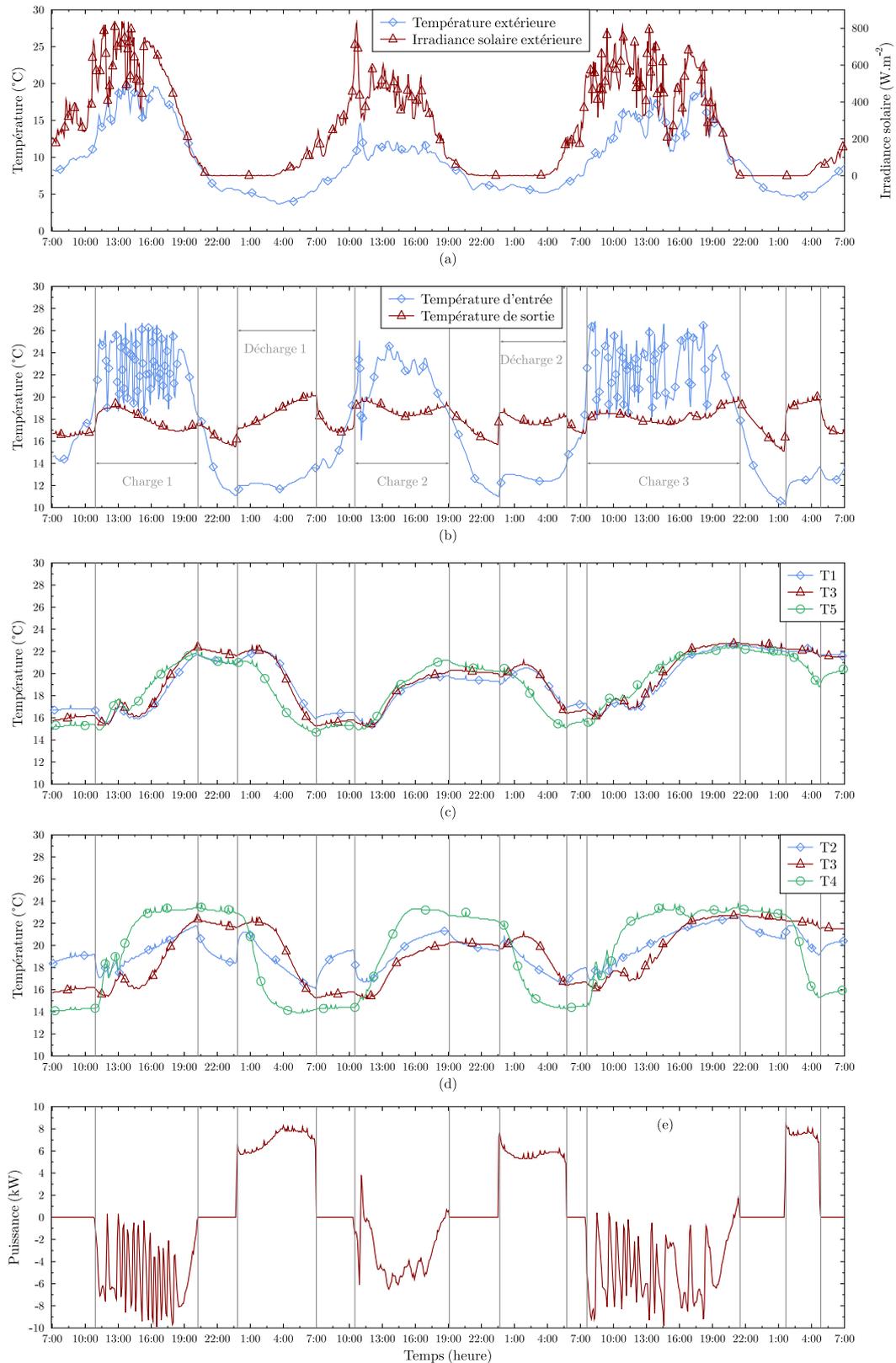


FIGURE 5.9 – Analyse du comportement thermique du système de stockage

petit décalage systématique de T_5 durant les phases de charge et de décharge, c'est à dire quand un flux d'air traverse le stock. Une première hypothèse pouvant expliquer ce

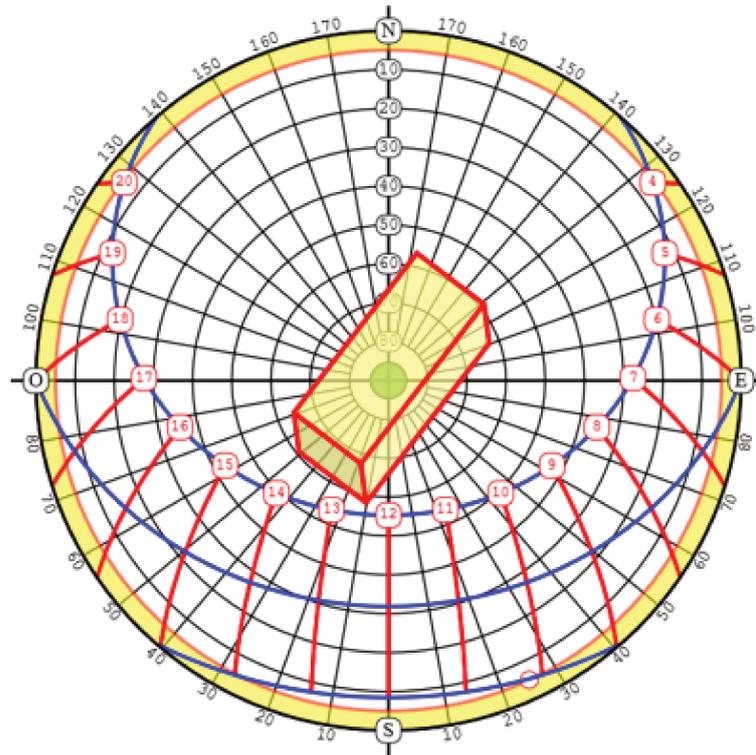


FIGURE 5.10 – Diagramme solaire polaire de Kuujjuaq

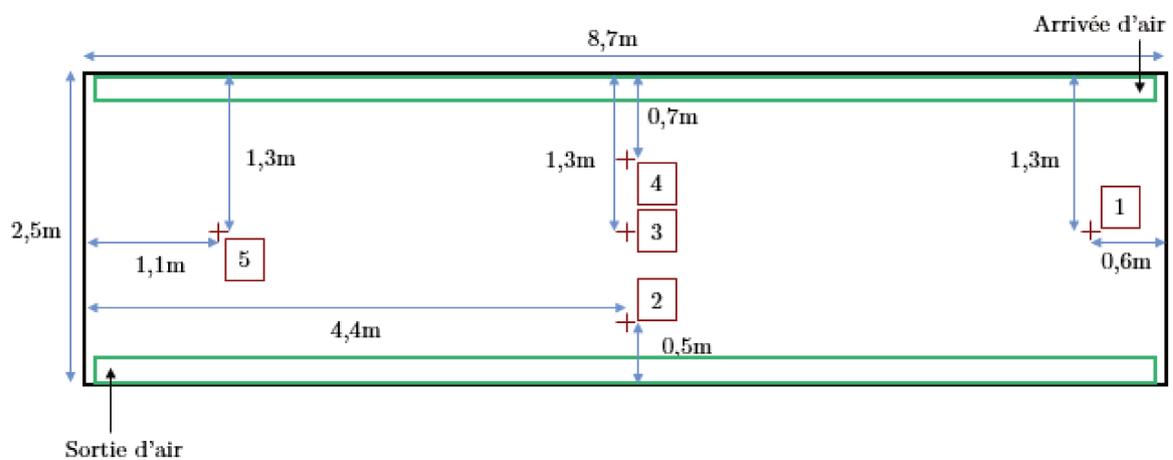


FIGURE 5.11 – Position des sondes de température dans le lit de roches

phénomène serait l'inhomogénéité du lit de roches. Une autre cause pourrait être que les capteurs sont insérés dans le lit de roches, et la proportion de surface des capteurs en contact avec la roche est susceptible de varier d'un capteur à l'autre. Par conséquent, la température mesurée, i.e. la température du capteur, doit être une moyenne de la température des roches et de la température de l'air. Quand l'air est au repos (c'est à dire quand les ventilateurs sont à l'arrêt, entre les phases de charge et de décharge), sa température s'équilibre rapidement avec la température des roches et la proportion de la surface du capteur au contact avec les roches n'est plus significative. Par contre,

quand l'air est en mouvement, la température mesurée est affectée par la surface de contact du capteur, et peut donc être différente de la température des roches.

La Figure 5.9 (d) montre les températures mesurées par les capteurs T_2 , T_3 et T_4 . L'analyse de ces températures permettent de s'intéresser au gradient de température dans la direction du flux d'air. Pendant les phases de charge, de l'air chaud entre dans le stock plus froid et se refroidit donc à mesure qu'il traverse le caisson en cédant de l'énergie aux roches. On doit donc avoir $T_4 > T_3 > T_2$. À l'inverse, durant les phases de décharge, on s'attend à avoir $T_4 < T_3 < T_2$. Entre les deux phases, les températures doivent rester relativement stables car le stock échange peu d'énergie avec l'extérieur dans la mesure où il est thermiquement isolé du sol et enveloppé dans une bâche étanche à l'eau et à l'air (cf. partie 4.3). Or, l'analyse des courbes de la Figure 5.9 (d) montre que le comportement n'est pas celui attendu, en particulier pour la température T_2 qui évolue d'une manière contre-intuitive. Si on regarde les phases de repos entre les charges et les décharges, on peut noter que T_2 retourne progressivement à un état d'équilibre (en augmentant après une phase de décharge et en diminuant après une phase de charge) avec une dynamique temporelle semblable à chaque fois. À la fin de ce retour à l'équilibre, on peut remarquer que T_2 , T_3 et T_4 se comportent tel que prévu ci-dessus. On peut alors faire la même hypothèse que précédemment. On peut supposer que les capteurs T_3 et T_4 mesurent une température proche de celle des roches. Au contraire, on peut supposer que la surface du capteur T_2 a une surface beaucoup plus exposée à l'air et donc que la température mesurée est plus proche de la température du flux d'air que de celle des roches. Ainsi, avant le début d'une phase de décharge, la température de l'air mesurée par T_2 est proche ou égale à celle des roches environnantes. Quand la phase de décharge commence, l'air froid est injecté dans le stock et se réchauffe dans les premières parties du caisson (représentées par T_4 et T_3). L'air réchauffé arrive sur T_2 qui voit ainsi sa température augmenter brutalement au début de la phase de décharge. Au long de cette phase, la chaleur est progressivement transmise à l'air par les roches. La chaleur est alors « poussée » depuis la zone représentée par T_4 vers la zone représentée par T_2 . On a une inversion du gradient avec T_2 qui doit être supérieure à T_3 . Cependant, le capteur T_2 continue à mesurer la température de l'air qui est maintenant plus froid que les roches environnantes puisqu'elles se sont réchauffées pendant la phase de décharge. On assiste alors à une augmentation de T_2 après la fin de la phase de décharge, puisque la température de l'air s'équilibre progressivement avec celle des roches en l'absence de flux d'air. Un raisonnement similaire peut être appliqué aux phases de charges.

La Figure 5.9 (e) présente la puissance instantanée du transfert thermique entre les roches du stock et l'air intérieur de la serre (\dot{Q}_{StoAir} , cf. 4.1.3). Cette puissance est calculée grâce à l'équation (4.1), en utilisant les températures T_{ent} et T_{sor} présen-

tées sur la Figure 5.9 (b), le débit d'air calculé dans la section 4.3 et en prenant les caractéristiques de l'air présentées dans le Tableau 5.2.

TABLEAU 5.2 – Caractéristiques du débit d'air

Masse volumique	$\rho_{air} = 1,25 \text{ kg m}^{-3}$
Chaleur spécifique	$c_{p,air} = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Débit volumique	$q_v = 780 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$

Cette puissance est évidemment nulle durant les phases de repos ($q_v = 0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), positive durant les phase de décharge et négative durant les phases de charge. Elle reste relativement constante pendant la décharge, variant légèrement entre 6 kW et 8 kW (toujours pour un seul caisson). On remarque que pendant la phase de charge, la puissance peut osciller rapidement à cause des oscillations de T_{ent} décrites précédemment (dues à l'ouverture du toit).

En conclusion, on peut remarquer que le système de stockage remplit son rôle durant la nuit : le changement de dynamique des températures d'entrée et de sortie est parfaitement visible au début de chaque phase de décharge. En effet, quand le soleil se couche, la température extérieure diminue progressivement jusqu'à atteindre un minimum entre 4 °C et 6 °C vers 04:00. La dynamique des températures d'entrée et de sortie du stock suit la même tendance jusqu'à ce que la phase de décharge commence. À ce moment on observe une montée rapide de ces températures : l'air commence à être injecté dans le stock à 12 °C et en ressort à une température comprise entre 17 °C et 20 °C. Le système maintient donc la température à l'intérieur de la serre au-dessus de 10 °C, ce qui limite l'écart de température entre le jour et la nuit pouvant être dommageable pour la croissance des plantes. On peut également noter que la température du stock est comprise entre 14 °C et 24 °C et donc que la terre de culture devrait être comprise dans cette plage de température, favorisant ainsi le développement racinaire.

5.2.3 Bilan énergétique

Les quantités d'énergie échangées durant les différentes phases de charge et de décharge pour les quatre caissons, sur la même période que celle étudiée dans la partie précédente (du 31 mai 2019 au 3 juin 2019) sont regroupées dans le Tableau 5.3.

Q_{StoAir} est l'énergie reçue par l'air de la serre depuis les roches du système de stockage (cf. partie 4.1.3). Cette quantité est calculée en intégrant la puissance calculée selon l'équation (4.1) (représentée sur la Figure 5.9 (e)) sur la durée de la phase considérée (charge ou décharge). La puissance est multipliée par quatre car il y a quatre caissons. La quantité Q_{so} correspond à l'énergie solaire transmise à l'intérieur de la

serre (cf. équation (5.2)). Elle est obtenue en intégrant le produit de l'irradiance solaire extérieure par la surface de la serre et le coefficient de transmission de l'enveloppe. Ce coefficient est une donnée du constructeur [108] : $\tau_{env} = 0,8$. L'énergie consommée par les quatre ventilateurs pendant le temps de charge ou de décharge est représentée par Q_{elec} . Chaque ventilateur a une puissance de 260 W ce qui donne l'équation (5.3).

$$Q_{StoAir} = \int_{t_i}^{t_f} \dot{Q}_{StoAir} dt = \int_{t_i}^{t_f} 4 \times q_v \rho_{air} c_{p,air} (T_{sor} - T_{ent}) dt \quad [J] \quad (5.1)$$

$$Q_{so} = \int_{t_{c,i}}^{t_{c,f}} \tau_{env} G^* A_{ser} dt \quad [J] \quad (5.2)$$

$$Q_{elec} = 4 \times 260 \times (t_f - t_i) \quad [J] \quad (5.3)$$

En considérant les définitions du coefficient de stockage η_s (cf. équation (4.3)) et du coefficient de récupération de la chaleur η_r (cf. équation (4.2)), on a donc :

$$\eta_s = \frac{-Q_{StoAir}^{c_n}}{Q_{so}^{c_n}} \quad [-] \quad (5.4) \quad \eta_r = \frac{Q_{StoAir}^{d_n}}{-Q_{StoAir}^{c_n}} \quad [-] \quad (5.5)$$

Où c_n et d_n représente respectivement la n-ième charge et la n-ième décharge qui suit directement la n-ième charge (par exemple charge 1 et décharge 1 du Tableau 5.3). On peut également introduire un coefficient de performance (COP) du système qui compare l'énergie thermique récupérée pendant les phases de décharge à l'énergie électrique nécessaire pour charger et décharger le stock :

$$COP = \frac{Q_{StoAir}^{d_n}}{Q_{elec}^{c_n} + Q_{elec}^{d_n}} \quad [-] \quad (5.6)$$

La première chose que l'on peut remarquer est que les phases de charge durent entre 8h30 et 13h20 et sont systématiquement plus longues que les phases de décharge qui durent entre 3h10 et 7h10. Ceci est due au fait que les phases de charge commencent au-dessus d'une certaine température seuil (20 °C). Or cette température est largement affecté par l'irradiance solaire. Par conséquent, étant donné l'importance de la ressource solaire lors des journées considérées (cf. Figure 5.9 (a)), il semble normal d'avoir des phases de charges plus longues que les phases de décharge. De plus, les nuits sont relativement courtes (moins de 8 h, cf. Figure 5.10) à cause de la latitude de Kuujuaq

TABLEAU 5.3 – Données énergétiques des charges et décharges du 31 mai 2019 au 3 juin 2019

Phase	Durée	Q_{StoAir} (kWh)	Q_{so} (kWh)	η_s (%)	η_r (%)	Q_{elec} (kWh)	COP
Charge 1	9h20	$-48,4 \pm 2,2$	576 ± 21	$8,4 \pm 0,5$		9,7	
Décharge 1	7h10	$50,6 \pm 2,2$			105 ± 7	7,5	3,0
Charge 2	8h35	$-28,5 \pm 1,7$	462 ± 19	$6,2 \pm 0,5$		8,9	
Décharge 2	6h05	$35,4 \pm 1,8$			124 ± 10	6,3	2,3
Charge 3	13h20	$-66,0 \pm 2,6$	621 ± 29	$10,6 \pm 0,7$		13,9	
Décharge 3	3h10	$23,7 \pm 1,6$			36 ± 3	3,3	1,4

(58°) et de la proximité de la période étudiée avec le solstice d'été. On peut également noter, en utilisant la Figure 5.9 (a), que le lever du soleil induit une augmentation de la température de la serre et provoque donc la fin de la phase de décharge.

Durant les trois périodes de charge étudiées, l'énergie stockée dans les roches représente entre 6,2 % et 10,6 % de l'énergie solaire disponible à l'intérieur de la serre. Ces données sont du même ordre de grandeur que celles de Bouhdjar et al. (1996) [22] ($\eta_s = 8\%$) mais sont bien plus basses que celles recueillies par Kurklu et al. (2003) [23] à Antalya ($\eta_s = 34\%$). D'après les auteurs de cette dernière étude, cette valeur élevée de η_s peut-être expliquée par plusieurs facteurs : un débit d'air important ($1\,100\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$), une isolation efficace du lit de roches, des chicane placées à l'intérieur du lit de roches pour créer de la turbulence, une forte ressource solaire et la propriété des roches utilisées. De plus, le système installé à Kuujuaq ne fonctionne pas de manière optimale dans la mesure où l'opérateur de la serre a demandé à ce que le toit soit ouvert à partir de 24 °C afin d'éviter une surchauffe de la serre, notamment dans le cas où il y aurait un problème avec le système de stockage. Ce faisant, on rejette la chaleur à l'extérieur au lieu de la stocker. Par ailleurs, une valeur faible de η_s peut signifier que la masse de roches n'est pas assez conséquente. Cependant cette masse était imposée par des contraintes géométriques (cf. partie 4.2.1).

Les valeurs de η_r sont très dispersées, allant de 36 % à 124 %. La faible valeur de 36 % s'explique par une longue phase de charge (13h20) suivi d'une très courte phase de décharge (3h10). En effet la charge 3 a eu lieu pendant une journée plus ensoleillée que les autres. Par conséquent, la température à l'intérieur de la serre atteint la température de déclenchement de la phase de stockage plus tôt dans la journée et la température de fin de la phase de charge plus tard. La température du stock est donc plus importante à la fin de la phase de charge (cf. Figure 5.9 (c)). Une valeur de η_r supérieure à 100 % signifie que le système de stockage rend plus d'énergie durant une phase de décharge qu'il n'en a stocké durant la phase de charge précédente. Ceci est possible dans la mesure où le système de stockage peut décharger de l'énergie stockée lors de plusieurs

charges précédentes. Ce phénomène avait déjà été relevé par Bouhdjar et al. (1996) [22].

Afin d'analyser la consommation d'énergie des ventilateurs, les trois cycles (charge et décharge) présentés dans le Tableau 5.3 sont pris en compte et le COP est calculé pour chaque cycle. Ce COP varie entre 1,4 et 3,0; cela signifie que le système de stockage peut fournir jusqu'à trois fois plus d'énergie thermique durant les phases de décharge qu'il ne consomme d'énergie électrique. Cependant, il faut prendre en compte le fait que l'électricité de Kuujuaq est fournie grâce à des génératrices fonctionnant au gazole. D'après le gestionnaire du réseau [109], les génératrices sont des Caterpillar 3615 qui fournissent une puissance électrique de 1 400 kW pour une consommation de gazole de 400 L h^{-1} [110]. En divisant la puissance électrique par la consommation horaire de gazole, on obtient la quantité d'énergie électrique par litre de gazole consommé : $3,5 \text{ kWh L}^{-1}$. En considérant un COP entre 1,4 et 3,0 on peut alors affirmer que l'énergie thermique fournie par le système de stockage par litre de gazole consommé varie entre $4,9 \text{ kWh L}^{-1}$ et $10,5 \text{ kWh L}^{-1}$. On peut comparer ces chiffres à ceux obtenus en brûlant directement le gazole pour chauffer la serre : en considérant une valeur calorifique nette du gazole de 36 MJ L^{-1} [111], on peut dire que brûler directement le gazole apporterait 10 kWh L^{-1} d'énergie thermique, un chiffre comparable à la valeur haute du système de stockage. Cependant, ce dernier comporte plusieurs avantages qu'un chauffage au gazole n'aurait pas. Premièrement, il faut noter que la consommation électrique des ventilateurs pendant la phase de charge est prise en compte dans le calcul du COP (cf. équation (5.6)). Or, le fait de stocker la chaleur pour la rendre nuit permet de réduire la température durant la journée (cf. Figure 5.5) et donc de climatiser l'espace, un avantage non négligeable pour les plantes qui ne pourrait pas être apporté par un chauffage au gazole. En outre, les roches sont placées en dessous de la terre de culture, ce qui signifie que le système peut aider à dégeler la terre au début de la saison de culture grâce aux échanges conductifs entre les roches et le milieu de culture.

Les données ayant été récoltées durant toute la saison de culture 2019, une analyse à l'échelle hebdomadaire est possible. Le Tableau 5.4 présente les bilans énergétiques par semaine au cours de la saison de culture 2019.

Le COP, η_s et η_r présentés dans ce tableau sont calculés en fonction de l'énergie totale chargée ou déchargée durant la semaine considérée. Ils ne sont donc pas des moyennes de ces mêmes indicateurs à l'échelle journalière. On peut tout d'abord remarquer de grandes disparités pour ces indicateurs : le COP varie entre 0 et 3,6 tandis que η_s fluctue entre 5,1 % et 18,8 % et η_r évolue entre 0 % et 530 %. On peut également noter que deux périodes aux tendances différentes se dégagent : le début/milieu de saison (semaines 1 à 13) et la fin de saison (semaines 14 à 21).

TABLEAU 5.4 – Données énergétiques des charges et décharges durant la saison de culture 2019

Semaine	Dates	Énergie chargée (kWh)	Énergie déchargée (kWh)	COP	η_s (%)	η_r (%)
1	31/05 au 06/06	270	316	2,8	11,8	117
2	07/06 au 13/06	260	173	2,1	12,1	67
3	14/06 au 20/06	154	29	0,5	7,9	19
4	21/06 au 27/06	233	103	1,8	9,3	44
5	28/06 au 04/07	122	16	0,5	10,8	13
6	05/07 au 11/07	156	109	1,9	8,4	70
7	12/07 au 18/07	105	48	0,5	7,3	27
8	19/07 au 25/07	159	25	0,4	7,4	16
9	26/07 au 01/08	84	0	0	5,1	0
10	02/08 au 08/08	106	2	0	5,2	2
11	09/08 au 15/08	66	48	0,8	5,1	72
12	16/08 au 22/08	145	150	2	5,8	103
13	23/08 au 29/08	93	4	0,1	8	4
14	30/08 au 05/09	124	310	3,5	8,3	250
15	06/09 au 12/09	191	446	3,6	11,2	234
16	13/09 au 19/09	230	344	3,2	11,9	150
17	20/09 au 26/09	174	371	3,4	13,6	213
18	27/09 au 03/10	95	443	3	16,4	465
19	04/10 au 10/10	83	271	1,9	14,8	326
20	11/10 au 17/10	166	442	2,8	18,8	266
21	18/10 au 25/10	72	380	2,2	15,4	530

Le début/milieu de saison se distingue par une moyenne du COP de 1 et une moyenne de η_s et η_r de respectivement 8,0% et 43%. Les faibles valeurs du COP et de η_r sont dues à des énergies déchargées assez faible. En effet, la température de début de décharge est fixée à 12°C et il est courant que la température à l'intérieur de la serre ne descende pas en dessous de ce seuil, notamment à partir de mi-juin (semaine 3). Les valeurs relativement faibles de η_s , notamment entre les semaines 9 et 12 s'expliquent par le fait que le stock charge peu d'énergie : comme le stock ne se décharge pas, sa température reste élevée et les phases de charge sont beaucoup moins efficaces. Les ventilateurs soufflent ainsi de l'air chaud dans des roches déjà chaudes, ce qui consomme de l'énergie électrique de manière peu efficace et contribue aux faibles valeurs du COP. Cependant, l'air soufflé pourrait avoir une température plus élevée si le toit ne s'ouvrait pas à partir de 24°C par exemple. La fin de saison se caractérise par

une moyenne du COP de 3,0 et une moyenne de η_s et η_r de respectivement 13,8% et 304%. Ces valeurs élevées expriment le fait que l'on décharge l'énergie stockée durant les semaines précédentes et que les phases de charge sont peu efficaces. En effet, durant les dernières semaines de la saison de culture, la température à l'intérieur de la serre reste la plupart du temps en dessous de 12°C. Les ventilateurs fonctionnent alors en permanence puisque la température est en dessous de la consigne de décharge. En journée, les ventilateurs injectent alors de l'air à une température proche du stock ce qui explique les phases de charges peu efficaces.

5.3 Discussion

L'analyse du fonctionnement du système de stockage nous a permis de soulever plusieurs problématiques. Tout d'abord, l'ouverture du toit à partir de 24°C est pénalisant pour le système de stockage car la chaleur est rejetée à l'extérieur au lieu d'être stockée, impactant ainsi négativement le coefficient de stockage η_s . Par ailleurs, l'ouverture du toit fait chuter la température d'entrée du stock ce qui a pour conséquence d'avoir une puissance nulle ou positive au cours de certaines charges, comme au début de la charge 2 (cf. Figure 5.9). Or une puissance positive signifie que le stock décharge de l'énergie pendant une phase de charge. Cependant, cette mesure était imposée par le gestionnaire de la serre afin d'éviter une chaleur excessive dommageable pour les plantes, notamment dans le cas d'un dysfonctionnement du système de stockage. Une amélioration possible concernant l'installation de futur système de stockage dans d'autres serres pourrait être de modifier le système aéraulique faisant circuler l'air. On pourrait alors imaginer que l'air rejeté en-dehors de la serre en cas de température trop élevée passe d'abord dans le système de stockage afin d'augmenter l'énergie stockée.

Ensuite, l'analyse à l'échelle de la saison indique que l'attribution de températures de seuils fixes pour le déclenchement des phases de stockage et de déstockage n'est pas optimale. En effet, on a vu que durant le milieu de saison la température intérieure nocturne reste suffisamment élevée pour ne pas déclencher de phase de décharge. Les pierres du stock gardent alors la chaleur accumulée lors de la charge. Ainsi, lorsqu'une nouvelle phase de charge commence (i.e. quand la température dans la serre dépasse 20°C), de l'air chaud est injecté dans un stock qui n'a pas refroidi durant la nuit. On stocke alors très peu de chaleur en utilisant quand même de l'électricité pour faire fonctionner les ventilateurs ce qui amène à de faibles valeurs de COP. Par ailleurs, cette attribution fixe des seuils de température a également un effet sur la fin de saison. Durant celle-ci, la température intérieure peut rester en dessous de la température de consigne de déclenchement de la phase de décharge (12°C) y compris pendant la journée. Cela a pour effet d'avoir un fonctionnement permanent des ventilateurs qui

n'est pas efficace. Afin d'améliorer ce point, une piste serait de fixer dynamiquement les périodes de fonctionnement des ventilateurs, en prenant en compte à la fois la température à l'intérieur de la serre et la température des roches du système de stockage. Par exemple une condition de déclenchement des phases de charge et de décharge pourrait être attribué à la différence entre la température de l'air et la température du stock.

Enfin, plusieurs autres améliorations peuvent être considérées pour le système de stockage. Par exemple l'installation de panneaux photovoltaïques ou d'éoliennes couplés à des batteries électrochimiques permettrait de se passer complètement du gazole utilisé pour produire l'électricité nécessaire au fonctionnement des ventilateurs du système de stockage. Une autre amélioration envisagée serait de coupler ce système de stockage avec un système de collecteurs solaires thermiques à air afin de collecter plus de chaleur. Cela pourrait permettre de charger le stock en début de saison afin d'étendre la saison de culture.

Conclusion

Les campagnes expérimentales menées durant cette thèse ont permis d'instrumenter une des serres de Kuujjuaq afin de recueillir des données. Ainsi, la première campagne d'instrumentation a permis d'installer un pyranomètre mesurant l'irradiance solaire extérieure et des capteurs permettant d'accéder à la température et l'humidité relative à l'extérieur et à l'intérieur de la serre durant plus de trois ans. La seconde campagne a permis d'ajouter un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent ainsi qu'un compteur d'eau à l'intérieur de la serre et un système permettant de détecter l'ouverture du toit. Cette seconde campagne a également permis d'installer un système d'acquisition des données permettant d'accéder aux mesures à distance, évitant ainsi d'aller sur place pour récolter les données.

L'analyse des données récoltées a permis de tirer plusieurs conclusions. Premièrement, l'examen de la température extérieure durant la saison de culture met en avant la nécessité d'une production horticole sous serre, à cause de températures trop basses pouvant être négatives même en juin. Ensuite, l'étude des gradients verticaux et horizontaux de température à l'intérieur de la serre montre que la température est globalement uniforme. Cela a permis de réduire le nombre de capteurs de température à l'intérieur de la serre, et sera utile dans la détermination du type de modèle à utiliser. L'analyse de l'irradiance solaire avant et au début de la saison de culture met en évidence une forte ressource solaire comparable à la Hollande, pays dans lequel la sericulture est très développée. Cependant, en étudiant les températures à l'intérieur de la serre, on peut noter qu'il y a un écart de température important entre le jour et la nuit. D'une part cette grande amplitude thermique est un facteur de stress important pour les plantes durant la saison de culture. D'autre part c'est un frein à l'extension de la saison de culture dans la mesure où la température intérieure reste légèrement négative avant le début de la saison, au début du mois de mai. Ces constatations ont amené l'administration locale (ARK) et la mairie (VN de Kuujjuaq) à nous associer à un projet d'installation d'un système de stockage thermique.

Ce système est constitué de deux sous-systèmes. Le premier est passif (échange de chaleur par convection naturelle) et est composé d'une dalle de béton d'environ dix tonnes et de roches allant de 5 à 30 cm placées dans des gabions (sorte de grillage).

Le second est actif (échange de chaleur par convection forcée) et utilise l'air comme fluide caloporteur et des roches en tant que matériau de stockage. En partenariat avec l'ARK et le VN et avec le soutien financier de la Société du Plan Nord, ce système de stockage thermique a été conçu, construit et instrumenté à l'automne 2018. Il a été mis en fonctionnement à la fin du mois de mai 2019 et les données de la saison de culture 2019 ont pu être récoltées et analysées. Ces données montrent que le système permet de gagner entre 5 et 7°C à l'intérieur de la serre durant la nuit par rapport à une période sans système ayant les mêmes conditions climatiques extérieures. Par ailleurs, il permet de maintenir une température minimale en moyenne 5,7°C supérieure à la température extérieure quand cette moyenne était de 2,7°C en l'absence de stockage thermique. En outre l'analyse de l'efficacité du système de stockage montre qu'il peut stocker entre 5,1 % et 18,8 % de l'énergie solaire disponible à l'intérieur de la serre et qu'il peut restituer bien plus que 100 % de l'énergie stockée selon les semaines ce qui indique qu'il peut stocker de l'énergie pendant plusieurs semaines afin de la décharger plus tard. Enfin, l'étude énergétique du système permet de constater qu'il peut fournir jusqu'à trois fois plus d'énergie thermique qu'il n'utilise d'énergie électrique pour stocker et déstocker la chaleur. On a pu remarquer que l'ouverture du toit et les températures fixes de déclenchement des phases de charge et de décharge impacte négativement l'efficacité du système de stockage. Ces différentes constatations nous ont amené à proposer plusieurs pistes d'amélioration.

Finalement, une modélisation numérique du comportement de la serre couplée à ce système de stockage permettrait de comprendre plus en profondeur l'influence de divers paramètres (masse de roches du stock, valeur du débit d'air, diamètre des roches utilisées ou encore fraction de vide du stock) sur l'efficacité du système. La première étape d'un tel travail fait l'objet de la partie suivante.

Troisième partie

Approche numérique

Chapitre 6

La modélisation de serre

Sommaire

6.1	Les différents types de modèle	102
6.1.1	Les modèles à paramètres climatiques uniformes	102
6.1.2	Les modèles CFD	103
6.1.3	Choix d'un modèle	105
6.2	Principes et équations du modèle	105
6.2.1	Fonctionnement global et notations	105
6.2.2	Dimensions caractéristiques de la serre	107
6.2.3	Modèle de rayonnement solaire (CLO)	108
6.2.4	L'échange conductif au sein du sol	110
6.2.5	Bilans d'énergie	111
6.2.6	Bilans de masse	113
6.3	Explicitation des flux	114
6.3.1	Les échanges convectifs	114
6.3.2	Les échanges radiatifs infrarouges (GLO)	115
6.3.3	La ventilation et l'advection	116
6.3.4	Les échanges de vapeur d'eau et de chaleur latente	117
6.4	Développement numérique	119

Ce chapitre présente le modèle numérique du comportement thermique d'une serre sans système de stockage. Le choix du modèle, les hypothèses et les équations utilisées sont exposés. Les expressions des différents flux thermiques et massiques sont également décrites. Les valeurs numériques des différents paramètres du modèle seront présentées dans le chapitre 7.

6.1 Les différents types de modèle

Les modèles numériques du climat sous serre se divisent en deux grandes catégories : les modèles utilisant l'hypothèse de paramètres climatiques uniformes, reposant sur l'hypothèse de « la cuve parfaitement brassée » [112] et les modèles utilisant la mécanique des fluides numérique (qui sera nommé ici par la dénomination anglaise computational fluid dynamics, CFD) [113]. Afin de sélectionner un modèle, les inconvénients et avantages de ces deux types de modèles ainsi que leur différentes applications sont présentés ici.

6.1.1 Les modèles à paramètres climatiques uniformes

Le modèle de la cuve parfaitement brassée est le premier type de modèle à avoir été développé, dans les années 1980 [8]. Il considère les éléments de la serre comme des volumes de contrôle (aussi appelés « nœuds ») ayant des grandeurs physiques (température, humidité, etc.) uniformes. Les nœuds classiquement utilisés dans ce type de modèle sont l'air intérieur de la serre, l'enveloppe, le sol ainsi que les plantes cultivées au sein de celle-ci [74, 112, 114–116]. Afin de simuler le comportement des plantes, l'approche de la cuve parfaitement brassée utilise le modèle de « grande feuille » consistant à considérer les végétaux comme une espèce unique à une seule feuille [112].

Après avoir défini les éléments à modéliser, des bilans de masse et d'énergie sont effectués sur chaque nœud afin de calculer l'évolution temporelle des grandeurs décrites. Les bilans d'énergie prennent en compte les différents échanges thermiques qui peuvent être de type convectif, conductif, radiatif ou advectif selon les nœuds considérés. Les bilans de masse servent à simuler l'évolution de la teneur de l'air en vapeur d'eau et éventuellement en dioxyde de carbone. Ces bilans (de masse et d'énergie) s'expriment sous la forme d'équations différentielles ordinaires du premier ordre.

Suivant l'objectif du modèle, d'autres éléments (majoritairement des systèmes de traitement de l'air, i.e. chauffage, stockage thermique, gestion de l'humidité) pouvant être décrits par des sous-modèles sont susceptibles d'être pris en compte. Par exemple, Sethi et Sharma (2007) [117] modélisent un système de stockage de chaleur dans un aquifère utilisant un échangeur de chaleur, Zhou et al. (2017) [118] simulent le stockage

de chaleur au sein d'un matériau à changement de phase, Wang et al. (2014) et Deiana et al. (2014) [119] prennent en compte la température d'un mur nord faisant office de masse thermique dans une serre chinoise (cf. partie 1.2.1). Dans le cadre de sa thèse visant à développer un modèle universel de serres (i.e. fonctionnant pour différentes géométries et différents climats), Vanthoor (2011) [94] ajoute plusieurs constituants : un réseau de tuyaux d'eau chaude et un système de chauffage à air pulsé pour chauffer la serre, des panneaux de refroidissement par évaporation (« cooling pads ») et un système de climatisation afin de la refroidir, un brumisateur pour augmenter l'humidité et abaisser la température ou encore un système d'enrichissement du dioxyde de carbone. L'auteur prend également en compte l'ajout facultatif d'écrans, ombrant ou thermique. Dans le cas de l'utilisation d'un écran thermique, le nœud air est alors divisé en deux, au-dessus et au-dessous de l'écran.

Les modèles de cuve parfaitement brassée permettent ainsi de simuler le comportement thermique des serres de manière globale à l'aide d'une paramétrisation simple, et d'intégrer la modélisation de système de stockage ou de chauffage. Cependant, l'hypothèse de la température uniforme au sein de chaque nœud ne permet pas d'étudier certaines problématiques devant prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du climat sous serre : il faut alors se tourner vers les modèles utilisant la CFD.

6.1.2 Les modèles CFD

À l'aide de la progression des logiciels de CFD et de l'accroissement de la vitesse et de la capacité de calcul des ordinateurs, les modèles prenant en compte la distribution spatiale des paramètres climatiques au sein de serres ont pu être développés vers la fin des années 1990 [112]. Les modèles CFD servent à étudier des phénomènes plus fins ou plus localisés que les modèles de cuve parfaitement brassée. Par exemple, Boulard et Wang (2002) [120] les utilisent pour étudier l'hétérogénéité de la transpiration des cultures, Tong et al. (2009) [17] pour simuler la distribution spatiale du climat au sein d'une serre chinoise, Kichah et al. (2012) pour modéliser la transpiration et la distribution verticale de la température de végétaux dans une serre tandis que Kim et al. (2017) [121] et Villagrán et al. (2019) [122] s'en servent pour étudier l'impact de la géométrie de la serre sur la ventilation naturelle au sein de celle-ci. Morille (2012) [8] a consacré sa thèse au développement d'un modèle CFD de serre multi-chapelles lui permettant notamment d'analyser la distribution de transpiration des végétaux ainsi que les zones de l'enveloppe sur lesquelles la vapeur d'eau se condense.

Afin de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des paramètres climatiques, un maillage des différents éléments de la serre (sol, enveloppe, air intérieur, plantes) est effectué. Cela consiste à diviser les éléments en plusieurs milliers – voire millions [123]

– de mailles (cf. Figure 6.1) qui sont chacune un volume de contrôle aux grandeurs physiques uniformes. Les équations aux dérivées partielles issues de la mécanique des fluides et régissant l'évolution temporelle des paramètres climatiques peuvent ensuite être résolues, notamment à l'aide de logiciels, libres ou commerciaux. Il est alors possible de représenter la distribution des paramètres climatiques sous forme de champs de température, d'humidité (cf. Figure 6.2) ou de vitesse de l'air par exemple.

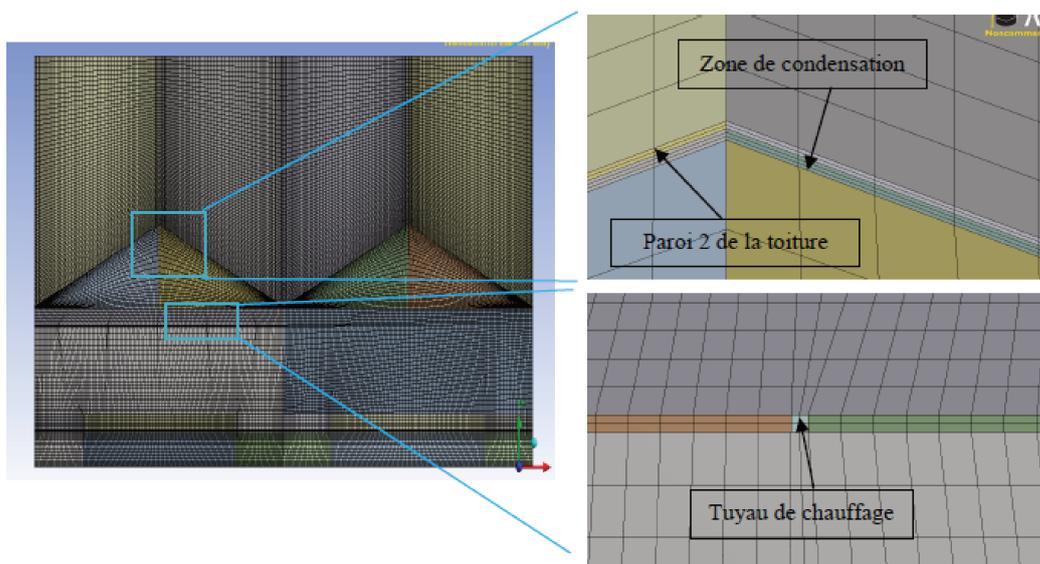


FIGURE 6.1 – Exemple de maillage d'une serre multi-chapelles (Morille (2012) [8])

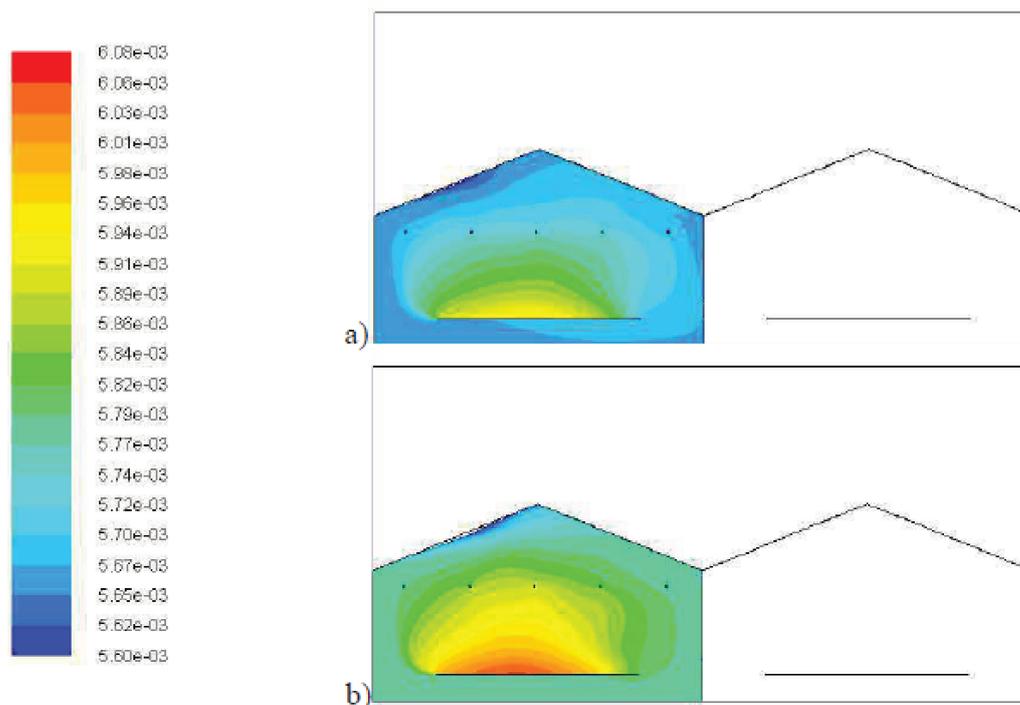


FIGURE 6.2 – Exemple de champ d'humidité absolue simulé par un modèle CFD à différents moments de la journée (Morille (2012) [8])

Les modèles CFD permettent donc de simuler des phénomènes plus localisés que les modèles de cuve parfaitement brassée en prenant en compte la distribution spatiale des paramètres climatiques. Ils sont cependant plus coûteux en puissance (i.e. en temps de calcul) et en temps de développement dans la mesure où beaucoup plus d'informations sont requises (conditions initiales de chaque maille et conditions aux limites notamment).

6.1.3 Choix d'un modèle

L'objectif à long terme du modèle développé dans cette thèse est d'être couplé avec des systèmes énergétiques et de permettre leur étude en fonction de divers paramètres liés à leur conception et/ou à leur système de contrôle-commande. Les périodes de simulation envisagées sont celles de la saison de culture soit plusieurs mois. Ainsi, il est préférable d'avoir un modèle représentatif le plus simple possible et peu coûteux en ressource de calcul. Le modèle de la cuve parfaitement brassée paraît donc plus adapté dans notre cas qu'un modèle CFD. La plupart de ces modèles sont développés et validés pour un seul lieu et donc un seul type de climat. Cependant, Vanthoor (2011) [94] a écrit un modèle validé sur trois types de climat en se basant sur les travaux de De Zwart (1996) [124]. Le modèle choisi dans le cadre de cette thèse s'appuie majoritairement sur le travail de Vanthoor et la partie suivante présente les principales hypothèses de ce modèle, les modifications apportées à celui-ci ainsi que les bilans énergétiques et massiques sur lesquels il se base.

6.2 Principes et équations du modèle

Le modèle de serre présenté dans cette partie n'inclut pas le système de stockage. Ainsi, la simulation du comportement thermique de la serre se fait en considérant quatre éléments (i.e. volumes de contrôle ou nœuds) : l'air, le sol, l'enveloppe et la canopée (i.e. les plantes à l'intérieur de la serre).

6.2.1 Fonctionnement global et notations

Il est important de considérer les hypothèses et limitations du modèle utilisé. Ainsi, le modèle initial de Vanthoor ne prend pas en compte certains phénomènes :

- La différenciation du rayonnement solaire direct et diffus
- L'impact sur la transmission du flux solaire de la condensation sur l'enveloppe
- L'évaporation de la condensation sur l'enveloppe

- La condensation sur les plantes
- L'évapotranspiration du sol

En plus des hypothèses précédentes, certaines modifications ont été apportées à ce modèle :

- Modification du modèle solaire (cf. partie 6.2.3)
- Pas de croissance du végétal (cf. partie 6.2.5)
- Pas de bilan de masse sur le dioxyde de carbone (cf. partie 6.2.6)
- Pas de rayonnement infrarouge vers le ciel pour les éléments à l'intérieur de la serre (cf. partie 6.3.2)

Les flux thermiques et massiques entre ces éléments sont schématisés sur la Figure 6.3.

Selon leur nature, les flux d'énergie thermique sont notés différemment. Ainsi, le flux solaire (rayonnement de courte longueur d'onde (CLO), cf. partie 6.2.3) reçu par l'élément i est écrit \dot{Q}_i^{CLO} , le flux d'énergie latente cédée par condensation ou prélevée par évaporation à un élément i est appelé \dot{Q}_i^{Lat} tandis que le flux émis par un élément i vers un élément j est noté \dot{Q}_{ij} s'il est conductif, convectif ou advectif (i.e proportionnel à la différence de température entre i et j). Les flux représentant un rayonnement de grande longueur d'onde (GLO) (cf. partie 6.3.2) sont écrits \dot{Q}_{ij}^{GLO} . Les flux massiques de vapeur d'eau d'un élément i vers un élément j sont notés E_{ij} .

Le mécanisme climatique global est le suivant : l'enveloppe, le sol et la canopée se réchauffent en absorbant le flux solaire (respectivement \dot{Q}_{Env}^{CLO} , \dot{Q}_{Sol}^{CLO} et \dot{Q}_{Can}^{CLO} , cf. partie 6.2.3). L'air échange de la chaleur de manière convective avec ces trois éléments (\dot{Q}_{AirEnv} , \dot{Q}_{SolAir} et \dot{Q}_{CanAir} , cf. partie 6.3.1) et le sol transmet une partie de la chaleur absorbée vers les couches de sol inférieures par conduction ($\dot{Q}_{SolSol(2)}$, cf. partie 6.2.4). L'enveloppe échange également de manière convective avec l'air extérieur (\dot{Q}_{EnvExt} , cf. partie 6.3.1). Le sol, l'enveloppe et la canopée échangent de la chaleur sous forme de rayonnement thermique infrarouge (\dot{Q}_{CanSol}^{GLO} , \dot{Q}_{CanEnv}^{GLO} et \dot{Q}_{SolEnv}^{GLO} , cf. partie 6.3.2). L'enveloppe échange également avec le ciel ($\dot{Q}_{EnvCiel}^{GLO}$). L'air intérieur échange de la chaleur et de la vapeur d'eau avec l'extérieur par advection (respectivement \dot{Q}_{AirExt} et E_{AirExt}). Cela peut se faire par l'intermédiaire de fuites dans l'enveloppe de la serre, par l'ouverture de la porte ou par ventilation naturelle quand le toit est ouvert (cf. partie 6.3.3). Deux autres échanges massiques sont pris en compte : l'évapotranspiration des plantes (E_{CanAir}) et la condensation sur l'enveloppe (E_{AirEnv}). Ces échanges massiques sont associés à des flux de chaleur latente, respectivement \dot{Q}_{Can}^{Lat} et \dot{Q}_{Env}^{Lat} (cf. partie 6.3.4). Ces deux derniers flux ne sont pas représentés sur la Figure 6.3 dans la mesure où il ne s'agit pas d'un échange entre deux nœuds : l'énergie mise en jeu dans ce phénomène provient du changement d'état de l'eau.

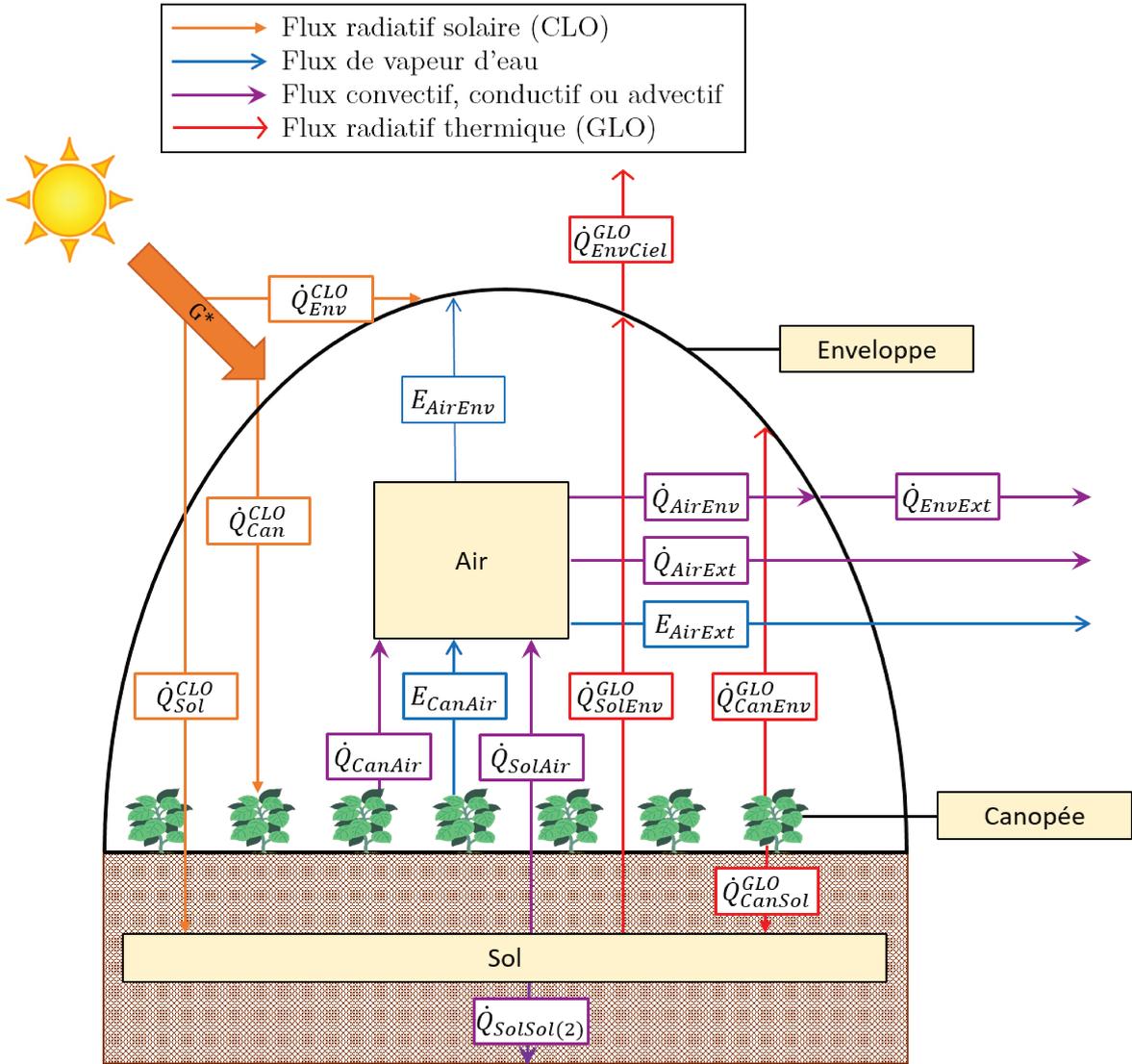


FIGURE 6.3 – Schéma des échanges thermiques et massiques au sein d'une serre

6.2.2 Dimensions caractéristiques de la serre

Afin de calculer les différentes dimensions de la serre nécessaires au modèle, celle-ci est considérée comme un demi-cylindre elliptique : les faces nord-est et sud-ouest sont représentées par des demi-ellipses de demi-grand axe $h_{ser} = 4,1$ m et de demi-petit axe $\frac{l_{ser}}{2} = 3,8$ m (cf. Figure 6.4).

Le volume de la serre est alors donné par l'équation (6.1) :

$$V_{air} = \frac{\pi}{2} h_{ser} \frac{l_{ser}}{2} \times L_{ser} \quad [\text{m}^3] \quad (6.1)$$

Il n'existe pas de formule permettant de calculer le périmètre exact d'une ellipse mais on peut utiliser l'approximation de Kepler [125] qui consiste à approcher la circonférence désirée par celle d'un cercle dont le rayon serait la moyenne arithmétique des deux



FIGURE 6.4 – Face nord-est de la serre

demi-axes de l'ellipse. La surface d'enveloppe est alors calculée grâce à l'équation (6.2) :

$$A_{env} = 2 \times \frac{\pi}{2} h_{ser} \frac{l_{ser}}{2} + \pi \frac{(h_{ser} + \frac{l_{ser}}{2})}{2} \times L_{ser} \quad [\text{m}^2] \quad (6.2)$$

Le volume de l'enveloppe V_{env} est ensuite calculée en multipliant sa surface, A_{env} , par son épaisseur, h_{env} .

6.2.3 Modèle de rayonnement solaire (CLO)

Le rayonnement solaire reçu par une serre, appelé rayonnement CLO (courte longueur d'onde) peut être divisé en trois bandes de longueurs d'onde : le rayonnement ultraviolet (UV) dans la bande 0,3–0,4 μm , le rayonnement visible dans la bande 0,4–0,7 μm et le rayonnement proche infrarouge dans la bande 0,7–3 μm . Or les plantes n'utilisent qu'une partie du spectre du rayonnement solaire pour effectuer le processus de photosynthèse. Ce rayonnement, appelé PAR (photosynthetically active radiation), est par définition la bande spectrale comprise entre 0,4 et 0,7 μm [126], ce qui correspond au rayonnement visible. Les végétaux transmettent, réfléchissent et absorbent donc le rayonnement solaire différemment en fonction de la longueur d'onde considérée.

Cependant, la majorité des auteurs modélisant des serres ne différencient pas le PAR du rayonnement proche infrarouge [74, 114–118]. Le modèle de Vanthoor sépare ces deux bandes de longueurs d’onde en attribuant 50 % de l’intensité totale du rayonnement solaire au PAR et 50 % au proche infrarouge en négligeant le rayonnement UV [124, 127]. Cette considération se justifie dans le cadre de la thèse de Vanthoor dans la mesure où il développe un sous-modèle de croissance et de productivité des plantes qui nécessite de bien différencier le PAR du reste du rayonnement afin de prendre en compte la photosynthèse végétale. Cependant, le modèle thermique de serre présenté ici ne prend pas en compte la croissance végétale et un modèle simplifié du rayonnement solaire est alors proposé. Il consiste à considérer l’enveloppe, la canopée et le sol comme trois couches superposées (cf. Figure 6.5). Les flux sur cette figure sont exprimés par unité de surface et l’exposant CLO n’est pas mentionné pour des raisons de lisibilité. Les coefficients de transmission, de réflexion et d’absorption sont respectivement désignés par τ , r et a . Les absorptions comptant pour moins de 1 % du flux solaire total reçu par la serre (G^*) sont négligées ce qui amène à seulement prendre en compte la primo-réflexion sur la canopée. En effet, en considérant $\tau_{env} = 0,76$, $r_{can} = 0,15$ et $a_{env} = 0,14$ (cf. Tableau 7.2 du chapitre 7 et l’équation (6.7)), on obtient $\tau_{env}r_{can}a_{env} = 0,016$ ce qui signifie que l’absorption de rayonnement solaire par l’enveloppe après réflexion sur la canopée vaut 1,6 % du flux solaire total reçu par la serre.

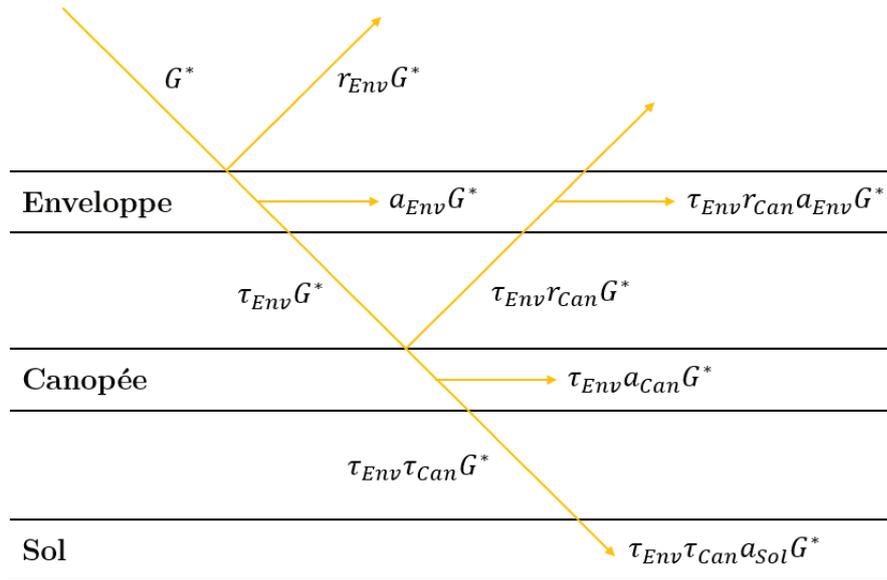


FIGURE 6.5 – Schéma du modèle de rayonnement solaire (CLO)

Le flux solaire absorbé par l’enveloppe, la canopée et le sol est respectivement exprimé par les équations (6.3), (6.4) et (6.5).

$$\dot{Q}_{Env}^{CLO} = a_{env}^{CLO}(1 + \tau_{env}^{CLO}r_{can}^{CLO})G^*A_{ser} \quad [W] \quad (6.3)$$

$$\dot{Q}_{Can}^{CLO} = \tau_{env}^{CLO} a_{can}^{CLO} G^* A_{ser} \quad [W] \quad (6.4)$$

$$\dot{Q}_{Sol}^{CLO} = \tau_{env}^{CLO} \tau_{can}^{CLO} a_{sol}^{CLO} G^* A_{ser} \quad [W] \quad (6.5)$$

Avec A_{ser} la surface au sol de la serre.

Différents auteurs [74,94,124,127,128] utilisent la loi de Beer-Lambert pour calculer le coefficient de transmission de la canopée pour le flux solaire :

$$\tau_{can}^{CLO} = e^{-K_{can}^{CLO} LAI} \quad [-] \quad (6.6)$$

Où K_{can}^{CLO} représente le coefficient d'extinction de la canopée pour le rayonnement CLO. Par définition, la somme des coefficients de transmission, de réflexion et d'absorption vaut un. Le coefficient d'absorption est alors calculé par l'équation (6.7).

$$a_i^{CLO} = 1 - \tau_i^{CLO} - r_i^{CLO} \quad [-] \quad (6.7)$$

6.2.4 L'échange conductif au sein du sol

Le sol est un élément important dans les modèles de serre car il constitue l'élément inertiel principal [10]. Le modèle doit donc prendre en compte le fait que la couche superficielle du sol (environ 1 cm) est quasiment à la même température que l'air et le fait que le sol transmet une partie de l'énergie thermique reçue vers les strates inférieures. Ces phénomènes sont la plupart du temps pris en compte en discrétisant le sol en couches d'épaisseur croissante [19,94,116,124,129]. En se basant sur le modèle de sol de Vanthoor [94], 7 couches sont considérées (cf. Figure 6.6) : la première est appelée « sol » tandis que les autres sont indicées « sol(i) ». En dessous de la sixième couche de sol, un volume semi-infini à température constante est supposé. Ce sol profond (« sol(pro) ») ne fait donc pas l'objet d'un bilan d'énergie.

Le bilan d'énergie sur la première couche de sol est présenté dans la partie 6.2.5 (cf. équation (6.12)). Les bilans d'énergie sur les autres couches de sol sont donnés par :

$$\rho_{sol} A_{sol} h_{sol(i)} c_{p,sol} \frac{dT_{sol(i)}}{dt} = \dot{Q}_{Sol(i-1)Sol(i)} - \dot{Q}_{Sol(i)Sol(i+1)} \quad i \in [2; 6] \quad [W] \quad (6.8)$$

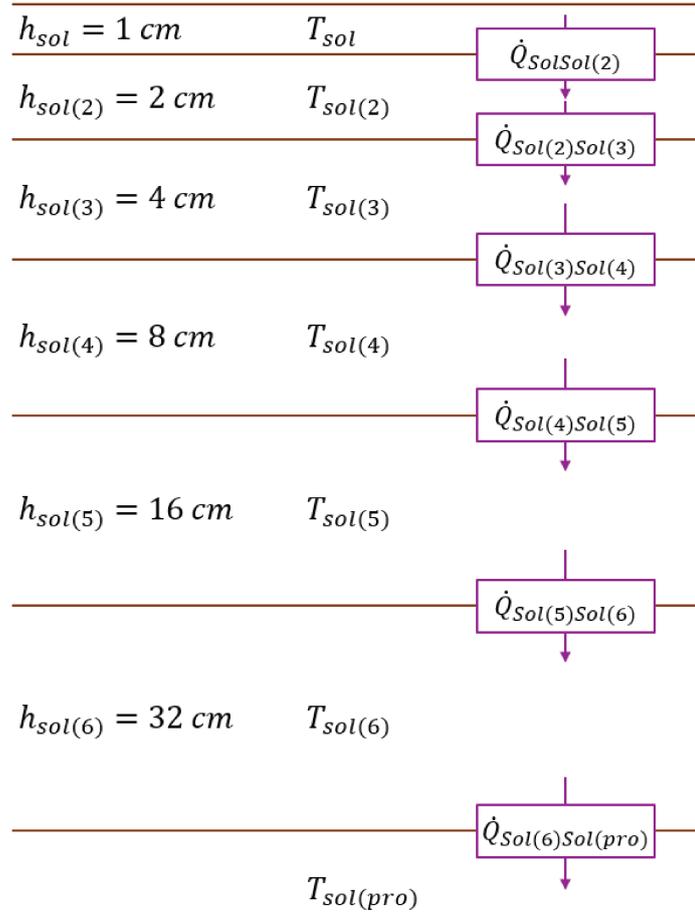


FIGURE 6.6 – Schéma du modèle de conduction du sol

Le flux de chaleur conductif entre deux couches de sol est calculé selon l'équation (6.9) tandis que le flux de chaleur entre la sixième couche et le sol profond est exprimé par l'équation (6.10) :

$$\dot{Q}_{Sol(i)Sol(i+1)} = \frac{2\lambda_{sol}}{h_{sol(i)} + h_{sol(i+1)}} A_{ser} (T_{sol(i)} - T_{sol(i+1)}) \quad i \in [1; 5] \quad [\text{W}] \quad (6.9)$$

$$\dot{Q}_{Sol(6)Sol(pro)} = \frac{2\lambda_{sol}}{h_{sol(6)}} A_{ser} (T_{sol(6)} - T_{sol(pro)}) \quad [\text{W}] \quad (6.10)$$

6.2.5 Bilans d'énergie

Les équations différentielles régissant l'évolution temporelle des températures des différents nœuds sont issues des bilans énergétiques. Les flux intervenants dans ces bilans sont comptés positivement ou négativement selon qu'ils sont entrants ou sortants par rapport à l'élément considéré. Nous avons choisi de conserver le sens des flux décrits sur la Figure 6.3.

Le bilan sur l'air intérieur de la serre est donné par l'équation (6.11) :

$$\rho_{air} V_{air} c_{p,air} \frac{dT_{air}}{dt} = \dot{Q}_{CanAir} + \dot{Q}_{SolAir} - \dot{Q}_{AirExt} - \dot{Q}_{AirEnv} \quad [W] \quad (6.11)$$

Avec ρ_{air} la masse volumique, V_{air} le volume, $c_{p,air}$ la capacité thermique massique et T_{air} la température de l'air. L'air échange de manière convective avec plusieurs éléments : avec la canopée \dot{Q}_{CanAir} , avec le sol \dot{Q}_{SolAir} et avec l'enveloppe \dot{Q}_{AirEnv} . L'échange advectif avec l'extérieur se faisant quand le toit est ouvert ou par des fuites au sein de l'enveloppe est représenté par \dot{Q}_{AirExt} .

Le bilan sur la couche supérieure du sol est représenté par l'équation (6.12) :

$$\rho_{sol} h_{sol} A_{sol} c_{p,sol} \frac{dT_{sol}}{dt} = \dot{Q}_{Sol}^{CLO} + \dot{Q}_{CanSol}^{GLO} - \dot{Q}_{SolAir} - \dot{Q}_{SolSol(2)} - \dot{Q}_{SolEnv}^{GLO} \quad [W] \quad (6.12)$$

Avec h_{sol} l'épaisseur de la première couche de sol (cf. partie 6.2.4), A_{sol} la surface du sol de la serre qui est ici égale à la surface de la serre (A_{ser}), \dot{Q}_{Sol}^{CLO} le rayonnement solaire reçu par le sol, \dot{Q}_{CanSol}^{GLO} le rayonnement infrarouge de la canopée vers le sol, \dot{Q}_{SolEnv}^{GLO} le rayonnement infrarouge du sol vers l'enveloppe et $\dot{Q}_{SolSol(2)}$ le flux conductif entre la première et la seconde couche de sol.

Le bilan sur l'enveloppe est exprimé par l'équation (6.13) :

$$\rho_{env} V_{env} c_{p,env} \frac{dT_{env}}{dt} = \dot{Q}_{Env}^{CLO} + \dot{Q}_{AirEnv} + \dot{Q}_{Env}^{Lat} + \dot{Q}_{SolEnv}^{GLO} + \dot{Q}_{CanEnv}^{GLO} - \dot{Q}_{EnvCiel}^{GLO} - \dot{Q}_{EnvExt} \quad [W] \quad (6.13)$$

Avec \dot{Q}_{Env}^{Lat} la chaleur latente associée au phénomène de condensation sur l'enveloppe, \dot{Q}_{CanEnv}^{GLO} le rayonnement infrarouge de la canopée vers l'enveloppe, $\dot{Q}_{EnvCiel}^{GLO}$ le rayonnement infrarouge de l'enveloppe vers le ciel et \dot{Q}_{EnvExt} l'échange convectif entre l'enveloppe et l'air extérieur.

Le bilan sur la canopée est décrit par l'équation (6.14) :

$$C_{can} A_{can} \frac{dT_{can}}{dt} = \dot{Q}_{Can}^{CLO} - \dot{Q}_{CanAir} - \dot{Q}_{CanEnv}^{GLO} - \dot{Q}_{CanSol}^{GLO} - \dot{Q}_{Can}^{Lat} \quad [W] \quad (6.14)$$

Avec $C_{can} = 1\,200 \text{ J K}^{-1} \text{ m}^{-2}$ [128] la capacité thermique surfacique de la canopée, A_{can} la surface de la canopée et \dot{Q}_{Can}^{Lat} l'énergie latente associée au phénomène d'évapotranspiration.

La surface de la canopée est exprimée suivant l'équation (6.15) :

$$A_{can} = LAI \cdot A_{sol} \quad [\text{m}^2] \quad (6.15)$$

La LAI (leaf area index) représente la surface de feuille par unité de surface de sol cultivé, exprimée en $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$. La surface de culture considérée ici est celle de la serre ($A_{sol} = A_{ser}$).

Il est possible de coupler un modèle de croissance végétale au modèle thermique de la serre afin d'obtenir l'évolution temporelle de la LAI. Cependant il est très compliqué d'utiliser un tel modèle dans le cas de la serre communautaire de Kuujuaq. En effet, les utilisateurs sont libres d'y faire pousser les espèces végétales qu'ils souhaitent et de récolter leur production quand ils le veulent. Le paramètre de LAI sera donc ici considéré comme invariant au cours des périodes de simulation.

6.2.6 Bilans de masse

Deux bilans de masse sont classiques pour simuler le climat d'une serre : l'un sur la masse de vapeur d'eau et l'autre sur la masse de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'air. L'évolution temporelle du taux de CO_2 est importante quand on prend en compte la croissance des plantes. Or, comme nous l'avons vu ci-dessus, ce paramètre n'est pas pris en compte dans ce modèle. Le bilan de masse se fait donc uniquement sur la vapeur d'eau à l'intérieur de la serre et est donné par l'équation (6.16) :

$$\frac{M_{H_2O} V_{air}}{RT_{air}} \frac{dP_{H_2O,air}}{dt} = E_{CanAir} - E_{AirEnv} - E_{AirExt} \quad [\text{kg s}^{-1}] \quad (6.16)$$

Avec M_{H_2O} la masse molaire de l'eau, R la constante universelle des gaz parfaits, $P_{H_2O,air}$ la pression partielle de vapeur d'eau dans la serre, E_{CanAir} le flux massique de vapeur d'eau associé au phénomène d'évapotranspiration des plantes, E_{AirEnv} celui associé à la condensation de la vapeur d'eau sur les parois intérieures de l'enveloppe et E_{AirExt} celui associé à l'échange advectif d'air avec l'extérieur. On peut supposer que cette équation vient de l'application de la loi des gaz parfaits à la vapeur d'eau. La masse de vapeur d'eau dans l'air est exprimée par l'équation (6.17) :

$$m_{H_2O,air} = \frac{M_{H_2O} P_{H_2O,air} V_{air}}{RT_{air}} \quad [\text{kg}] \quad (6.17)$$

La dérivée temporelle de cette masse est décrite par l'équation (6.18) :

$$\frac{dm_{H_2O,air}}{dt} = \frac{M_{H_2O} V_{air}}{RT_{air}} \left(\frac{dP_{H_2O,air}}{dt} - \frac{P_{H_2O,air}}{T_{air}} \frac{dT_{air}}{dt} \right) \quad [\text{kg s}^{-1}] \quad (6.18)$$

Si on considère un pas de temps sur lequel la variation de température est négligeable par rapport à la variation de la pression partielle de vapeur d'eau, cela donne l'équation (6.16).

6.3 Explicitation des flux

Les expressions des différents flux thermiques et massiques apparaissant dans les bilans présentés précédemment sont décrits dans cette partie. Les valeurs des coefficients d'échange convectifs sont également données.

6.3.1 Les échanges convectifs

L'échange convectif entre la canopée et l'air est modélisé par :

$$\dot{Q}_{CanAir} = H_{CanAir} A_{can} (T_{can} - T_{air}) \quad [\text{W}] \quad (6.19)$$

Où :

$$H_{CanAir} = 2H_{FeuAir} \quad [\text{W K}^{-1} \text{ m}^{-2}] \quad (6.20)$$

Avec $H_{FeuAir} = 5 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-2}$ le coefficient d'échange convectif moyen entre une feuille et l'air [124]. Celui-ci est multiplié par deux pour prendre en compte le fait qu'une feuille comporte deux faces [124].

L'échange convectif entre le sol et l'air est donné par :

$$\dot{Q}_{SolAir} = H_{SolAir} A_{sol} (T_{sol} - T_{air}) \quad [\text{W}] \quad (6.21)$$

Avec :

$$H_{SolAir} = \begin{cases} 1,7(T_{sol} - T_{air})^{0,33} & \text{si } T_{Sol} > T_{Air} \\ 1,3(T_{air} - T_{sol})^{0,25} & \text{si } T_{Sol} \leq T_{Air} \end{cases} \quad [\text{W K}^{-1} \text{ m}^{-2}] \quad (6.22)$$

L'échange convectif entre l'air intérieur et l'enveloppe est décrit par :

$$\dot{Q}_{AirEnv} = H_{AirEnv} A_{env} (T_{air} - T_{env}) \quad [\text{W}] \quad (6.23)$$

Où :

$$H_{EnvAir} = 2,21 |T_{air} - T_{env}|^{0,33} \quad [\text{W}] \quad (6.24)$$

L'échange convectif entre l'enveloppe et l'air extérieur est exprimé par :

$$\dot{Q}_{EnvExt} = H_{EnvExt} A_{env} (T_{env} - T_{ext}) \quad [W] \quad (6.25)$$

Avec :

$$H_{EnvExt} = 0,95 + 6,76 \cdot v_{vent}^{0,49} \quad [W K^{-1} m^{-2}] \quad (6.26)$$

Où v_{vent} représente la vitesse du vent à l'extérieur de la serre.

6.3.2 Les échanges radiatifs infrarouges (GLO)

Tout corps ayant une température supérieure à 0 K émet de l'énergie sous forme de rayonnement thermique. Ce rayonnement est qualifié de grande longueur d'onde (GLO) car aux alentours de 20 °C, la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission est d'environ 10 μ m (loi de Wien) soit le domaine de l'infrarouge. L'enveloppe de la serre de Kuujuaq est faite en polycarbonate qui est opaque aux rayonnement GLO ($\tau_{env}^{GLO} = 0$ [11]). Les échanges entre le sol ou les plantes et le ciel ne sont donc pas pris en compte dans ce modèle. Les expressions données ici supposent que l'on considère les nœuds comme des corps gris et diffus auxquels on applique la loi du rayonnement de Kirchhoff : les coefficients d'absorption pour le rayonnement GLO et l'émissivité de chaque élément sont égaux [130]. Le détail de ces expressions peut être trouvé dans la thèse de De Zwart (1996) [124].

L'échange entre la canopée et l'enveloppe est donné par :

$$\dot{Q}_{CanEnv}^{GLO} = A_{can}^{GLO} \varepsilon_{can} \varepsilon_{env} F_{CanEnv} \sigma (T_{can}^4 - T_{env}^4) \quad [W] \quad (6.27)$$

Avec $A_{can}^{GLO} = A_{ser} (1 - e^{-K_{can}^{GLO} LAI})$ la surface effective d'émission de la canopée [124], ε_{can} l'émissivité de la canopée, ε_{env} l'émissivité de l'enveloppe, et $F_{CanEnv} = 1$.

De même, on a l'échange entre la canopée et le sol :

$$\dot{Q}_{CanSol}^{GLO} = A_{can}^{GLO} \varepsilon_{can} \varepsilon_{sol} F_{CanSol} \sigma (T_{can}^4 - T_{sol}^4) \quad [W] \quad (6.28)$$

Avec $F_{CanSol} = 1$.

$$\dot{Q}_{SolEnv}^{GLO} = A_{ser} \varepsilon_{sol} \varepsilon_{env} F_{SolEnv} \sigma (T_{sol}^4 - T_{env}^4) \quad [W] \quad (6.29)$$

Avec $F_{SolEnv} = \tau_{can}^{GLO} = e^{-K_{can}^{GLO} LAI}$.

$$\dot{Q}_{EnvCiel}^{GLO} = A_{env} \varepsilon_{env} \varepsilon_{ciel} F_{EnvCiel} \sigma (T_{env}^4 - T_{ciel}^4) \quad [W] \quad (6.30)$$

Avec $F_{EnvCiel} = \frac{A_{ser}}{A_{env}}$ [124]. La température du ciel est calculée selon l'équation (6.31) qui se base sur l'émissivité apparente du ciel, ε_{ciel} .

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel}^{0,25} T_{ext} \quad [K] \quad (6.31)$$

Cette émissivité est difficile à calculer dans la mesure où elle dépend de l'emplacement du lieu considéré, des conditions climatiques extérieures (température et pression partielle de vapeur d'eau) ainsi que de la couverture nuageuse qui est compliquée à estimer. Beaucoup de corrélations sont proposées dans la littérature [131]. L'expression de ε_{ciel} choisie est celle proposée par Niemelä et al. [132] (cf. équation (6.32)) qui est valide pour un ciel dégagé et a été testée sur des mesures faites en Finlande, un pays dont le sud est à la même latitude que Kuujuaq (58°N).

$$\varepsilon_{ciel} = \begin{cases} 0,72 + 9 \times 10^{-5}(P_{H_2O,Ext} - 200) & \text{si } P_{H_2O,Ext} \geq 200 \text{ Pa} \\ 0,72 - 7,6 \times 10^{-4}(P_{H_2O,Ext} - 200) & \text{si } P_{H_2O,Ext} < 200 \text{ Pa} \end{cases} \quad [-] \quad (6.32)$$

La pression partielle de vapeur d'eau extérieure $P_{H_2O,Ext}$ est calculée à partir de l'humidité relative extérieure (φ_{ext}) et de la pression de vapeur saturante calculée à la température extérieure ($P^*(T_{ext})$) selon l'équation (6.33) :

$$P_{H_2O,Ext} = \frac{\varphi_{ext}}{100} P^*(T_{ext}) \quad [Pa] \quad (6.33)$$

La pression de vapeur saturante est calculée à partir d'un algorithme valide entre -83 et 373 °C [133] utilisant les équations de la zone liquide et solide du diagramme de phase de l'eau présentées par Saul et Wagner (1987) [134].

6.3.3 La ventilation et l'advection

L'échange advectif de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur de la serre est calculé par :

$$\dot{Q}_{AirExt} = \rho_{air} c_{p,air} f_{venti} (T_{air} - T_{ext}) \quad [W] \quad (6.34)$$

Où f_{venti} est le débit d'air volumique total entre l'intérieur et l'extérieur. Ce dernier est composé de deux termes (cf. équation (6.35)) : le premier lié à de petites infiltrations d'air à travers l'enveloppe ($f_{ventiFui}$, cf. équation (6.36)) et le second lié à l'ouverture du toit quand la température intérieure dépasse 21 °C ($f_{ventiToit}$, cf. équation (6.37)).

$$f_{venti} = f_{ventiFui} + f_{ventiToit} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (6.35)$$

Le débit de fuite est donné par [94] :

$$f_{VentiFui} = \begin{cases} 0,25 \times c_{fui} A_{ser} & \text{si } v_{vent} < 0,25 \text{ m s}^{-1} \\ v_{vent} c_{fui} A_{ser} & \text{si } v_{vent} \geq 0,25 \text{ m s}^{-1} \end{cases} \quad [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}] \quad (6.36)$$

Avec c_{fui} un coefficient dépendant de la forme de la serre et v_{vent} la vitesse du vent à l'extérieur de la serre.

L'équation utilisée pour obtenir le flux de ventilation entre l'intérieur et l'extérieur quand le toit est ouvert est donné par [112, 135] :

$$f_{VentiToit} = \frac{U_{toit} A_{toit} C_d}{2} \sqrt{\frac{g h_{toit}}{2} \frac{|T_{air} - T_{ext}|}{\bar{T}_{AirExt}} + C_w v_{vent}^2} \quad [\text{m}^3 \text{ s}^{-1}] \quad (6.37)$$

Avec U_{toit} l'état d'ouverture du toit (1 s'il est ouvert, 0 sinon), h_{toit} la hauteur d'ouverture du toit, L_{ser} la longueur de la serre, $A_{toit} = h_{toit} L_{ser}$ la surface d'ouverture du toit, C_d le coefficient de décharge de la serre, \bar{T}_{AirExt} la température moyenne entre l'intérieur et l'extérieur de la serre, C_w le coefficient vent (« wind coefficient ») de la serre et v_{vent} la vitesse du vent à l'extérieur de la serre.

6.3.4 Les échanges de vapeur d'eau et de chaleur latente

La condensation de la vapeur d'eau sur l'enveloppe est modélisée par :

$$E_{AirEnv} = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{H_2O,air} < P^*(T_{env}) \\ \frac{H_{AirEnv} A_{env}}{\gamma \cdot \Delta H} (P_{H_2O,air} - P^*(T_{env})) & \text{si } P_{H_2O,air} \geq P^*(T_{env}) \end{cases} \quad [\text{kg s}^{-1}] \quad (6.38)$$

Avec E_{AirEnv} le flux de vapeur d'eau se condensant sur l'enveloppe, H_{AirEnv} le coefficient d'échange convectif entre l'air et l'enveloppe, γ la constante psychrométrique, ΔH la chaleur latente de vaporisation de l'eau, $P_{H_2O,air}$ la pression partielle de vapeur d'eau de l'air intérieur de la serre (calculée selon l'équation (6.33)) et $P^*(T_{env})$ la pression de vapeur saturante à la température de l'enveloppe T_{env} .

Le flux de chaleur latente apporté à l'enveloppe lors de la condensation de la vapeur d'eau est donné par :

$$\dot{Q}_{Env}^{Lat} = \Delta H E_{AirEnv} \quad [\text{W}] \quad (6.39)$$

L'échange de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur est calculé par :

$$E_{AirExt} = \frac{M_{H_2O}}{R} f_{venti} \left(\frac{P_{H_2O,air}}{T_{air}} - \frac{P_{H_2O,ext}}{T_{ext}} \right) \quad [\text{kg s}^{-1}] \quad (6.40)$$

Avec M_{H_2O} la masse molaire de l'eau et R la constante des gaz parfaits.

Comme beaucoup d'êtres vivants, les plantes transpirent, notamment pour se prémunir contre une température trop élevée. Elles peuvent ainsi relâcher de l'eau au travers de petits pores circulaires appelés stomates et l'évaporation de cette eau rafraîchit les plantes [128]. L'ensemble de ce processus est désigné par le terme évapotranspiration et le flux massique de vapeur d'eau entre la canopée et l'air de la serre peut être modélisé à l'aide de la « méthode directe » (cf. équation (6.41) [136]). Par analogie électrique, cette approche exprime le flux massique comme étant inversement proportionnel à la résistance au transfert hydrique [8] qui est composée de deux termes : la résistance aérodynamique (r_a) liée à la couche limite de l'air sur la feuille et la résistance stomatique (r_s) modélisant l'ouverture des stomates en fonction des conditions climatiques extérieures à la plante.

$$E_{CanAir} = \frac{2\rho_{air}c_{p,air}A_{can}}{\Delta H\gamma(r_a + r_s)} (P^*(T_{can}) - P_{H_2O,air}) \quad [\text{kg s}^{-1}] \quad (6.41)$$

En se basant sur les travaux de Stanghellini (1987) [128], Vanthoor utilise une résistance aérodynamique moyenne constante : $r_a = 275 \text{ s m}^{-1}$. Il utilise également une expression simplifiée du modèle de résistance stomatique :

$$r_s = r_{s,min} \cdot fr_1(\dot{Q}_{Can}^{CLO}) \cdot fr_2([CO_2]) \cdot fr_3(P^*(T_{can}) - P_{H_2O,air}) \quad [\text{s m}^{-1}] \quad (6.42)$$

Où $r_{s,min} = 82 \text{ s m}^{-1}$ est la résistance stomatique minimale et $fr_1(\dot{Q}_{Can}^{CLO})$, $fr_2([CO_2])$ et $fr_3(P^*(T_{can}) - P_{H_2O,air})$ représente des facteurs de résistance liés respectivement au rayonnement solaire, à la concentration de CO_2 et à la pression partielle de vapeur d'eau dans la serre. Ces facteurs ont été déterminés expérimentalement par Stanghellini (1987) [128] :

$$fr_1(\dot{Q}_{Can}^{CLO}) = \frac{\dot{Q}_{Can}^{CLO} + 4,3}{\dot{Q}_{Can}^{CLO} + 0,54} \quad [-] \quad (6.43)$$

Avec \dot{Q}_{Can}^{CLO} le rayonnement solaire au-dessus de la canopée. En journée, ce rayonnement peut atteindre des valeurs comprises entre 500 W m^{-2} et 1000 W m^{-2} et ce facteur est donc très proche de 1. On a également :

$$fr_2([CO_2]) = 1 + B_{evap1} \cdot ([CO_2] - 200)^2 \quad [-] \quad (6.44)$$

Avec $[CO_2]$ la concentration de l'air intérieur en CO_2 exprimée en ppm et B_{evap1} une constante dépendant de si c'est le jour ou la nuit : $B_{evap1}^{jour} = 6,1 \times 10^{-7} \text{ ppm}^{-2}$ et $B_{evap1}^{nuit} = 1,1 \times 10^{-11} \text{ ppm}^{-2}$. La concentration en CO_2 n'étant pas mesurée à Kuujuaq, la valeur constante de 400 ppm correspondant à la concentration extérieure moyenne sur Terre [137] a été considérée.

De même, on a :

$$fr_3(P^*(T_{Can}) - P_{H_2O,air}) = 1 + B_{evap2} \cdot (P^*(T_{Can}) - P_{H_2O,air})^2 \quad [-] \quad (6.45)$$

Où $B_{evap2}^{jour} = 4,3 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-2}$ et $B_{evap2}^{nuit} = 5,2 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-2}$

La chaleur latente prélevée à la canopée pour l'évaporation de l'eau est finalement calculée selon l'équation (6.46) :

$$\dot{Q}_{Can}^{Lat} = \Delta H E_{CanAir} \quad [W] \quad (6.46)$$

6.4 Développement numérique

La mise en œuvre numérique du modèle explicité ci-dessus a été faite en utilisant l'outil « Modelica ». Il s'agit d'un langage de modélisation multi-physique, non-propriétaire, orienté-objet et spécialement conçu pour la modélisation de phénomènes physiques [138]. Initialement, Modelica a été développé pour les systèmes électriques. Les systèmes modélisés sont décrits à l'aide d'un formalisme qui permet de décrire des systèmes complexes de façon relativement claire. Le principe général de description repose sur les concepts de flux et de potentiel issus de l'électricité, mais généralisables sans difficulté au domaine de l'énergétique.

Chaque objet (i.e. un sous-système) est décrit par des équations décrivant sa dynamique – son évolution – lorsqu'il est soumis à un ensemble de sollicitations extérieures reçues par l'intermédiaire d'un ou plusieurs « ports » représentatif de la grandeur « échangée ». Chaque port peut être de type « flux » ou « potentiel » : un port de type flux doit être connecté à un ou plusieurs autres ports flux, et même chose pour les ports potentiels. Au cours de la résolution, les conditions imposées par les interactions entre les sous-modèles (i.e. les objets) reliés par leur port, diffèrent selon son type : pour un port potentiel, la grandeur associée doit prendre la même valeur pour les objets (exemple de la loi des mailles en électricité ou de l'égalité des températures à une interface). Pour un port flux, la somme algébrique des grandeurs associées aux ports doit être nulle (exemple de la loi des nœuds en électricité ou de la continuité du flux thermique à une interface).

La modélisation de la serre de Kuujuaq a été effectuée en se basant sur la bibliothèque logicielle « Greenhouses » développée par Altes-Buch (2019) [139]. Cette dernière a été conçue afin de modéliser le climat d’une serre en se basant sur les travaux de Vanthoor (2011) [94] (cf. partie 6.2). Elle est composée de modules représentant les différents nœuds et flux thermiques et massiques présentés ci-dessus. Il est alors possible d’instancier ces différents éléments et de les interconnecter en choisissant les valeurs des paramètres utilisés. Modelica offre également la possibilité d’avoir une représentation graphique de ces éléments et de leurs connexions (cf. Figure 6.7).

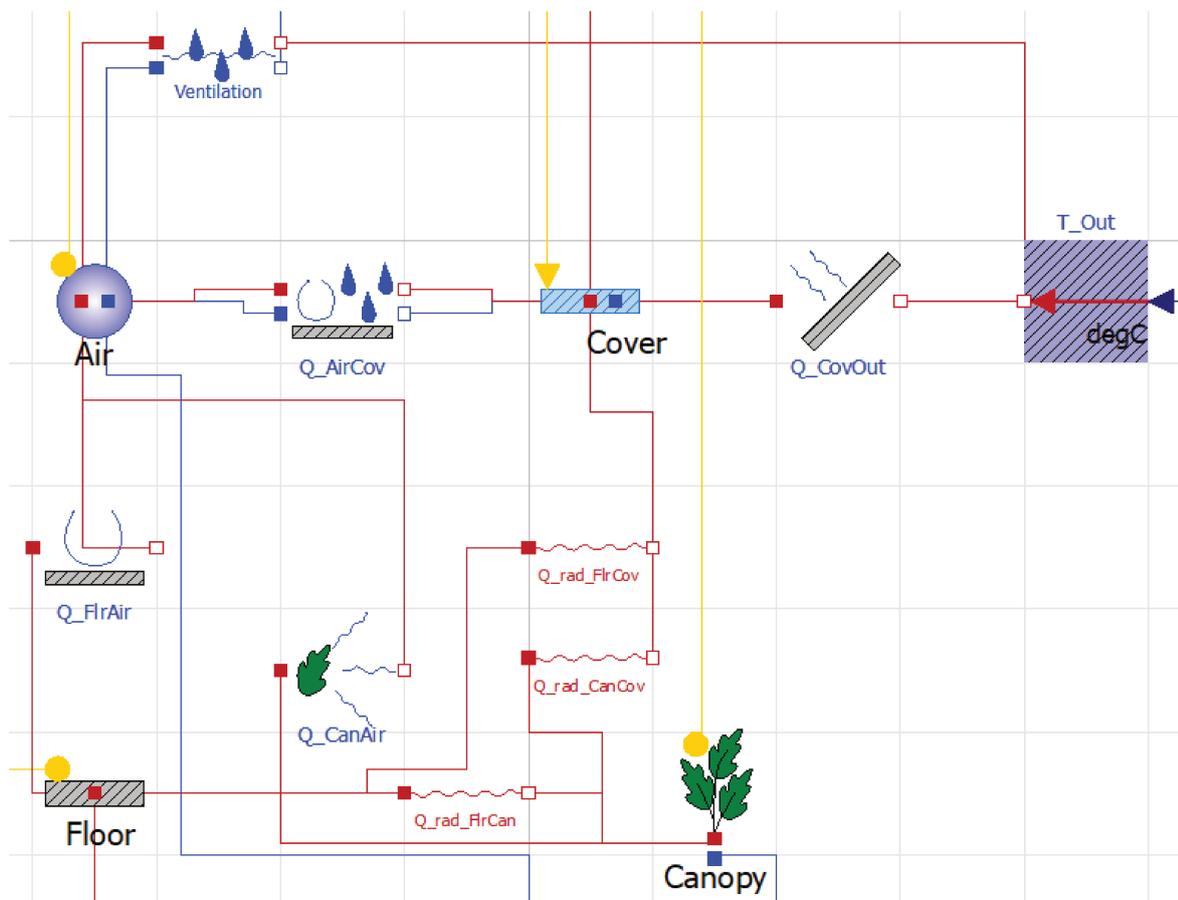


FIGURE 6.7 – Une partie de la représentation graphique du modèle de serre

Plusieurs modifications et ajouts ont été faits sur la bibliothèque initiale. En effet, plusieurs modules semblaient ne pas ou mal fonctionner. Notre hypothèse est que cela est dû au fait que cette bibliothèque a été créée pour fonctionner avec l’environnement Dymola qui est un outil de simulation payant, basé sur Modelica, et développé par Dassault Système, alors que l’environnement utilisé ici est OpenModelica qui est open source et gratuit [140]. Une différence dans les versions de Modelica utilisées est également une cause possible. Ce premier problème a été résolu en modifiant le code dans les modules concernés. Ensuite, le module gérant le rayonnement solaire a été entièrement réécrit afin de prendre en compte les modifications apportées au modèle de Vanthoor (cf. partie 6.2.3).

En outre, un module calculant l'état d'ouverture du toit ($U_{toit} = 1$ si il est ouvert, 0 sinon) a été développé. Initialement, ce module fonctionnait de manière discrète afin de représenter le comportement hystérétique du toit (cf. Figure 4.15 et Figure 6.8). Concrètement, le module prenait en compte la température de l'air à l'instant t et l'état du toit à l'instant $t - \Delta t$ (où Δt représente le pas de temps de simulation) afin de déterminer l'état du toit à l'instant t selon l'équation (6.47) :

$$U_{toit}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{air}(t) < 21 \\ 0 & \text{si } 21 \leq T_{air}(t) < 24 \text{ et } U_{toit}(t - \Delta t) = 0 \\ 1 & \text{si } 21 \leq T_{air}(t) < 24 \text{ et } U_{toit}(t - \Delta t) = 1 \\ 1 & \text{si } T_{air}(t) \geq 24 \end{cases} \quad [-] \quad (6.47)$$

Cependant, l'implémentation de ce module a considérablement augmenté le temps de simulation. Nous avons alors choisi de modéliser l'ouverture du toit de manière continu selon l'équation (6.48) :

$$U_{toit} = \frac{1}{1 + \exp(-5(T_{air} - \bar{T}_{OuvFer}))} \quad [-] \quad (6.48)$$

Avec \bar{T}_{OuvFer} la moyenne des températures seuils d'ouverture et de fermeture. Le comportement hystérétique réel et le comportement numérique de U_{toit} sont comparés sur la Figure 6.8.

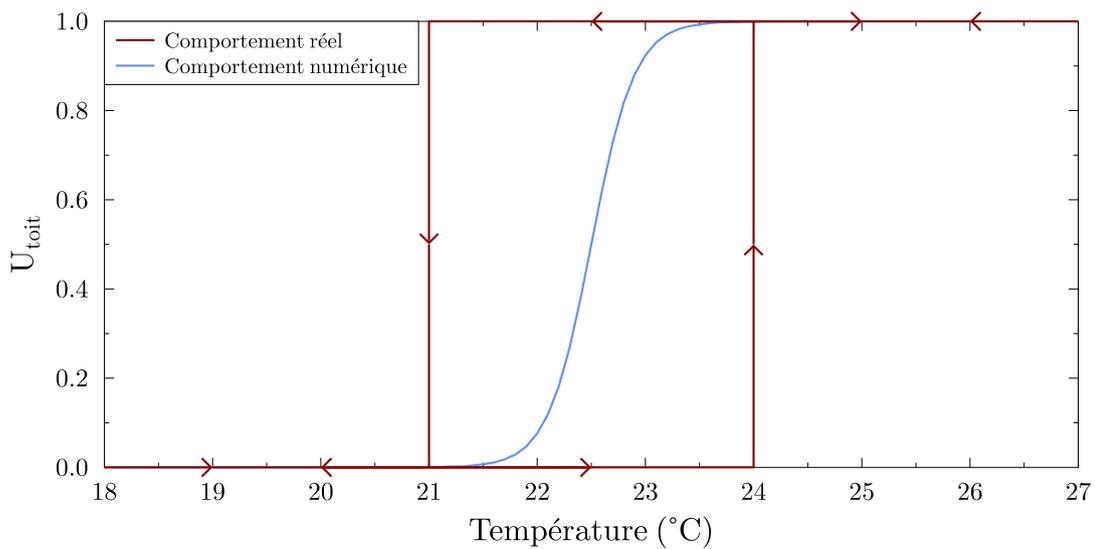


FIGURE 6.8 – Comparaison des comportements réel et numérique de l'ouverture du toit

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter et de justifier les hypothèses et équations du modèle du comportement thermique de la serre. Afin de tester ce dernier, 9 jours de la saison de culture 2017 ont été choisis. Cette période allant du 23 août à 00h00 au 1er septembre à 00h00 a été choisie car elle comporte des journées ensoleillées et nuageuses comme le montre la Figure 6.9 (a). Les valeurs des paramètres utilisés pour cette simulation sont issues d'une revue de littérature et sont présentées dans le chapitre suivant (cf. Tableau 7.1 et les valeurs nominales du Tableau 7.2).

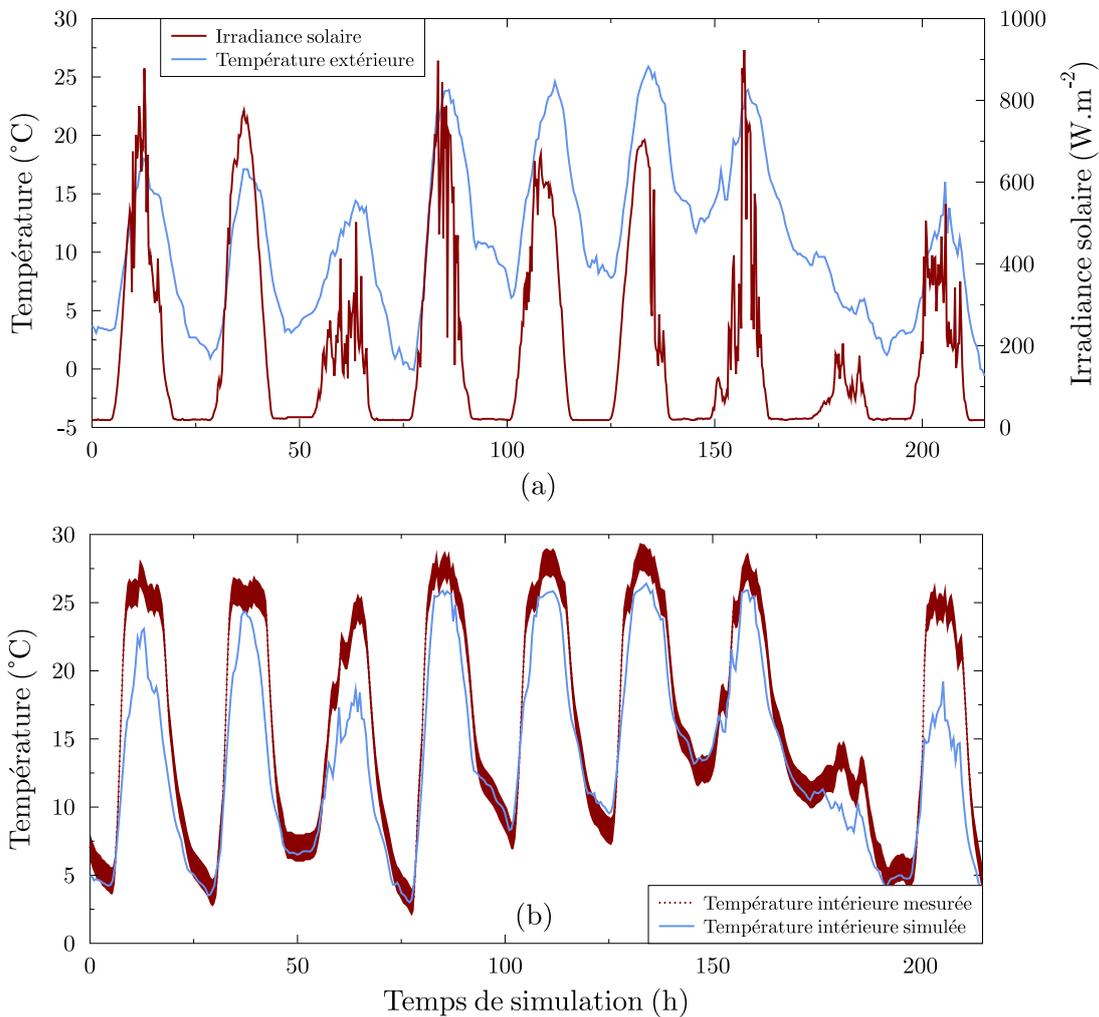


FIGURE 6.9 – Résultats de la simulation de la température intérieure de la serre avant le processus de calibration

Les conditions météorologiques extérieures (irradiance solaire et température) sont présentées sur la Figure 6.9 (a) tandis que la température intérieure de la serre issue de la simulation est représentée sur la Figure 6.9 (b) avec la température intérieure mesurée. Les données mesurées sont représentées sous la forme d'une bande corres-

pondant à l'incertitude de mesure des capteurs (cf. Tableau 3.1 et Tableau 5.1). Cette représentation sera également utilisée sur les graphiques suivants représentant des données mesurées. Cette période de simulation se situe avant l'installation des nouveaux capteurs (cf. partie 5.1) et les informations comme la vitesse du vent ou les périodes d'ouverture/fermeture du toit ne sont donc pas disponibles.

On peut remarquer que la dynamique générale du modèle est bonne puisque les températures intérieures mesurée et simulée sont en phase. Cependant, on peut noter un problème d'amplitude thermique dans la simulation : la température simulée est systématiquement moins élevée que la température mesurée durant la journée. Cela est particulièrement visible sur les journées de simulation où l'ensoleillement est faible (journées 3, 8 et 9) où l'écart entre les températures mesurée et simulée peut atteindre 6 °C. Ces différences sont probablement dues à l'utilisation de valeurs de paramètres issues de la littérature qui ne sont pas forcément représentatif des valeurs réelles des paramètres de la serre étudiée. Afin d'améliorer les résultats de ce modèle, il est donc nécessaire d'une part de calculer l'erreur commise afin de quantifier les performances du modèle et d'autre part d'effectuer un processus de calibration sur les valeurs des paramètres utilisés.

Chapitre 7

Calibration du modèle de serre

Sommaire

7.1	Les indicateurs statistiques	127
7.2	Méthode de calibration	130
7.3	Mise en œuvre et résultats	135

Les résultats préliminaires présentés à la fin du chapitre précédent montrent qu'il peut y avoir des différences significatives entre la température intérieure issue du modèle et celle mesurée. En écartant les erreurs dans l'écriture du code, la différence entre les valeurs simulées et mesurées peut être issue de trois sources d'erreurs [141] :

- Les incertitudes liées aux hypothèses du modèle (équations du modèle, phénomènes physiques pris en compte)
- Un algorithme manquant de précision et de robustesse (erreurs dues à la discrétisation par exemple)
- Les incertitudes liées aux paramètres d'entrée (données mesurées et paramètres du modèle)

Les hypothèses du modèle et les phénomènes physiques pris en compte ont été justifiés dans le chapitre précédent en se basant sur une revue de littérature et notamment sur le modèle de Vanthoor (2011) [94] qui a été validé pour plusieurs types de serres situées à différentes latitudes. Nous pouvons alors supposer que la source principale d'erreurs ne réside pas dans les équations du modèle.

Les algorithmes de résolution d'équations différentielles implémentés dans Modelica sont connus et utilisés régulièrement depuis les années 2000, date de sa première version. Nous pouvons donc considérer ces algorithmes comme fiables. Par ailleurs, les résultats préliminaires présentés à la fin du chapitre précédent nous conforte dans l'idée que la discrétisation temporelle n'est pas un problème dans la mesure où l'on a pas de résultats inattendus (comme une divergence des données simulées par exemple).

La dernière source d'erreurs, liée aux paramètres d'entrée du modèle, nous semble être la plus significative dans notre cas. En effet, plusieurs paramètres ont été estimés à partir de la littérature puisque leur valeur est très difficilement accessible (par exemple le coefficient de décharge C_d et le coefficient de vent C_w dans l'équation (6.37)). Or, pour un paramètre donné, il peut exister une différence significative entre les valeurs minimale et maximale disponibles dans la littérature dans la mesure où la valeur d'un paramètre peut dépendre de la forme ou du matériau de l'enveloppe, de la quantité et de la répartition des plantes à l'intérieur de la serre, etc.

Nous avons donc décidé de nous concentrer sur les valeurs des paramètres d'entrée en effectuant un processus de calibration des paramètres utilisés. Pour cela, il est d'abord nécessaire de quantifier l'erreur entre les données simulées et mesurées en utilisant un indicateur statistique parmi les différents indicateurs existants.

7.1 Les indicateurs statistiques

Afin d'évaluer la performance d'un modèle, différents indicateurs peuvent être utilisés :

- Le ME (mean error ou erreur moyenne) [19]
- Le MBE (mean bias error) [142, 143]
- Le MPE (mean percentage error) [144]
- Le RMSE (root mean square error ou racine de l'erreur quadratique moyenne) [19, 142, 143]
- Le CVRMSE (coefficient of variation of root mean square error) [142, 143] aussi appelé RRMSE (relative root mean square error) [94]
- Le RNRMSE (range normalized root mean square error) [143]
- Le r^2 (coefficient de détermination) [143]

Le ME

L'erreur moyenne est définie comme la moyenne des différences entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées :

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - s_i) \quad (7.1)$$

où m_i est la valeur mesurée, s_i la valeur simulée et N le nombre de mesures. Cet indicateur permet de se rendre compte de l'écart moyen entre le modèle et les mesures. Il s'exprime dans l'unité de la donnée mesurée. S'il est positif, cela indique que le modèle sous-estime les données simulées tandis qu'un ME négatif indique une surestimation. Cependant, cet indicateur est sujet à l'effet d'annulation : une surestimation du modèle peut compenser une sous-estimation et ainsi améliorer le ME (le rapprocher de 0).

Le MBE

Le MBE que l'on pourrait appeler erreur moyenne relative ou erreur moyenne en pourcentage est relativement proche du ME :

$$MBE = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{ME}{\bar{m}} \quad (7.2)$$

avec \bar{m} la moyenne des données mesurées. Cet indicateur s'exprime en pourcentage et est également soumis à l'effet d'annulation. Il est décrit comme un bon indicateur de la déviation générale d'un modèle et est souvent utilisé dans les simulations de la consommation d'énergie de bâtiments [142]. Cependant, dans le cas où on simule des valeurs pouvant être négatives ou nulles (comme des températures), le MBE ne semble pas adapté. En effet, si la moyenne des températures mesurées est proche ou égale à 0, cet indicateur diverge.

Le MPE

Le MPE qui représente la moyenne de l'erreur relative diffère légèrement du MBE :

$$MBE = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{m_i - s_i}{m_i} \quad (7.3)$$

Le MPE est sujet à l'effet d'annulation et s'exprime en pourcentage. Le risque de divergence de cet indicateur est important dans la mesure où il suffit d'une valeur mesurée proche de ou égale à 0 pour le faire diverger.

Le RMSE

La racine de l'erreur quadratique moyenne (parfois abrégé en « erreur quadratique ») est définie comme la racine carrée de la moyenne du carré des différences entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2} \quad (7.4)$$

Le RMSE représente l'écart type de la différence entre les valeurs modélisées et mesurées [143]. L'élévation de l'erreur au carré permet de s'affranchir de l'effet d'annulation et de s'exprimer dans l'unité de la valeur considérée. Il est toujours positif ou nul. Plus la valeur du RMSE est proche de 0, plus la différence entre les valeurs mesurées et simulées est faible.

Le CVRMSE

Le coefficient de variation de l'erreur quadratique ou erreur quadratique relative est le RMSE divisé par la moyenne des mesures :

$$CVRMSE = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2}}{\bar{m}} = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{m}} \quad (7.5)$$

Le CVRMSE s'exprime en pourcentage mais a le même défaut que le MBE : celui de diverger pour une moyenne des valeurs mesurées proche de 0.

Le RNRMSE

Le RNRMSE est défini comme la division du RMSE par l'intervalle des mesures [143] :

$$RNRMSE = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2}}{\max(m) - \min(m)} = 100 \times \frac{RMSE}{range(m)} \quad (7.6)$$

où $\max(m)$ et $\min(m)$ sont respectivement les valeurs mesurées maximales et minimales. Cette nouvelle définition proposée par Chakraborty et Elzarka [143] permet de s'affranchir des défauts du CVRMSE cités ci-dessus.

Le coefficient de détermination

Le coefficient de détermination est défini par :

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2} = 1 - \frac{RMSE^2}{\mathbb{V}(m)} \quad (7.7)$$

avec $\mathbb{V}(m)$ la variance des valeurs mesurées. Plus r^2 est proche de 1, plus les résultats simulés s'approchent des données mesurées.

Indicateur retenu

Le choix de l'indicateur statistique utilisé pour quantifier l'erreur commise par le modèle s'est porté sur le RMSE. Ce dernier a l'avantage de ne pas être soumis à l'effet d'annulation, de ne pas diverger quand la moyenne des valeurs mesurées s'approche de zéro et de s'exprimer dans l'unité des données considérées. Par ailleurs, minimiser le RMSE lors d'un processus de calibration revient à minimiser le CVRMSE et le RNRMSE et à maximiser le coefficient de détermination r^2 .

7.2 Méthode de calibration

Les différentes méthodes utilisées pour la calibration de modèles ont été divisées en quatre classes par Reddy (2006) [141] dans son état de l'art sur la calibration des modèles de simulation de consommation énergétique, basé sur le travail de Clarke et al. (1993) [145]. Ces catégories sont :

- Calibration basée sur une approche manuelle, itérative et pragmatique
- Calibration basée sur une série de graphiques comparatifs et informatifs
- Calibration basée sur des procédures analytiques et des tests spécifiques
- Méthodes de calibration analytiques/mathématiques

Coakley et al. (2014) [142] préfèrent diviser ces méthodes en deux catégories, sans lien avec celles ci-dessus : les calibrations manuelles et celles automatiques. Parmi ces techniques de calibration, beaucoup sont spécifiques à la modélisation de la consommation énergétique de bâtiments et ne sont pas pertinentes dans notre cas : audit de bâtiment, utilisation de données horaires au lieu de données journalières, tests intrusifs nécessitant des modifications *in situ*. D'autres peuvent cependant être appliquées ici comme l'analyse de sensibilité ou la méthodologie factuelle (« evidence-based methodology » [146]). L'analyse de sensibilité n'est pas une méthode de calibration en soi mais permet d'identifier les paramètres ayant le plus d'impact sur la modélisation [142]. La méthodologie factuelle est une approche consistant à classer les paramètres en fonction de leur fiabilité puis à effectuer une succession de minimisations monodimensionnelles de l'erreur commise en faisant varier les paramètres dans l'ordre de fiabilité établi. Cette méthodologie développée par Raftery et al. (2011) [146] propose l'ordre de fiabilité décroissant suivant :

1. Mesure enregistrée
2. Mesure ponctuelle
3. Observation directe (visite du site)
4. Entrevue du personnel d'opération
5. Documents d'opération et de maintenance
6. Documents de mise en service (ex : plans tels que construits)
7. Études de références et guides des meilleures pratiques
8. Standards et lignes directrices
9. Informations de la phase de conception

Cette méthode a notamment été utilisée par Léveillé-Guillemette et Monfet (2018) [147] dans le cadre de la calibration d'un modèle de la consommation énergétique

d'une serre. La première étape est donc de classer les paramètres à calibrer p_i par ordre décroissant de confiance : p_1 sera donc a priori plus « fiable » que p_2 et ainsi de suite. La seconde étape correspond à l'enchaînement des minimisations successives : on affecte chaque paramètre à une valeur nominale p_i^0 et on fait varier le premier paramètre. La valeur calibrée p_1^* correspond alors à celle minimisant l'erreur commise (le RMSE dans notre cas). Le même traitement est ensuite effectué sur p_2 en considérant les autres valeurs à p_i^0 excepté pour p_1 qui prend sa valeur optimale p_1^* déterminée précédemment. Le RMSE calculé pour p_2^* est donc plus petit ou égal que celui calculé pour p_1^* . À l'étape k , on identifie la valeur optimale p_k^* de p_k avec les autres paramètres prenant soit leur valeur optimale ($p_i = p_i^*$ pour $i < k$) soit leur valeur nominale ($p_i = p_i^0$ pour $i > k$). À la fin du processus, on considère que la solution optimale minimisant le RMSE est atteinte et caractérisée par les paramètres p_i^* .

Cependant, dans notre implémentation, nous avons peu d'information a priori permettant un classement des paramètres en fonction de leur fiabilité. En effet, la majorité des valeurs des paramètres est issue de la littérature et nous considérons que l'estimation visuelle de paramètres n'est pas plus ou moins fiable que les valeurs de la littérature. Ainsi, nous ne considérons qu'un seul groupe de paramètres dont l'ordre est choisi au hasard. Ce choix étant arbitraire, il nous a semblé pertinent de savoir si la solution obtenue était dépendante de l'ordre défini. De même, il nous a semblé intéressant de savoir si la solution obtenue après une première itération couvrant les N paramètres pouvait être améliorée. En effet, comme dit précédemment, lors de cette première itération, la valeur optimale de p_k est calculée en utilisant les valeurs nominales estimées pour tous les paramètres $p_{i>k}$. Nous avons donc choisi d'effectuer plusieurs itérations jusqu'à que le RMSE ne varie plus entre le premier et le dernier paramètre et de tester différents ordres de paramètres. L'ensemble du processus de calibration est schématisé sur la Figure 7.1. Le processus s'arrête quand on a testé un nombre d'ordres considéré comme suffisant.

Les paramètres du modèle ont été divisés en deux catégories : les paramètres fixés et donc invariants et ceux soumis au processus de calibration. La première catégorie de paramètres regroupée dans le Tableau 7.1 concerne les constantes physiques, les propriétés de l'air, les dimensions de la serre, les paramètres liés au processus d'évapotranspiration des plantes (cf. partie 6.3.4) ainsi que l'émissivité et le coefficient de réflexion CLO de l'enveloppe. La seconde catégorie, présentée dans le Tableau 7.2, regroupe les paramètres relatifs aux propriétés thermiques ou radiatives (CLO et GLO) de l'enveloppe, du sol et de la canopée ainsi que les paramètres liés à la ventilation naturelle de la serre.

Une revue de littérature des modèles de serres a permis de déterminer les valeurs minimales et maximales de la plupart des paramètres soumis à la calibration, à quelques

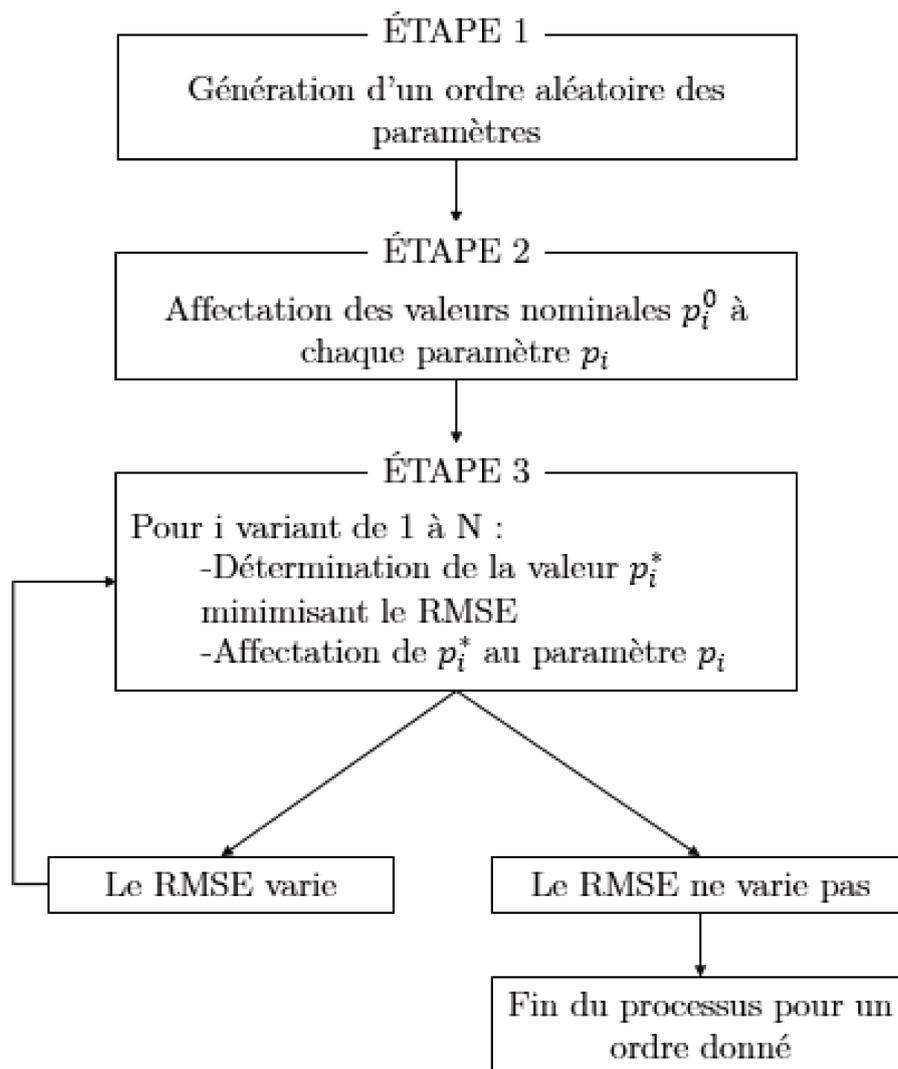


FIGURE 7.1 – Schéma résumant le processus de calibration

exceptions près : la plage de valeurs possibles de la hauteur du toit h_{toit} et de la LAI a été estimée visuellement *in situ* ; le coefficient de transmission CLO de l'enveloppe en polycarbonate vaut 0,8 selon le constructeur [108] mais l'agglomération de poussière peut diminuer ce coefficient et une valeur minimale de 0,7 a été considérée ; l'enveloppe étant composée d'air et de polycarbonate (double vitrage), sa capacité thermique a été estimée comme étant comprise entre la capacité thermique de l'air ($1\,005\text{ J K}^{-1}\text{ kg}^{-1}$) et celle du polycarbonate ($1\,200\text{ J K}^{-1}\text{ kg}^{-1}$ [148]) ; la valeur minimale de la température du sol profond considérée est la moyenne annuelle de la température intérieure tandis la valeur maximale correspond à la moyenne sur la période de simulation de la température extérieure. Les valeurs nominales des paramètres sont calculées comme étant la moyenne des valeurs minimales et maximales.

Une revue de littérature nous a donc permis de définir un processus de calibration en se basant sur une adaptation de méthodes existantes. Par ailleurs, les paramètres pouvant être soumis à la calibration ont été identifiés et leur plage de valeurs possibles

a été déterminée en se basant majoritairement sur la littérature scientifique disponible. La prochaine partie présente l'implémentation numérique du processus de calibration ainsi que les résultats obtenus.

TABLEAU 7.1 – Paramètres fixes du modèle de la serre

Paramètre	Symbole	Unité	Valeurs
<i>Constantes physiques</i>			
Masse molaire de l'eau	M_{H_2O}	kg mol ⁻¹	18×10^{-3}
Constante des gaz parfaits	R	J mol ⁻¹ K ⁻¹	8,314
Constante de Stephan-Boltzmann	σ	W m ⁻² K ⁻⁴	$5,670 \times 10^{-8}$
Accélération de la pesanteur terrestre	g	m s ⁻²	9,81
Enthalpie de vaporisation de l'eau	ΔH	J kg ⁻¹	$2,45 \times 10^6$
Constante psychrométrique	γ	Pa K ⁻¹	65,8
<i>Dimensions de la serre</i>			
Longueur	L_{ser}	m	18,3
Largeur	l_{ser}	m	7,6
Hauteur	h_{ser}	m	4,1
Surface	A_{ser}	m ²	139
<i>Enveloppe</i>			
Épaisseur de l'enveloppe	h_{env}	m	8×10^{-3}
Surface de l'enveloppe	A_{env}	m ²	276
Volume de l'enveloppe	V_{env}	m ³	2,2
Coefficient de réflexion (CLO)	r_{env}^{CLO}	-	0,1 [149]
Masse volumique	ρ_{env}	kg m ⁻³	187,5 [150]
Émissivité	ε_{env}	-	0,9 [94]
<i>Air intérieur</i>			
Volume	V_{air}	m ³	448
Masse volumique	ρ_{air}	kg m ⁻³	1,2
Capacité thermique massique	$c_{p,air}$	J K ⁻¹ kg ⁻¹	1 005

TABLEAU 7.2 – Paramètres du modèle de la serre soumis au processus de calibration

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur nominale	Pas de variation
<i>Enveloppe</i>						
Coefficient de transmission (CLO)	τ_{env}^{CLO}	-	0,7	0,8 [108]	0,76	0,02
Capacité thermique massique	$c_{p,env}$	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	1 000	1 200	1 100	50
<i>Sol</i>						
Conductivité thermique	λ_{sol}	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,7 [116]	1,7 [94]	1,2	0,1
Capacité thermique massique	$c_{p,sol}$	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	800 [94]	1 900 [129]	1 300	100
Masse volumique	ρ_{sol}	kg m^{-3}	1 300 [116]	2 300 [94]	1 800	100
Coefficient de réflexion (CLO)	r_{sol}^{CLO}	-	0,05 [74]	0,5 [94]	0,3	0,05
Émissivité	ε_{sol}	-	0,8 [116]	1 [94]	0,9	0,05
Température du sol profond	$T_{sol(pro)}$	$^{\circ}\text{C}$	2	12	7	1
<i>Canopée</i>						
Surface de plantes	LAI	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$	0,5	2	1	0,5
Coefficient de réflexion (CLO)	r_{can}^{CLO}	-	0,1 [115]	0,2 [94]	0,15	0,05
Coefficient d'extinction (CLO)	K_{can}^{CLO}	-	0,3 [127]	0,8 [127]	0,5	0,1
Coefficient d'extinction (GLO)	K_{can}^{GLO}	-	0,5 [128]	1 [128]	0,7	0,1
Émissivité	ε_{can}	-	0,7 [13]	1 [94, 128]	0,85	0,05
<i>Ventilation</i>						
Hauteur d'ouverture du toit	h_{toit}	m	0,5	1,5	1	0,1
Coefficient de décharge	C_d	-	0,4 [116]	0,8 [112]	0,6	0,1
Coefficient vent	C_w	-	0,03 [116]	0,14 [112]	0,09	0,01
Débit de fuites	c_{fui}	-	1×10^{-4} [94]	1×10^{-3} [151]	5×10^{-4}	1×10^{-4}

7.3 Mise en œuvre et résultats

La méthode de calibration précédemment décrite a été appliquée en développant un logiciel basé sur le langage informatique Python et en couplant ce dernier à Modelica. Après avoir généré une liste des paramètres dans un ordre aléatoire (étape 1), le logiciel écrit les valeurs nominales dans le fichier de calibration (étape 2). Ce fichier au format XML¹ est utilisé par OpenModelica pour notamment stocker et lire les valeurs des paramètres du modèle. Par ailleurs, OpenModelica génère un exécutable du modèle développé. Le programme peut commencer l'étape 3 du processus de calibration en lançant la simulation pour chaque valeur du premier paramètre p_1 déterminée dans la partie précédente, en calculant le RMSE pour chacune de ces valeurs. Un exemple de cette phase du processus est représenté sur la Figure 7.2. Cette dernière présente la variation du RMSE sur la température intérieure en fonction des différentes valeurs de $T_{sol(pro)}$. On peut alors noter que la valeur optimale de la température du sol profond est $T_{sol(pro)}^* = 7^\circ\text{C}$ pour un RMSE de $1,58^\circ\text{C}$.

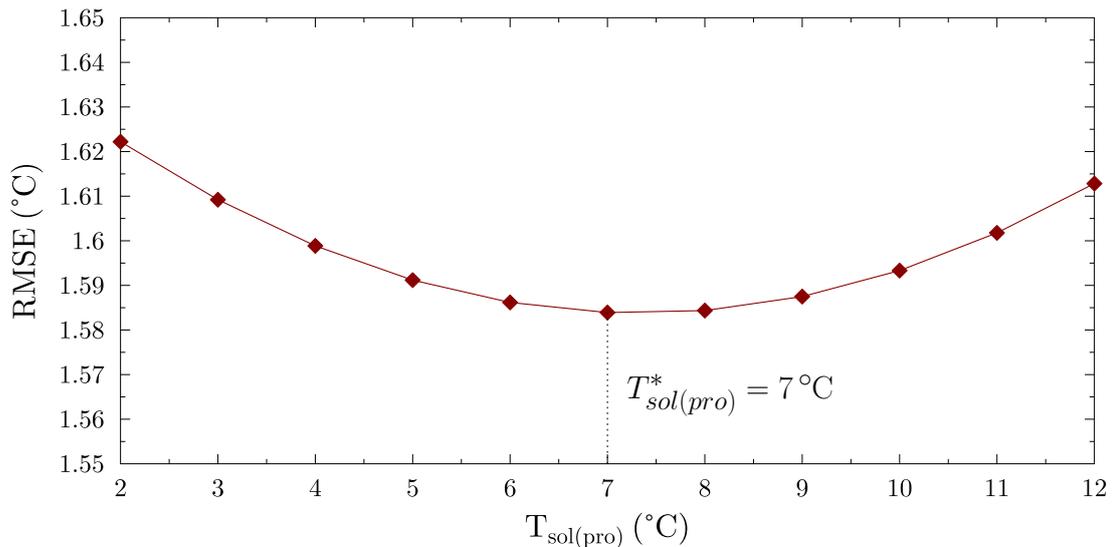


FIGURE 7.2 – Détermination de la valeur optimale du paramètre $T_{sol(pro)}$

La valeur optimale p_1^* minimisant le RMSE est alors enregistrée et écrite dans le fichier XML. Le programme recommence ensuite de manière identique avec chaque paramètre à calibrer. Quand la première itération de l'étape 3 est terminée (i.e. les valeurs optimales de chaque paramètre p_i^* sont trouvées), le logiciel compare le RMSE associé à p_1^* et celui associé à p_N^* où N est le nombre total de paramètres. Si ces RMSE sont différents, l'étape 3 est relancée à partir de la liste de valeurs optimales p_i^* trouvée lors de l'itération précédente. La Figure 7.3 donne un exemple de l'évolution du RMSE durant les deux premières itérations de l'étape 3 pour deux ordres de paramètres

1. Extensible Markup Language, format utilisant des balises pour décrire et structurer des données

différents.

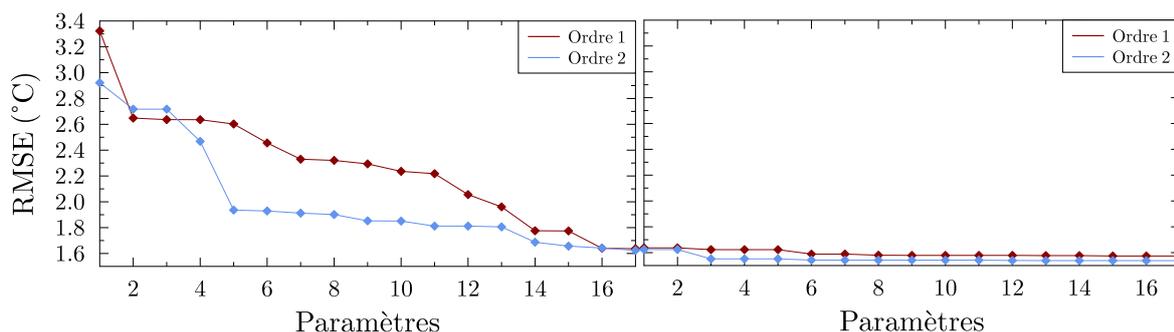


FIGURE 7.3 – Évolution du RMSE au cours des deux premières itérations de l'étape 3 (la première à gauche, la deuxième à droite) pour deux ordres différents de paramètres

On peut noter que selon l'ordre des paramètres, les évolutions du RMSE sont différentes mais qu'il converge vers la même valeur. Par ailleurs, on peut remarquer que la variation du RMSE devient faible dès la deuxième itération. Cependant, l'étape 3 du processus de calibration est recommencée tant que le RMSE n'est pas identique entre le premier et le dernier paramètre ce qui donne entre 3 et 6 itérations avant la convergence du RMSE, selon l'ordre des paramètres. Il y a 17 paramètres ayant entre 3 et 12 valeurs possibles, donnant un total de 135 valeurs. Cela signifie que pour un ordre donné, la simulation du modèle est effectuée entre $3 \times 135 = 405$ et $6 \times 135 = 810$ fois, ce qui nous conforte dans le choix d'un modèle nodal ayant un temps de simulation court.

Afin d'évaluer l'influence de l'ordre des paramètres sur le RMSE final du processus de calibration, 10 ordres différents et aléatoires ont été testés. La calibration a été effectuée sur les 9 jours présentés dans la partie précédente, du 23 août au 1er septembre 2017. Les valeurs des paramètres obtenues après le processus de calibration sont indiquées dans le Tableau 7.3 avec le RMSE et le coefficient de détermination calculés pour chaque ordre de paramètres.

L'écart entre les différents RMSE et entre les coefficients de détermination est systématiquement inférieur à 1×10^{-3} ce qui explique que les valeurs du RMSE et du coefficient de détermination sont constantes dans le Tableau 7.3, malgré des valeurs de paramètres différentes. On peut noter que sur les 17 paramètres calibrés, 11 obtiennent la même valeur quelque soit l'ordre. Les valeurs de paramètre différentes selon l'ordre considéré peuvent être expliquées par leur interdépendance. Par exemple C_d , C_w , h_{toit} et c_{fui} apparaissent tous les quatre dans une seule équation, celle du débit volumique total de ventilation entre la serre et l'extérieur (f_{venti} , cf. équation (6.35)). Il est alors logique que la diminution d'un de ces paramètres entraîne l'augmentation d'un des autres afin de maintenir le résultat de l'équation (6.35) constant. Ce phénomène est visible sur la Figure 7.4 : après avoir simulé la température de la serre avec les valeurs

calibrées de chacun des 10 ordres de paramètres, les valeurs minimales et maximales de f_{venti} sont calculées pour chaque pas de temps et représentées sur la Figure 7.4.

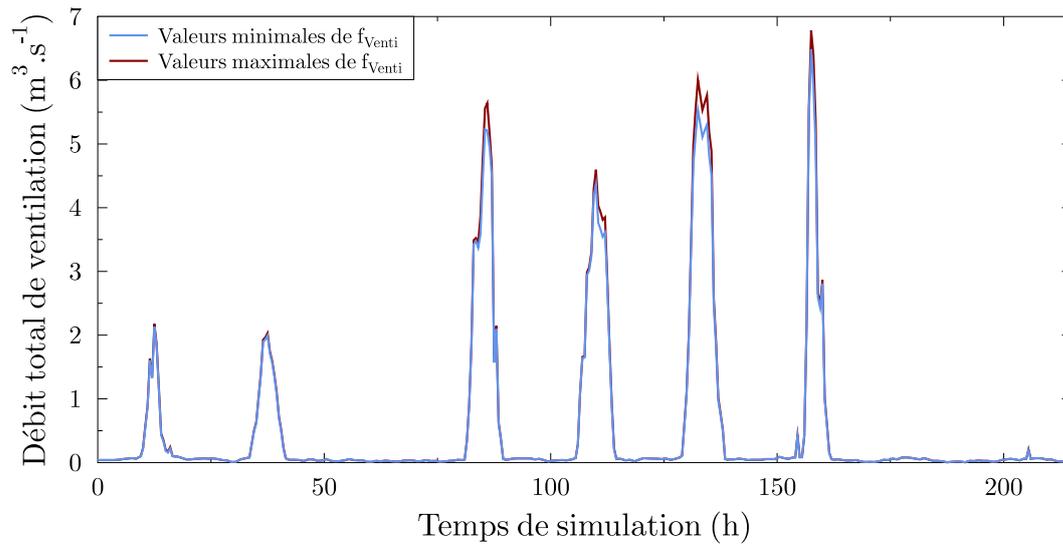
TABLEAU 7.3 – Résultats du processus de calibration du modèle de la serre

Paramètre	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3	Ordre 4	Ordre 5	Ordre 6	Ordre 7	Ordre 8	Ordre 9	Ordre 10
C_d	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4	0,7	0,8
c_{fui}	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
$c_{p,env}$	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
$c_{p,sol}$	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
C_w	0,03	0,03	0,04	0,09	0,05	0,03	0,03	0,12	0,06	0,04
ε_{can}	0,7	0,75	0,7	0,7	0,75	0,7	0,85	0,85	0,8	0,9
ε_{sol}	0,8	1	0,85	0,95	1	0,9	0,95	0,95	0,9	1
h_{toit}	0,8	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	1,2	0,6	0,5	0,5
K_{can}^{CLO}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
K_{can}^{GLO}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LAI	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
λ_{sol}	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
r_{can}^{CLO}	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
ρ_{sol}	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
r_{sol}^{CLO}	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$T_{sol(pro)}$	7	11	8	10	11	9	11	11	10	12
τ_{env}^{CLO}	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
RMSE	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
r^2	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96

On peut noter que malgré le fait que les quatre paramètres impliqués dans l'équation (6.35) peuvent varier du simple au quadruple (par exemple $C_w = 0,03$ dans les ordres 1, 2, 6, 7 et $C_w = 0,12$ dans l'ordre 8), la différence maximale entre les valeurs minimales et maximales de f_{venti} est de 10% ce qui illustre l'interdépendance décrite ci-dessus.

Il est probable que ce phénomène d'interdépendance soit également à l'origine de la variation des autres paramètres : une diminution d'un flux d'énergie liée à la baisse ou à la hausse de la valeur d'un paramètre peut être compensée par l'augmentation d'un autre flux d'énergie liée à la variation d'un autre paramètre.

Par ailleurs, on peut noter que les paramètres constants sur tous les ordres prennent systématiquement la valeur minimale ou maximale de leur plage de variation. Une première hypothèse pourrait être que la plage de variation est trop étroite. Cependant, les bornes de ces plages ont été systématiquement justifiées, majoritairement à partir d'une revue de littérature scientifique. Il serait donc difficile de justifier physiquement

FIGURE 7.4 – Valeurs minimales et maximales de f_{venti} , tout ordre confondu

un élargissement de ces plages de variation. Une autre explication repose ici encore sur le phénomène d’interdépendance, entre différents phénomènes physiques cette fois. En effet, il est possible qu’un des flux explicité dans le chapitre précédent soit mal estimé, ce qui conduirait le processus de calibration à compenser en augmentant ou en diminuant un autre flux. Par exemple, nous avons vu que la température initialement simulée (cf. Figure 6.9) était systématiquement en dessous de la température mesurée durant la journée. Afin de réduire cette erreur, le processus de calibration aura tendance à augmenter le phénomène de stockage-restitution de la chaleur par le sol, en maximisant la chaleur reçue par le sol (i.e. maximiser a_{sol}^{CLO} donc minimiser r_{sol}^{CLO}) et en minimisant sa capacité à stocker de la chaleur (i.e. minimiser $c_{p,sol}$ et ρ_{sol}) pour augmenter la restitution de chaleur à l’air intérieur de la serre.

La simulation de la température à l’intérieur de la serre avec les valeurs calibrées des paramètres est présentée sur la Figure 7.5 et comparée aux résultats avant la calibration. Le RMSE calculé à partir des valeurs nominales des paramètres est de $3,55^{\circ}\text{C}$ tandis que celui associé aux valeurs calibrées vaut $1,53^{\circ}\text{C}$ (cf. Tableau 7.3). Par ailleurs, la différence maximale entre les valeurs minimales et maximales de la température intérieure tout ordre confondu est de $0,3^{\circ}\text{C}$. Ainsi, il n’est pas possible de différencier graphiquement les résultats liés à un ordre plutôt qu’un autre.

D’après une revue de littérature effectuée par Baptista (2007) [19], plusieurs auteurs considèrent qu’une valeur de RMSE inférieure à $1,6^{\circ}\text{C}$ pour une simulation de la température d’une serre permet de dire que le modèle est validé. Vanthoor (2011) [94] utilise le CVRMSE en considérant qu’une valeur inférieure à 10 % indique une validation du modèle. Or la moyenne de la température intérieure mesurée sur la période de

simulation est de 16 °C. Le CVRMSE est donc de 9,6 %.

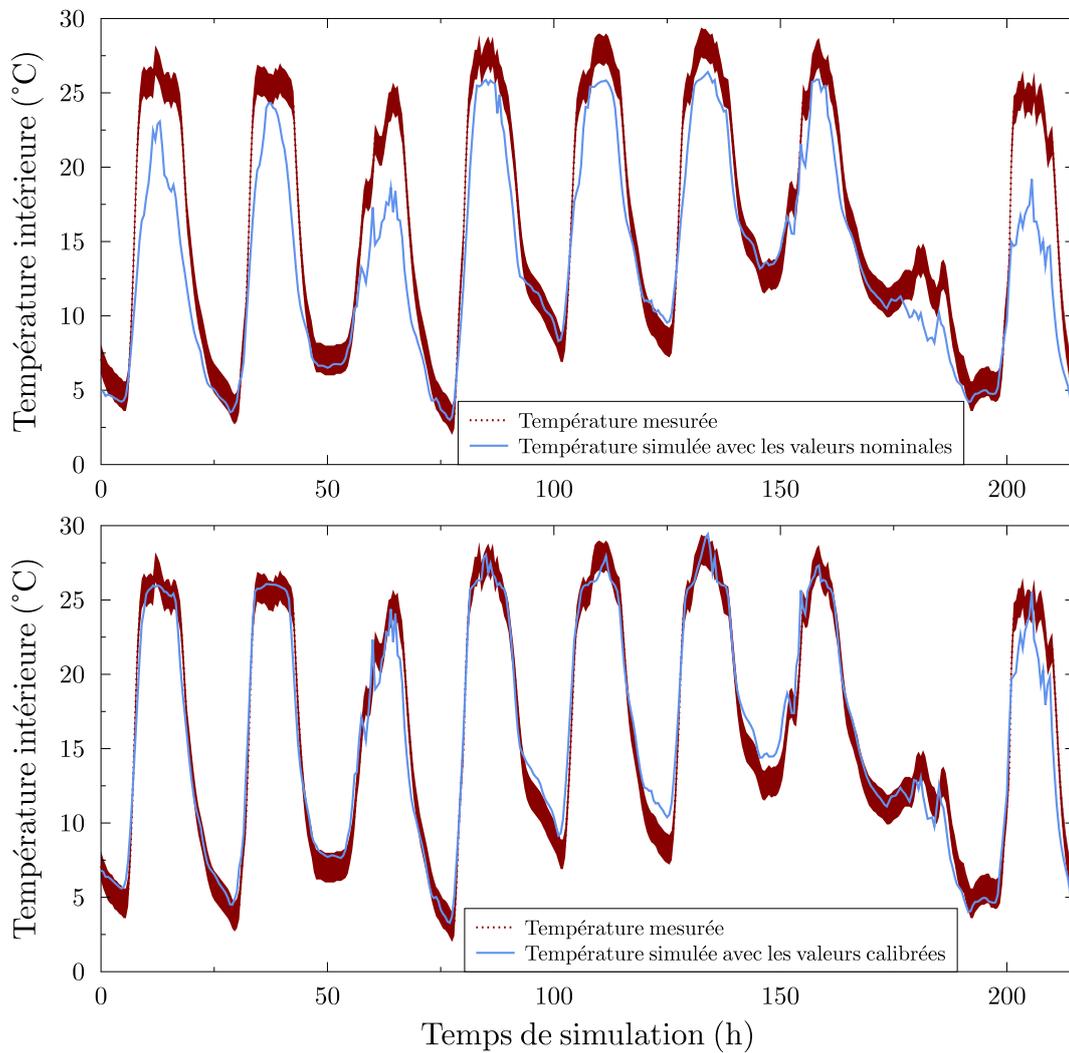


FIGURE 7.5 – Résultats de la simulation de la température intérieure de la serre avant et après le processus de calibration

Ces différents indicateurs permettent donc de valider ce modèle de climat sous serre. Cependant, le modèle ne prend pas en compte le système de stockage de la chaleur présenté dans le chapitre 4. Afin d'intégrer ce dernier au modèle numérique, il est nécessaire de développer un modèle indépendant de ce système qui pourra ultérieurement être couplé au modèle de serre. Cette modélisation du comportement thermique du système de stockage de la chaleur est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 8

La modélisation du système de stockage

Sommaire

8.1	Principes et équations du modèle	142
8.2	Calibration et résultats	145
8.2.1	Paramètres de calibration	145
8.2.2	Indicateurs statistiques et résultats	147

Les deux chapitres précédents ont présentés l'implémentation, la calibration et la validation du modèle du comportement thermique de la serre de Kuujuaq avant l'installation du système de stockage de la chaleur mis en place en novembre 2018 (cf. chapitre 4). Afin de prendre ce dernier en compte, ce chapitre développe le modèle numérique de ce système. La partie 8.1 présente le choix et les équations du modèle tandis que la partie 8.2 décrit le processus de calibration des paramètres physiques du système de stockage ainsi que les résultats de ce processus.

8.1 Principes et équations du modèle

Il existe de nombreux modèles pour étudier la dynamique de la température de lits de roches échangeant de la chaleur avec un fluide [100]. Ces modèles diffèrent selon les hypothèses considérées : modèle à une ou deux dimensions, prise en compte du gradient thermique à l'intérieur des roches ou pas, propriétés thermique des roches constantes et uniformes ou variables et hétérogènes. Comme nous l'avons vu dans les parties 6.1.3 et 7.3, il est préférable d'avoir un modèle peu coûteux en temps de calcul pour le processus de calibration et dans la mesure où l'objectif futur est de pouvoir étudier l'impact de l'ajout de systèmes énergétiques sur plusieurs mois. Parmi les modèles simples, un des modèles de référence pour de nombreux auteurs [100] est celui de Schumann (1929) [152]. Il s'agit d'un modèle à une dimension basé sur trois hypothèses principales : un milieu poreux homogène, un stockage isolé thermiquement et une absence de gradient thermique au sein du solide. On peut appliquer la première hypothèse dans la mesure où ce sont les mêmes roches de même dimension qui ont été réparties dans les caissons du système de stockage (cf. partie 4.3) et que le système a été conçu pour ne pas créer de chemins préférentiels pour l'air (cf. partie 4.2.1). Ensuite, l'analyse du comportement thermique du système de stockage a montré que la variation de température au sein des caissons de roches était minimale en l'absence de flux d'air (cf. partie 5.2.2 et Figure 5.9) ce qui nous permet de négliger les échanges thermiques entre les caissons et l'extérieur (sur le pas de temps considéré, i.e. une dizaine d'heures) et donc de valider la deuxième hypothèse. Finalement, il faut évaluer l'importance de la conduction à l'intérieur des roches afin de considérer la troisième hypothèse. Cela se fait en calculant le nombre de Biot (Bi) des roches, qui compare ce phénomène de conduction à l'échange global de chaleur en surface. En considérant des roches sphériques¹ et un échange convectif entre l'air et les roches représenté par le coefficient H_{RocAir} , le nombre de Biot peut être calculé grâce à l'équation (8.1) [130] :

$$Bi = \frac{H_{RocAir} R_{roc}}{3\lambda_{roc}} \quad [-] \quad (8.1)$$

1. Pour des sphères, la longueur caractéristique vaut le tiers du rayon, $L_c = \frac{R}{3}$

En considérant $R_{roc} = 1 \times 10^{-3}$ m (cf. partie 4.3), $H_{RocAir} = 45 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (cf. partie 8.2) et $\lambda_{roc} = 5,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [100], on obtient $Bi = 0.01$. Or, $Bi \leq 0,1$ signifie que la conduction interne au sein des roches est négligeable par rapport à l'échange surfacique d'énergie, ce qui permet de répondre à la troisième hypothèse.

Les trois conditions nécessaires à l'application du modèle de Schumann sont remplies, et c'est donc ce modèle qui sera utilisé. Il consiste en deux équations : l'une portant sur la phase solide (les roches, cf. équation (8.3)) et l'autre sur la phase fluide (l'air, cf. équation (8.2)), toutes deux liées par un terme d'échange convectif.

$$\varepsilon_{lit} \rho_{air} V_{lit} c_{p,air} \left(\frac{\partial T_{air,lit}}{\partial t} + v_{air,lit} \frac{\partial T_{air,lit}}{\partial x} \right) = H_{RocAir} A_{roc} (T_{roc} - T_{air,lit}) \quad [\text{W}] \quad (8.2)$$

$$(1 - \varepsilon_{lit}) \rho_{roc} V_{lit} c_{p,roc} \frac{\partial T_{roc}}{\partial t} = H_{RocAir} A_{roc} (T_{air,lit} - T_{roc}) \quad [\text{W}] \quad (8.3)$$

Avec ε_{lit} la fraction de vide du lit de roches, V_{lit} son volume, $T_{air,lit}$ la température de l'air dans le lit de roches, $v_{air,lit}$ la vitesse du flux d'air au sein du lit de roches, x la direction de ce flux d'air, H_{RocAir} le coefficient d'échange convectif entre l'air et les roches, A_{roc} la surface totale contribuant à cet échange et T_{roc} la température des roches dans le lit.

On peut noter que l'équation (8.2) et l'équation (8.3) sont toutes les deux des équations différentielles aux dérivées partielles. Afin de résoudre numériquement ces équations, les lits de roches sont virtuellement divisés en N_{lit} tranches perpendiculaires à la direction du flux d'air (cf. Figure 8.1).

On peut alors considérer que chaque tranche à une température d'air et de roche homogène. Pour une tranche i , trois flux sont pris en compte dans le bilan énergétique : $\dot{Q}_{RocAir(i)}$ l'échange convectif entre les roches et l'air au sein de la tranche, $\dot{Q}_{Air(i-1)}$ le flux advectif de chaleur provenant de la tranche précédente et $\dot{Q}_{Air(i)}$ le flux advectif de chaleur vers la tranche suivante. Le principe de modélisation du système de stockage de la chaleur est schématisé sur la Figure 8.2.

Étant donné que l'on considère la température homogène au sein d'une tranche, le système d'équations différentielles aux dérivées partielles peut donc se réécrire en N_{lit} systèmes de deux équations différentielles ordinaires représentées par l'équation (8.4) et l'équation (8.5).

$$\frac{\varepsilon_{lit} \rho_{air} V_{lit} c_{p,air}}{N_{lit}} \frac{dT_{air,lit(i)}}{dt} = \dot{Q}_{RocAir(i)} + \dot{Q}_{Air(i-1)} - \dot{Q}_{Air(i)} \quad i \in [1; N_{lit}] \quad [\text{W}] \quad (8.4)$$

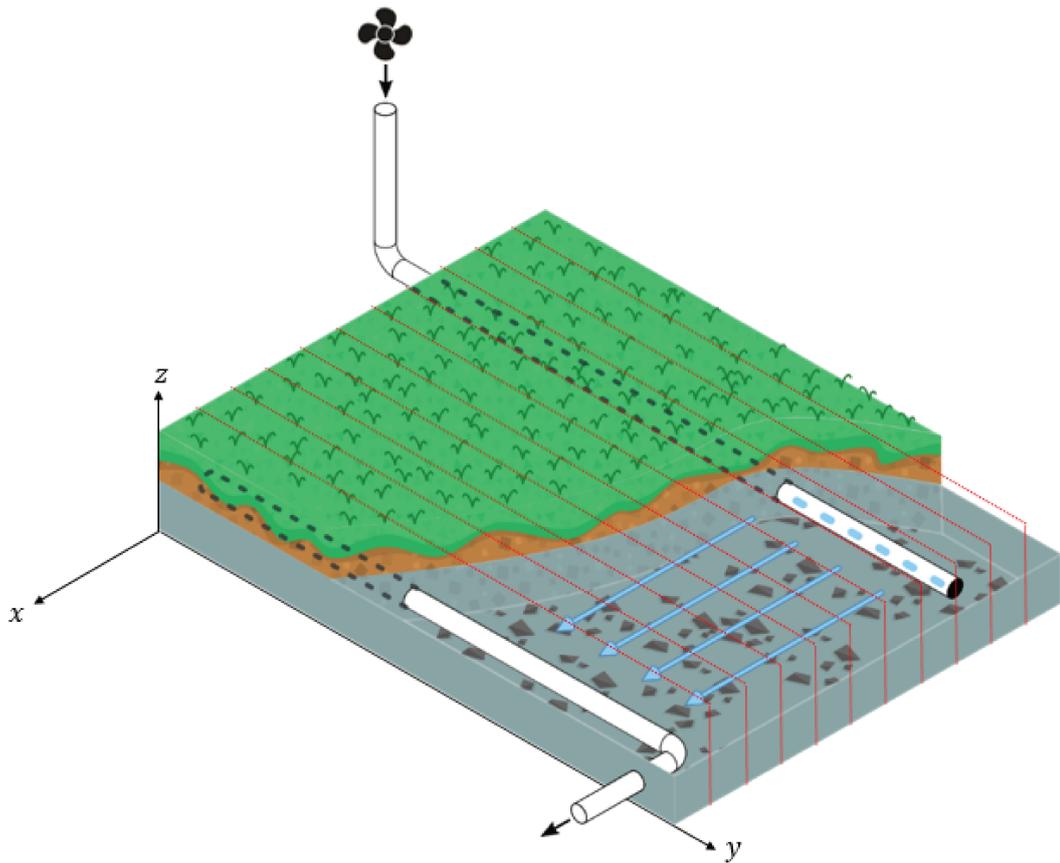


FIGURE 8.1 – Maillage d'un lit de roches

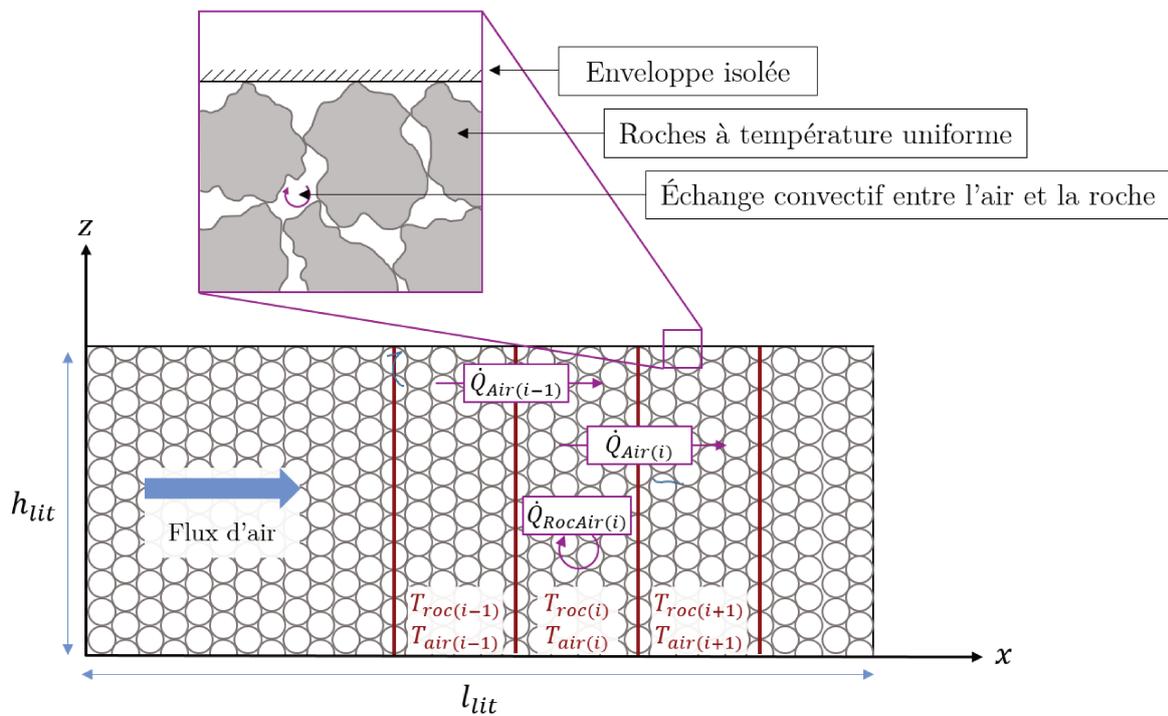


FIGURE 8.2 – Schéma du modèle de lit de roches

$$\frac{(1 - \varepsilon_{lit})\rho_{roc}V_{lit}c_{p,roc}}{N_{lit}} \frac{dT_{roc(i)}}{\partial t} = -\dot{Q}_{RocAir(i)} \quad i \in [1; N_{lit}] \quad [\text{W}] \quad (8.5)$$

Le flux de chaleur convectif entre l'air et la roche au sein d'une tranche est alors donné par l'équation (8.6) :

$$\dot{Q}_{RocAir(i)} = \frac{H_{RocAir}A_{roc}}{N_{lit}}(T_{roc(i)} - T_{air,lit(i)}) \quad i \in [1; N_{lit}] \quad [\text{W}] \quad (8.6)$$

Le coefficient d'échange convectif H_{RocAir} est écrit pour prendre en compte le phénomène de convection forcée quand les ventilateurs sont en fonctionnement et celui de convection naturelle quand ils sont à l'arrêt :

$$H_{RocAir} = U_{ven}H_{RocAirFor} + (1 - U_{ven})H_{RocAirNat} \quad [\text{W}] \quad (8.7)$$

Avec U_{ven} l'état des ventilateurs ($U_{ven} = 1$ s'ils fonctionnent, 0 sinon), $H_{RocAirFor}$ le coefficient d'échange par convection forcée et $H_{RocAirNat}$ celui par convection naturelle.

Le flux de chaleur advectif de la tranche i vers la tranche $i + 1$ est représenté par l'équation (8.8) :

$$\dot{Q}_{Air(i)} = \begin{cases} U_{ven}q_v\rho_{air}c_{p,air}T_{air} & \text{si } i = 0 \\ U_{ven}q_v\rho_{air}c_{p,air}T_{air,lit(i)} & \text{si } i \in [1; N_{lit}] \end{cases} \quad [\text{W}] \quad (8.8)$$

Avec q_v le débit volumique du flux d'air passant dans le lit de roches et T_{air} la température de l'air intérieur de la serre.

Un modèle simple représentant le comportement thermique du système de stockage a donc été justifié et choisi. L'implémentation numérique a été effectuée grâce à Modelica, le langage de modélisation présenté dans la partie 6.4. Afin de quantifier et d'améliorer les performances de ce modèle, il est nécessaire de définir un ou plusieurs indicateurs statistiques et de soumettre les paramètres du modèle à un processus de calibration, de manière analogue au chapitre 7.

8.2 Calibration et résultats

8.2.1 Paramètres de calibration

Le processus de calibration est identique à celui présenté dans la partie 7.2. Six paramètres ont été identifiés pour être soumis à ce processus. Premièrement, la porosité

(ou fraction de vide) des lits a été estimée à $\varepsilon_{lit} = 0,42$ en mesurant la porosité d'un échantillon de roches (cf. partie 4.3). Cependant, nous avons estimé que cette porosité pouvait être différente de cette mesure, notamment à cause de la présence de sable ou de réarrangement des roches au sein des caissons, et nous avons choisi la plage de variation 0,3–0,5. Ensuite, le débit volumique d'air a été évalué à partir du calcul des pertes de charge dans la partie 4.3, $q_v = 780 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, et une incertitude de 10 % a été considérée. Par ailleurs, il semble probable que la valeur numérique du débit soit inférieur à celui calculé dans la mesure où l'accumulation de poussière et la présence de sable dans le lit de roches peuvent augmenter les pertes de charge. La plage de variation retenue du débit est donc 500–850 $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$. En outre, une équipe de géologues travaillant sur le potentiel de stockage géothermique à Kuujjuaq [153] a examiné les roches du caisson et a identifié un mélange de granites, de diorites et de gneiss en évaluant la capacité thermique volumique dans la plage 2,2–2,7 $\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ [154]. Or la capacité thermique volumique est le produit de la masse volumique et de la capacité thermique massique, et nous avons vu dans la partie 7.3 que faire varier deux paramètres interdépendants (i.e. intervenants dans une seule équation) avait peu d'intérêt. Nous avons donc choisi de fixer la masse volumique et de faire varier la capacité thermique massique. Or, la masse volumique du lit de roches a été mesurée à $\rho_{lit} = 1,56 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ (cf. partie 4.3). En utilisant l'équation (8.9) et la valeur $\varepsilon_{lit} = 0,42$, on obtient $\rho_{roc} = 2,7 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ce qui donne la plage de variation pour la capacité thermique massique : 800–1 000 $\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$.

$$\rho_{roc} = \frac{\rho_{lit}}{(1 - \varepsilon_{lit})} \quad [\text{kg m}^{-3}] \quad (8.9)$$

La plage de variation du coefficient de convection naturelle a été pris dans une plage typique pour l'air [155] : 2–10 $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Le coefficient de convection forcée au sein du lit de roches se calcule classiquement par l'équation (8.10) :

$$H_{RocAirFor} = \frac{\lambda_{air} \text{Nu}}{D_{roc}} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}] \quad (8.10)$$

Où λ_{air} est la conductivité thermique de l'air, Nu représente le nombre de Nusselt et D_{roc} représente le diamètre des roches.

Le nombre de Nusselt peut par exemple être calculé suivant la corrélation expérimentale de Beek (1962) [156] (cf. équation (8.11)), obtenue pour des échanges fluide/solide dans des lits de roches :

$$\text{Nu} = 3,22(\text{Re}_{lit} \text{Pr})^{\frac{1}{3}} + 0,117 \text{Re}_{lit}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \quad [-] \quad (8.11)$$

Avec Re_{lit} le nombre de Reynolds au sein du lit de roches (cf. équation (8.12)) et Pr le nombre de Prandtl de l'air (cf. équation (8.13)).

$$\text{Re}_{lit} = \frac{v_{air,lit} D_{roc}}{\nu_{air}} \quad [-] \quad (8.12) \quad \text{Pr} = \frac{\mu_{air} c_{p,air}}{\lambda_{air}} \quad [-] \quad (8.13)$$

Où $v_{air,lit}$ est la vitesse de l'air dans le lit de roches (cf. équation (4.9)), ν_{air} est la viscosité cinématique et μ_{air} la viscosité dynamique de l'air. Le calcul des valeurs numériques donne $\text{Nu} = 17$ et donc $H_{RocAirFor} = 45 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Afin de prendre en compte l'incertitude sur $v_{air,lit}$, la plage de variation choisie pour $H_{RocAirFor}$ est $30\text{--}60 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Le paramètre le plus difficile à estimer est la surface de roches impliquée dans l'échange convectif avec l'air. En effet, cette surface dépend grandement de la taille des roches et surtout de leur forme. Il existe une formule pour un empilement ordonné de sphères, donnée par l'équation (8.14) [100] :

$$A_{roc} = \frac{6(1 - \varepsilon_{lit})}{D_{roc}} V_{lit} \quad [\text{m}^2] \quad (8.14)$$

Cette formule donne $A_{roc} = 2270 \text{ m}^2$ pour $D_r = 0,01 \text{ m}$ et $\varepsilon_{lit} = 0,42$. Cependant, si on considère les roches comme des cubes dans un empilement ordonné, on obtient une surface d'échange quasiment nulle dans la mesure où chaque face de cube est en contact avec la face d'un autre cube et ne participe donc pas à l'échange convectif avec l'air. Une première série de tests a alors été lancée afin de déterminer la plage de variation de A_{roc} . Les résultats indiquent que le modèle fonctionne de manière optimale pour une valeur numérique de A_{roc} comprise entre 10 et 100 m^2 . L'ensemble des valeurs numériques des paramètres du modèle de stockage sont regroupées dans le Tableau 8.1 pour les paramètres fixes et dans le Tableau 8.2 pour les paramètres identifiés ci-dessus et soumis au processus de calibration.

8.2.2 Indicateurs statistiques et résultats

Nous avons justifié dans la partie 7.1 que le RMSE était un bon choix d'indicateur de performance d'un modèle. Cependant, dans la mesure où plusieurs températures sont mesurées au sein du système de stockage, on peut utiliser plusieurs RMSE. En effet, il y a cinq sondes Pt100 disposées dans un lit de roches et une sonde placée à la sortie de ce lit afin de mesurer la température T_{sor} (cf. partie 5.1 et Figure 5.11). Parmi les capteurs placés au sein des roches, nous avons vu dans la partie 5.2.2 que les sondes mesurant T_1 , T_3 et T_5 donnaient un résultat identique et que la sonde T_2 avait un comportement anormal. Les deux capteurs utilisés pour représenter l'état interne du stock (i.e. sa température) sont donc T_4 et T_3 .

TABLEAU 8.1 – Paramètres fixes du modèle de stockage

Paramètre	Symbole	Unité	Valeurs
<i>Dimensions d'un lit de roches</i>			
Longueur	L_{lit}	m	8,7
Largeur	l_{lit}	m	2,5
Hauteur	h_{lit}	m	0,3
Surface	V_{lit}	m ³	6,5
Nombre de maille	N_{lit}	-	10
<i>Air</i>			
Masse volumique	ρ_{air}	kg m ⁻³	1,2
Capacité thermique massique	$c_{p,air}$	JK ⁻¹ kg ⁻¹	1 005
Viscosité dynamique	μ_{air}	Pa s	$1,85 \times 10^{-5}$
Viscosité cinématique	$\nu_{air} = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air}}$	m ² s ⁻¹	$1,54 \times 10^{-5}$
<i>Roches</i>			
Diamètre moyen	D_{roc}	m	0,01
Masse volumique	ρ_{roc}	kg m ⁻³	2 700

TABLEAU 8.2 – Paramètres du modèle de stockage soumis au processus de calibration

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur nominale	Pas de variation
Capacité thermique massique des roches	$c_{p,roc}$	JK ⁻¹ kg ⁻¹	800	1 000	900	50
Fraction de vide (porosité)	ε_{lit}	-	0,3	0,5	0,4	0,05
Coefficient d'échange convectif (forcée)	$H_{RocAirFor}$	WK ⁻¹ m ⁻²	30	60	45	5
Coefficient d'échange convectif (naturelle)	$H_{RocAirNat}$	WK ⁻¹ m ⁻²	2	10	5	2
Débit volumique	q_v	m ³ h ⁻¹	500	850	750	50
Surfaces d'échange des roches	A_{roc}	m ²	10	100	50	10

Les RMSE associés aux températures T_4 et T_3 sont calculés grâce à l'équation (7.4). Cependant nous avons choisi de légèrement modifier le calcul du RMSE associé à T_{sor} , en ne considérant que les périodes de fonctionnement des ventilateurs. En effet, quand les ventilateurs sont éteints, la température de sortie mesurée T_{sor}^{mes} tend vers la température de l'air de la serre T_{air} car le capteur est placé à la sortie du tuyau se trouvant dans la serre. A contrario, la température de sortie simulée T_{sor}^{sim} reste constante en dehors des périodes de charge/décharge dans la mesure où cette température est considérée comme égale à la température de l'air dans la dernière tranche de lit avant la sortie ($T_{sor}^{sim} = T_{air, lit(N_{lit})}$). Le RMSE de T_{sor} est donc calculé selon l'équation (8.15) :

$$RMSE_{T_{sor}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{U_{ven} \neq 0} (T_{sor}^{mes} - T_{sor}^{sim})^2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8.15)$$

Par ailleurs, afin d'évaluer les performances de ce modèle de stockage, il est nécessaire de comparer les indicateurs de performance avec des expériences similaires. Or, les conditions de validation des modèles de lits de roches ne sont pas claires dans la littérature scientifique et manque de critères quantitatifs. Par exemple, Al-Nimr et al. (1996) [157] ont simulé le comportement thermique d'un lit de roches fonctionnant avec une température d'entrée de 67°C et évoquent un « bon accord » entre les résultats expérimentaux et numériques afin de valider leur modèle. Kürklü et al. (2003) [23] ont étudié un lit de roches au sein d'une serre (cf. partie 4.1.2) et qualifient la corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux d'« excellente » sans indicateurs quantitatifs. De même, Hänchen et al. (2011) [158] et Cascetta et al. (2016) [159] ont modélisés des lits de roches fonctionnant à haute température (T_{ent} compris dans la plage $300\text{--}550^{\circ}\text{C}$) et parlent ici encore de « bon accord » entre simulation et mesure. A contrario, Willits et al. (1985) [160] ont simulé le fonctionnement d'un lit de roches dans une serre et ont obtenu une erreur moyenne (cf. équation (7.1)) sur la température des roches variant entre $0,2$ et $0,7^{\circ}\text{C}$ selon les jours de simulation. Opitz et Treffinger (2014) [144] ont étudié un système de stockage basé sur un lit de roches fonctionnant à différentes températures et ont calculé une moyenne de l'erreur relative (MPE cf. équation (7.3)) sur la température des roches comprise entre $1,1$ et $7,3\%$. Enfin, Jemmal et al. (2020) [161] ont travaillé sur des lits de roches à haute température ($T_{ent} = 350^{\circ}\text{C}$) et ont rapporté un MPE inférieur à 4% .

La première approche a été de minimiser $RMSE_{T_{sor}}$ dans la mesure où la température de sortie du lit de roches est la grandeur principale que l'on cherche à modéliser. En effet, T_{sor} apparaît dans l'équation (4.1) (cf. partie 4.1.3) quantifiant l'échange d'énergie entre l'air de la serre et les roches des caissons. Minimiser $RMSE_{T_{sor}}$ équivaut à considérer le modèle comme une boîte noire : on ne considère pas l'état interne des lits de roches. L'algorithme de calibration présenté dans la partie 7.2 a été appliqué au modèle

de stockage présenté ci-dessus, en utilisant les données de cinq jours de fonctionnement du système au début de la saison de culture 2019, du 31 mai à 23h00 au 06 juin à 00h00. Cette durée de simulation inclut la période sur laquelle a été effectuée l'analyse de la dynamique du lit de roches (cf. Figure 5.9 de la partie 5.2.2). Les données d'entrée sont la température d'entrée du système de stockage, l'état des ventilateurs U_{ven} ainsi que les températures initiales des différentes strates du lit de roches, calculées à partir d'un polynôme d'interpolation basé sur les valeurs mesurées. Les valeurs numériques issues du processus de calibration sont présentées dans le Tableau 8.3.

TABLEAU 8.3 – Résultats du processus de calibration du système de stockage minimisant $RMSE_{T_{sor}}$

Paramètre	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3	Ordre 4	Ordre 5	Ordre 6	Ordre 7	Ordre 8	Ordre 9	Ordre 10
$c_{p,roc}$	900	1 000	1 000	1 000	1 000	950	1 000	900	950	1 000
ε_{lit}	0,35	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,35	0,30	0,35
$H_{RocAirFor}$	30	35	35	35	35	30	35	30	30	30
$H_{RocAirNat}$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
q_v	550	650	650	650	650	600	650	550	600	600
A_{roc}	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$RMSE_{T_{sor}}$	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
$RMSE_{T_3}$	2,04	2,07	2,07	2,07	2,07	2,12	2,07	2,04	2,12	2,08
$RMSE_{T_4}$	2,68	2,71	2,71	2,71	2,71	2,79	2,71	2,68	2,79	2,75
$RMSE_{Moy}$	1,99	2,01	2,01	2,01	2,01	2,07	2,01	1,99	2,07	2,04

La Figure 8.3 présente les valeurs minimales et maximales obtenues pour T_{sor} , T_3 et T_4 , tout ordre confondu. Les RMSE indiqués sur chaque sous-figure sont la moyenne des valeurs du Tableau 8.3. Les périodes où les ventilateurs ne fonctionnent pas sont grisées sur la Figure 8.3 (a) pour signifier que ces périodes ne sont pas prise en compte dans le calcul de $RMSE_{T_{sor}}$.

Une première chose que l'on peut noter sur la Figure 8.3 est que l'ordre des paramètres a peu d'influence sur les résultats. En effet, la différence moyenne entre les valeurs simulées maximales et minimales de température est de $0,3^\circ\text{C}$ pour T_3 et T_4 et de $0,4^\circ\text{C}$ pour T_{sor} . Cela rejoint les résultats obtenus dans le chapitre précédent montrant que l'ordre dans lequel on effectue la calibration importe peu. Ensuite, on peut noter un bon accord entre T_{sor}^{mes} et T_{sor}^{sim} avec $RMSE_{T_{sor}} = 0,71^\circ\text{C}$. Pour rappel le critère de validation du modèle de serre est un RMSE sur l'air intérieur inférieur à $1,6^\circ\text{C}$. Les résultats sur la température interne du stock sont moins bons que ceux sur la température de sortie avec $RMSE_{T_3} = 2,08^\circ\text{C}$ et $RMSE_{T_4} = 2,72^\circ\text{C}$ (valeurs moyennes des 10 ordres). Le calcul des MPE donne : $0,2\% \leq MPE_{T_{sor}} \leq 2,4\%$, $0,9\% \leq MPE_{T_3} \leq 2,8\%$ et $0,4\% \leq MPE_{T_4} \leq 2,0\%$ selon les valeurs considérées

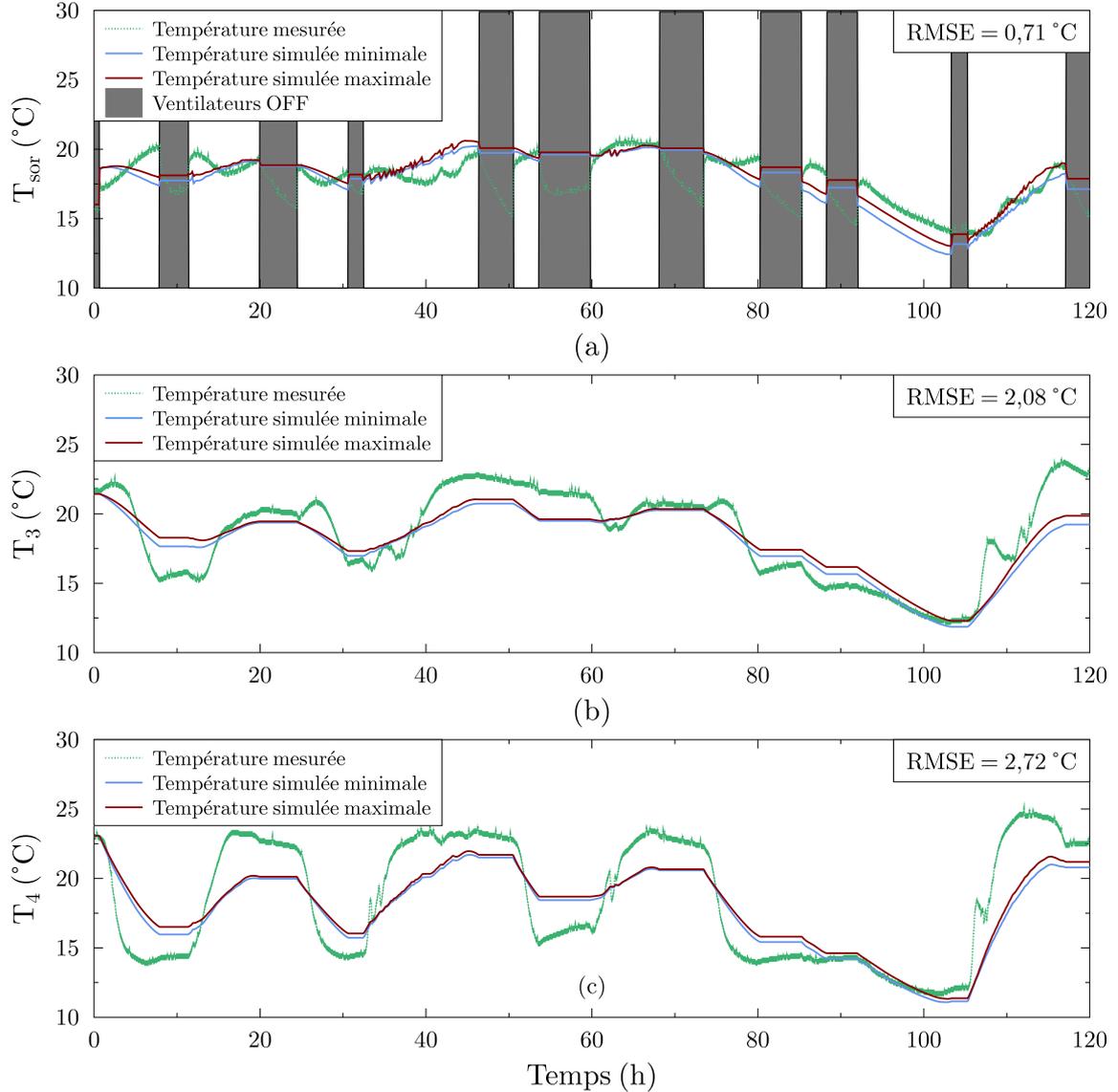


FIGURE 8.3 – Résultats de la simulation du comportement thermique du système de stockage (minimisation de $RMSE_{T_{sor}}$)

(minimales ou maximales). Ces résultats répondent aux critères de validation énoncés ci-dessus ($1,1\% \leq MPE \leq 7,3\%$ [144] et $MPE \leq 4\%$ [161]). Cependant, comme nous le verrons par la suite, les faibles valeurs des MPE calculés pour notre système proviennent en fait de l'effet d'annulation décrit dans la partie 7.1 : les surestimations du modèle compensent les sous-estimations.

Afin de prendre en compte la température interne des lits de roches, nous introduisons un indicateur mixte du modèle de stockage sous la forme de la moyenne quadratique des RMSE ($RMSE_{Moy}$, cf. équation (8.16)) prenant en compte $RMSE_{T_3}$, $RMSE_{T_4}$ et $RMSE_{T_{sor}}$:

$$RMSE_{Moy} = \sqrt{\frac{RMSE_{T_3}^2 + RMSE_{T_4}^2 + RMSE_{T_{sor}}^2}{3}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (8.16)$$

Les valeurs de cet indicateur sont indiquées dans le Tableau 8.3. La seconde approche consiste à effectuer un processus de calibration minimisant $RMSE_{Moy}$. La période de simulation et les différents ordres de paramètres sont les mêmes que lors de la calibration minimisant $RMSE_{T_{sor}}$. Les valeurs numériques des paramètres issues de ce second processus de calibration sont présentées dans le Tableau 8.4.

TABLEAU 8.4 – Résultats du processus de calibration du système de stockage minimisant $RMSE_{Moy}$

Paramètre	Ordre 1	Ordre 2	Ordre 3	Ordre 4	Ordre 5	Ordre 6	Ordre 7	Ordre 8	Ordre 9	Ordre 10
$c_{p,roc}$	900	900	900	900	850	900	850	900	900	900
ε_{lit}	0,40	0,45	0,45	0,45	0,40	0,45	0,40	0,40	0,45	0,40
$H_{RocAirFor}$	45	50	50	60	45	60	45	45	60	55
$H_{RocAirNat}$	2	2	2	4	2	4	2	2	4	4
q_v	800	750	750	750	750	750	750	800	750	800
A_{roc}	60	50	50	40	60	40	60	60	40	50
$RMSE_{T_{sor}}$	1,47	1,51	1,51	1,50	1,47	1,50	1,47	1,47	1,50	1,47
$RMSE_{T_3}$	1,08	1,07	1,07	1,07	1,08	1,07	1,08	1,08	1,07	1,08
$RMSE_{T_4}$	1,55	1,52	1,52	1,53	1,55	1,53	1,55	1,55	1,53	1,55
$RMSE_{Moy}$	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38

La Figure 8.4 présente les nouvelles valeurs minimales et maximales obtenues pour T_{sor} , T_3 et T_4 , tout ordre confondu.

L'analyse combinée de la Figure 8.4 et des indicateurs du Tableau 8.4 nous montre que les performances du modèle ont été améliorées pour la simulation de la température interne du stock (T_3 et T_4) mais qu'elles ont été dégradées en ce qui concerne la température de sortie. Effectivement, $RMSE_{T_{sor}}$ a augmenté de $0,78^\circ\text{C}$ entre les deux calibrations tandis que $RMSE_{T_3}$ et $RMSE_{T_4}$ ont diminués de respectivement $1,00^\circ\text{C}$ et $1,18^\circ\text{C}$. Par ailleurs, $RMSE_{Moy}$ est passé de $2,02^\circ\text{C}$ à $1,38^\circ\text{C}$ (en moyenne sur les dix ordres), enregistrant ainsi une baisse de $0,64^\circ\text{C}$. En outre, le calcul des MPE donne : $2,3\% \leq MPE_{T_{sor}} \leq 4,1\%$, $3,0\% \leq MPE_{T_3} \leq 4,5\%$ et $3,7\% \leq MPE_{T_4} \leq 4,7\%$. Si la variation de $MPE_{T_{sor}}$ est cohérente avec l'analyse des autres indicateurs (dégradation de T_{sor}^{sim} et augmentation de $MPE_{T_{sor}}$), l'inverse se produit pour T_3 et T_4 . En effet, nous avons vu que la minimisation de $RMSE_{Moy}$ avait conduit à de meilleurs résultats pour la température des roches mais MPE_{T_3} et MPE_{T_4} ont augmentés. Cependant, cette augmentation ne traduit pas une dégradation des solutions mais le fait que les surestimations compensent moins bien les sous-estimations. On peut voir que T_3^{sim} et T_4^{sim} ont plutôt tendance à sous-estimer les mesures sur la Figure 8.4 alors que les températures simulées étaient réparties plus équitablement entre sous-estimations et surestimations

sur la Figure 8.3. Ce phénomène nous conforte dans le choix d'un indicateur n'étant pas soumis à l'effet d'annulation tel que le RMSE.

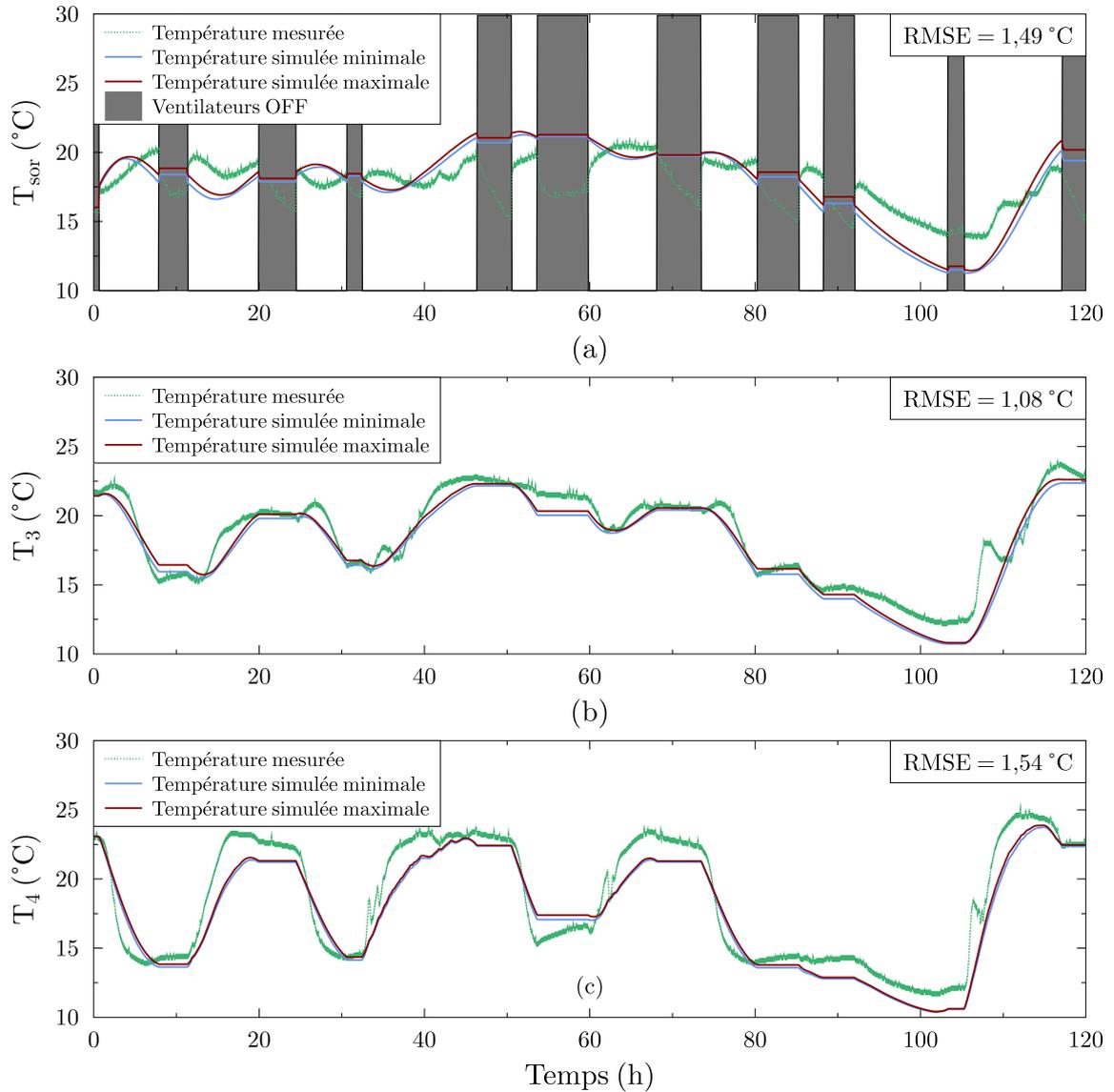


FIGURE 8.4 – Résultats de la simulation du comportement thermique du système de stockage (minimisation de $RMSE_{Moy}$)

Conclusion

Cette partie a présenté l'aspect numérique de ce travail de thèse. Dans un premier temps, le modèle du comportement thermique de la serre de Kuujuaq a été exposé. Le choix d'un modèle nodal par rapport à un modèle CFD a été justifié par le besoin d'avoir un modèle peu coûteux en temps et ressources de calcul afin de pouvoir ultérieurement simuler le climat intérieur sous serre sur des périodes de plusieurs mois correspondant au moins à la durée de la saison de culture. Les bilans d'énergie et de masse donnant les équations différentielles régissant l'évolution temporelle des températures des différents nœuds ont ainsi été présentés, ainsi que les flux intervenant dans ces équations. L'implémentation numérique du modèle a été effectuée à l'aide du logiciel OpenModelica utilisant le langage de modélisation multi-physique Modelica. Une première simulation nous a permis de nous rendre compte que la température simulée pouvait être assez éloignée de la température mesurée.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressé aux valeurs numériques des paramètres utilisés au sein du modèle. En effet, 17 paramètres ont été identifiés comme ayant une valeur inconnue. Une étude bibliographique nous a tout d'abord permis de borner les valeurs de ces paramètres afin d'appliquer un processus de calibration permettant d'obtenir les valeurs des paramètres minimisant l'erreur entre la simulation et la mesure. Après avoir justifié le choix du RMSE en tant qu'indicateur de performance, l'écriture d'un algorithme de calibration se basant sur une méthode existante a été proposée. Il s'agit d'une succession de minimisations monodimensionnelles (i.e. sur un paramètre à la fois). La mise en œuvre de cet algorithme s'est faite à travers le développement d'un outil numérique écrit en langage Python permettant d'automatiser le processus de calibration. Les résultats obtenus montre une réelle amélioration de la température de l'air simulée, puisque le RMSE est passé de 3,55 °C à 1,53 °C, validant ainsi le modèle de serre. Par ailleurs, la discussion sur les résultats montre d'une part que l'ordre dans lequel on effectue les minimisations a très peu d'impact sur la performance finale du modèle et d'autre part que certains paramètres ont peu d'intérêt à être soumis à un processus de calibration. Par exemple, quand un produit de paramètres (e.g. $\rho \times c_p$) intervient dans une seule équation, il suffit de calibrer un seul des deux paramètres.

Le dernier chapitre de cette partie s'est focalisée sur la modélisation du système de stockage. Il s'agit du modèle de Schumann, un modèle biphasique, à une dimension et indépendant du modèle de la serre. Les hypothèses permettant d'utiliser ce modèle ont été justifiées et les équations ont été exposées. Ensuite, le même processus de calibration que celui utilisé pour le modèle de serre a été appliqué afin de déterminer les valeurs inconnues des paramètres. Deux approches ont été examinées : l'une consistant à minimiser l'erreur sur la température de sortie, l'autre étant de minimiser un indicateur composite prenant en compte la température de sortie et la température interne du lit de roches. Les résultats confirment que l'ordre dans lequel on calibre les paramètres n'influe pas les résultats. Le couplage des modèles de serre et de stockage permettant l'étude paramétrique des lits de roches constitue une des perspectives de ce travail de thèse, détaillées dans la conclusion générale.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif principal de la thèse, réalisée au LaTEP dans le cadre du projet de l'OHMI Nunavik, était d'étudier les serres nordiques d'un point de vue énergétique (et notamment thermique) afin d'évaluer les performances de ces dernières et de proposer des solutions permettant d'améliorer le comportement thermique des serres le cas échéant.

La première partie de ce manuscrit s'est attachée à faire un état des lieux de la serri-culture nordique. Ainsi, le premier chapitre a permis de se familiariser avec les serres en présentant leur utilité, leur fonctionnement climatique général, leurs différentes géométries ainsi que les principaux matériaux utilisés pour l'enveloppe des serres. Le deuxième chapitre s'est focalisé sur les serres existantes d'Amérique du Nord situées au-dessus du 50^e parallèle (Canada et Alaska). Une vingtaine de serres ont été recensées, classées par type (serres communautaires, commerciales ou de recherche) et leurs caractéristiques, notamment énergétique, ont été présentées. L'analyse de ces serres montre qu'il existe des disparités selon le type. Si les serres commerciales ont une saison de culture plutôt longue (entre 7 et 12 mois) grâce à des systèmes de chauffage ou de stockage de la chaleur, ce n'est pas le cas des serres communautaires. En effet, la plupart d'entre elles ne sont pas adaptées au climat froid, notamment à cause du manque de recherche scientifique et de données sur le sujet. Cela se traduit par une géométrie « standard » (quonset ou even-span) et peu de moyens de stockage ou de chauffage, menant à des saisons de culture courtes (entre 4 et 6 mois). Or, l'exemple de la serre communautaire d'Invermere montre qu'il est possible d'avoir une serre adaptée au climat froid grâce à la géométrie chinoise (mur nord isolé et pouvant servir de stock thermique journalier) et à un stockage saisonnier de l'énergie. Ce constat sur les serres nordiques nous a permis de dégager deux axes de travail : d'une part l'amélioration du comportement thermique de serres existantes dont on ne peut pas changer la géométrie, et d'autre part l'amélioration de la phase de conception de ces serres. Le premier axe est traité dans la deuxième partie du manuscrit qui expose l'approche expérimental de ce travail tandis que les bases permettant de répondre au second axe sont présentées dans la troisième partie développant l'aspect numérique de cette thèse sous la forme d'un travail de modélisation.

La deuxième partie de ce travail de recherche s'est donc concentrée sur une serre

existante : celle de Kuujjuaq, la capitale régionale du Nunavik, territoire septentrional du Québec. La première étape a été la mise en place d'une campagne d'instrumentation permettant la collecte de données (température et humidité intérieures et extérieures, irradiance solaire extérieure). L'analyse de ces données présentée dans le troisième chapitre a permis de mettre en évidence un écart important entre les températures intérieures diurnes et nocturnes soulevant ainsi deux problématiques. D'une part, cette grande amplitude thermique est un frein à l'extension de la saison de culture : bien que les températures diurnes soient propices à la serriculture avant le début de la saison de culture (début mai), les températures nocturnes peuvent encore être légèrement négatives, risquant ainsi de tuer les plantes. D'autre part, cet écart thermique entre le jour et la nuit est un facteur de stress important pour les cultures, pouvant entraver leur croissance ou leur floraison durant la saison de culture. Ce constat a mené le comité des serres de Kuujjuaq, l'administration locale (ARK) et la mairie (VN de Kuujjuaq) à nous associer à un projet de système de stockage thermique air/roches financé par la Société du Plan Nord, en nous en déléguant la conception et le dimensionnement. La construction de ce système a fait l'objet d'une campagne de terrain de 2 mois en octobre 2018, décrite dans le chapitre 4, permettant de superviser les travaux et d'instrumenter un caisson de roches. Un second terrain de recherche en mai 2019 a servi à mettre en place de nouveaux capteurs (anémomètre, état d'ouverture du toit, état des ventilateurs –marche/arrêt–) ainsi qu'un nouveau système d'acquisition basé sur des technologies open-source à bas coût (Raspberry et Arduino) permettant d'accéder aux données à distance. Par ailleurs, ce terrain a permis de mettre en service le système de stockage. L'étude de l'impact de l'installation de ce système sur le comportement thermique de la serre est présentée dans le cinquième chapitre. Cette analyse montre que le système de stockage permet de gagner entre 5 et 7 °C sur la température nocturne intérieur par rapport à une période sans stock ayant les mêmes conditions climatiques extérieures. Par ailleurs, les bilans énergétiques montrent d'une part que le système peut stocker l'énergie sur plusieurs semaines et d'autre part qu'il peut fournir jusqu'à trois fois plus d'énergie thermique qu'il n'utilise d'énergie électrique pour stocker et déstocker la chaleur.

Finalement, la troisième partie de cette thèse s'est tournée vers la modélisation de la serre et du système de stockage. Le sixième chapitre de ce manuscrit présente le modèle numérique du comportement thermique de la serre sans système de stockage. Dans un premier temps, le choix d'un modèle nodal a été justifié et les bilans d'énergie et de masse menant aux équations différentielles gouvernant l'évolution temporelle de la température des différents volumes de contrôle (enveloppe, air intérieur, canopée, sol) ont été exposés. Ensuite, les expressions des différents flux thermiques et massiques ont été explicités et les sous-modèles de rayonnement solaire et de conduction du sol ont été développés. Ce chapitre se conclut sur l'implémentation numérique du modèle

à l'aide du langage de modélisation multi-physique « Modelica » et sur un premier test de simulation montrant une sous-évaluation de la température intérieure par le modèle. Le chapitre 7 aborde alors une réflexion autour des valeurs numériques des paramètres utilisées lors de la simulation. En effet, nous avons recensé 17 paramètres ayant des valeurs inconnues et donc estimées à partir de la littérature scientifique. Cependant, une revue bibliographique a montré que plusieurs valeurs étaient possibles menant à une plage de variation pour chaque paramètre. Afin d'améliorer les performances du modèle, un indicateur (le RMSE) permettant de quantifier l'erreur entre la simulation et le modèle a été choisi et défini et un processus de calibration a été développé en se basant sur des méthodes existantes. Ce processus consiste en une succession de minimisation du RMSE sur chaque paramètre dans un ordre aléatoire. Les résultats montrent que l'ordre des paramètres dans lequel on effectue la calibration n'a pas d'importance. Par ailleurs, la simulation effectuée avec les valeurs calibrées des paramètres montre une nette amélioration des résultats, validant ainsi le modèle de serre. Enfin, le huitième et dernier chapitre de ce manuscrit présente le modèle du système de stockage thermique seul. De manière analogue aux deux chapitres précédents, le modèle choisi est justifié et exposé et les valeurs des paramètres sont calibrées. Les résultats confirment que l'ordre de calibration a très peu d'impact sur la performance du modèle et deux indicateurs différents sont comparés. La simulation numérique du comportement thermique du système de stockage montre un bon accord avec les données expérimentales.

Plusieurs perspectives à ce travail de thèse peuvent être envisagées. Tout d'abord, le couplage des modèles de serre et de stockage permettant de simuler le comportement thermique de la serre avec les lits de roches constitue une première piste de poursuite de ce travail. En effet, valider un modèle couplé permettrait d'effectuer une étude paramétrique du système de stockage afin d'en déterminer les caractéristiques optimales. Cependant, modéliser la serre avec le système de stockage nécessite de prendre en compte le stockage passif (dalle de béton et roches dans les gabions). Ainsi, le volume et la surface des roches dans les gabions dont la taille varie entre 5 et 30 cm devront être estimés, menant à une nouvelle étape de calibration. De plus, il serait essentiel de modifier les modèles de sol et de stockage pour intégrer l'échange de chaleur entre ces deux systèmes. Par ailleurs, le couplage entre les deux modèles permettrait de continuer à étudier le choix de l'indicateur du modèle de stockage afin de déterminer si l'un est plus pertinent que l'autre et d'optimiser le système de contrôle-commande des ventilateurs, par exemple en simulant des températures seuils de déclenchement des ventilateurs prenant en compte la température des roches. En outre, un modèle complet de la serre intégrant les systèmes actif et passif de stockage offrirait la possibilité d'étudier les serres chinoises intégrant un mur nord inertiel stockant la chaleur.

Une autre perspective numérique de ce travail serait de modifier le modèle de serre afin de prendre en compte la position du soleil au cours du jour et de l'année. Cela permettrait de quantifier les avantages d'une géométrie par rapport à une autre et de déterminer l'orientation optimale en fonction de la latitude, aidant ainsi à optimiser la conception de serre nordique.

D'un point de vue expérimental, d'autres perspectives peuvent être soulevées. Premièrement l'étude de l'impact du stock sur le début de la saison de culture serait très intéressante. Effectivement, le système de stockage a été mis en fonctionnement à la fin de mai 2019, et la situation sanitaire mondiale n'a pas permis de faire fonctionner la serre au début du mois de mai 2020. Il serait donc utile de quantifier l'allongement de la saison de culture grâce au stock en analysant le comportement thermique de la serre et du système de stockage avant le début de la saison de culture.

Enfin, nous avons vu que l'électricité à Kuujuaq était produite à partir de diesel. Afin de réduire au maximum la consommation d'énergie fossile, l'installation de panneaux photovoltaïque (PV) couplés à une solution de stockage électrique peut-être envisagée. Le couplage du système de stockage à un système de collecteurs solaires thermiques à air augmenterait également les performances du stock. Cependant il est primordial d'étudier ces solutions (PV et thermique) à l'aide de la modélisation. En effet, l'installation de panneaux solaire sur la serre réduirait le rayonnement solaire à l'intérieur de celle-ci, limitant la luminosité et la chaleur apportées aux plantes. La simulation de ces solutions permettrait alors de trouver le meilleur compromis entre différentes configurations.

Bibliographie

- [1] <https://www.driihm.fr/>. Consulté le 05/01/2021.
- [2] <https://ohmi-nunavik.in2p3.fr/>. Consulté le 20/01/2021.
- [3] <https://www.ohm-provence.org/>. Consulté le 20/01/2021.
- [4] <https://ohm-oyapock.in2p3.fr/>. Consulté le 20/01/2021.
- [5] A. Lamalice, D. Hailot, M.-A. Lamontagne, T. M. Herrmann, S. Gibout, S. Blangy, J.-. Martin, V. Coxam, J. Arsenault, L. Munro, and F. Courchesne. Building food security in the Canadian Arctic through the development of sustainable community greenhouses and gardening. *Écoscience*, 0(0) :1–17, July 2018.
- [6] <http://tpeigloos.eklablog.com/i-l-igloo-face-au-climat-p1341224>. Consulté le 25/03/2021.
- [7] https://plannord.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2015/04/Synthese_PN_FR.pdf. Consulté le 21/01/2021.
- [8] Benjamin Morille. *Élaboration d'un modèle du climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serres : analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques*. PhD thesis, Agrocampus-Centre d'Angers, 2012.
- [9] Sylvan H. Wittwer and Nicolas Castilla. Protected Cultivation of Horticultural Crops Worldwide. *HortTechnology*, 5(1) :6–23, January 1995.
- [10] Nicolás Castilla. *Greenhouse technology and management*. CABI, Wallingford, Oxfordshire, UK ; Cambridge, MA, 2nd edition, 2013.
- [11] Christian von Zabeltitz. *Integrated greenhouse systems for mild climates : climate conditions, design, construction, maintenance, climate control*. Springer, Heidelberg ; New York, 2011. OCLC : ocn648933161.
- [12] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:5_Bay_Multispan.jpg. Consulté le 03/07/2020.
- [13] V.P. Sethi. On the selection of shape and orientation of a greenhouse : Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1) :21–38, January 2009.

- [14] R.A. Bucklin, P.A. Fowler, V.Y. Rygalov, R.M. Wheeler, Y. Mu, I. Hublitz, and E.G. Wilkerson. Greenhouse Design for the Mars Environment : Development of a prototype, Deployable Dome. *Acta Horticulturae*, 659 :127–134, November 2004.
- [15] <https://www.greeniglu.com/growing-dome>. Consulté le 02/07/2020.
- [16] Guohong Tong, David M. Christopher, Tianlai Li, and Tieliang Wang. Passive solar energy utilization : A review of cross-section building parameter selection for Chinese solar greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26 :540–548, October 2013.
- [17] G. Tong, D. M. Christopher, and B. Li. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1) :129–139, August 2009.
- [18] Kai Cao, Hongjun Xu, Rong Zhang, Dawei Xu, Lulu Yan, Yachen Sun, Liru Xia, Jiantao Zhao, Zhirong Zou, and Encai Bao. Renewable and sustainable strategies for improving the thermal environment of Chinese solar greenhouses. *Energy and Buildings*, 202 :109414, November 2019.
- [19] Fátima de Jesus Folgôa Baptista. *Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting Botrytis cinerea infection*. PhD Thesis, Universidade de Evora (Portugal), 2007.
- [20] Lucas McCartney and Mark Lefsrud. Protected Agriculture in Extreme Environments : A Review of Controlled Environment Agriculture in Tropical, Arid, Polar, and Urban Locations. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(2) :455–473, 2018.
- [21] E Beshada, Q Zhang, and R Boris. Performance of a Solar Greenhouse under Manitoba’s Winter Weather Conditions. page 8, Winnipeg, Manitoba, June 2005.
- [22] A. Bouhdjar, M. Belhamel, F. E. Belkhiri, and A. Boulbina. Performance of sensible heat storage in a rockbed used in a tunnel greenhouse. *Renewable Energy*, 9(1) :724–728, September 1996.
- [23] Ahmet Kürklü, Sefai Bilgin, and Burhan Özkan. A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renewable Energy*, 28(5) :683–697, April 2003.
- [24] A. Bazgaou, H. Fatnassi, R. Bouhroud, L. Gourdo, K. Ezzaeri, R. Tiskatine, H. Demrati, A. Wifaya, A. Bekkaoui, A. Aharoune, and L. Bouirden. An experimental study on the effect of a rock-bed heating system on the microclimate and the crop development under canarian greenhouse. *Solar Energy*, 176 :42–50, December 2018.

- [25] L. Gourdo, H. Fatnassi, R. Tiskatine, A. Wifaya, H. Demrati, A. Aharoune, and L. Bouriden. Solar energy storing rock-bed to heat an agricultural greenhouse. *Energy*, 169 :206–212, February 2019.
- [26] P. Henshaw. Modelling changes to an unheated greenhouse in the Canadian subarctic to lengthen the growing season. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 24 :31–38, December 2017.
- [27] T. Allen. Costs and Benefits of a Northern Greenhouse. In *Proceedings of the 8th Circumpolar Agricultural Conference & Inaugural University of the Arctic Food Summit*, pages 58–63, Girwood, Alaska, USA, 2013. Alaska Agricultural & Forestry Experiment Station.
- [28] E. Avard. *Northern Greenhouses : An Alternative Local Food Provisioning Strategy for Nunavik*. PhD thesis, Université Laval (Québec), 2015.
- [29] Understanding sustainable northern greenhouse technologies for creating economic development opportunities and supporting food security. Technical report, Agriteam Canada Consulting LTD., June 2013.
- [30] <https://sybaritica.me/2012/06/14/nunavut-the-iquait-community-greenhouse/>. Consulté le 02/09/2018.
- [31] <https://iquaitgreenhouse.com/tag/volunteer/page/2/>. Consulté le 02/09/2018.
- [32] <https://iquaitgreenhouse.com/about/>. Consulté le 10/10/2017.
- [33] <https://iquaitgreenhouse.com/faqs/#5>. Consulté le 10/10/2017.
- [34] <http://findingtruenorth.ca/blog/iquait-community-greenhouse>. Consulté le 30/08/2018.
- [35] http://nunatsiaq.com/stories/article/65674iquait_greenhouse_society_ponders_big_expansion/. Consulté le 30/08/2018.
- [36] <https://www.inuivikarcticenergy.com/?lightbox=i11mk4>. Consulté le 05/09/2018.
- [37] <https://www.inuivikgreenhouse.com/store-swawg/>. Consulté le 01/09/2018.
- [38] https://www.inuivikgreenhouse.com/wp-content/uploads/2017/05/CGSI_Business_Plan_2015-2017.pdf. Consulté le 15/10/2017.
- [39] https://www.ryerson.ca/carrotcity/board_pages/community/inuivik.html. Consulté le 01/09/2018.
- [40] <http://findingtruenorth.ca/blog/iquait-community-greenhouse>. Consulté le 01/09/2018.
- [41] <https://inuivikgreenhouse.com/wp-content/uploads/2018/03/2018-GH-Membership-Booklet-Final.pdf>. Consulté le 15/10/2017.

- [42] K. Skinner, R. M. Hanning, J. Metatawabin, and L. J. S. Tsuji. Implementation of a community greenhouse in a remote, sub-Arctic First Nations community in Ontario, Canada : a descriptive case study. *Rural and Remote Health*, 14(2) :2545, 2014.
- [43] <http://www.onexone.org/blog/2015/01/29/fort-albany-fight-against-food-insecurity/>. Consulté le 10/09/2018.
- [44] <http://nftinwt.com/about/>. Consulté le 26/04/2019.
- [45] Ben Mogl-MacLean employé du NFTI. Communication personnelle du 07/03/2019.
- [46] <https://www.smallfarmacademy.com/passive-solar-greenhouse-case-study-package>. Consulté le 05/07/2018.
- [47] <https://groundswellnetwork.ca/community-greenhouse/>. Consulté le 05/07/2018.
- [48] <https://www.greenenergyfutures.ca/episode/73-passive-solar-greenhouses>. Consulté le 10/09/2019.
- [49] https://www.huffingtonpost.ca/david-dodge/greenhouse-gases_b_5227446.html. Consulté le 05/07/2018.
- [50] <https://vergepermaculture.ca/2016/06/29/storing-heat-underground-in-a-geosolar-system/>. Consulté le 05/07/2018.
- [51] <https://www.youtube.com/watch?v=OkLaytBsE3s>. Consulté le 05/07/2018.
- [52] <https://cbpp-pcpe.phac-aspc.gc.ca/fr/aboriginalwtt/little-salmon-carmacks-first-nation-greenhouse-farm-yk/>. Consulté le 10/07/2020.
- [53] <https://nunatsiaq.com/stories/article/a-new-place-for-food-waste/>. Consulté le 05/07/2020.
- [54] <https://www.grownorth.ca/>. Consulté le 05/11/2017.
- [55] <https://www.greeniglu.com/>. Consulté le 07/07/2020.
- [56] Benjamin Canning, cofondateur de growing north. Communication personnelle du 02/11/2017.
- [57] https://motherboard.vice.com/en_us/article/ywg7kj/greenhouses-in-the-arctic-will-reduce-food-insecurity-in-canadas-north. Consulté le 01/09/2018.
- [58] <https://www.greenhousecanada.com/cold-growth-in-northern-climates-32606/>. Consulté le 15/09/2018.
- [59] Growing fresh vegetables : Midnight sunlight & the Earth's warmth. https://www.uaf.edu/files/snre/MP_09_10.pdf. Consulté le 04/09/2018.

- [60] <https://www.greenhousecanada.com/energy/alternative-fuels/100-per-cent-renewably-powered-geothermal-alaskan-greenhouse-again-showcased-at-energy-fair-20227>. Consulté le 05/09/2018.
- [61] <https://www.spaindex.com/listings/chena-hot-springs-resort-alaska/>. Consulté le 05/09/2018.
- [62] Case study : Chena Hot Springs. <http://www.uaf.edu/files/acep/greenhouseenergy.pdf>. Consulté le 04/09/2018.
- [63] <https://chenahotsprings.com/chenagreenhouse/>. Consulté le 03/09/2018.
- [64] CCHRC. Biomass-heated greenhouses. Technical report, Alaska Energy Authority, March 2017.
- [65] <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/referentiels-combustibles-bois-energie-definition-exigences-200804.pdf>. Consulté le 03/12/2018.
- [66] <http://www.paysdelaloire.ademe.fr/sites/default/files/files/ADEME%20en%20Pays%20de%20la%20Loire/Domains%20d%27intervention/Energies%20et%20mati%C3%A8res%20renouvelables/T%C3%A9l%C3%A9chargements/comment%20choisir%20bois%20buche.pdf>. Consulté le 03/12/2018.
- [67] <http://www.fao.org/teca/new-search-result/technology-detail/en/?uid=8644>. Consulté le 26/08/2020.
- [68] <http://www.twinsistersnursery.com/about/key-benefits-of-ecological-restoration>. Consulté le 14/09/2018.
- [69] <http://www.twinsistersnursery.com/about/our-facilities>. Consulté le 14/09/2018.
- [70] J. Svoboda, B.M Bergsma, J.A. McCurdy, M.J. Romer, and W.R. Cummins. Experimental Horticultural Projects in the Canadian Low and High Arctic in the Early 1980s : What Did We Learn ? In *Proceedings of the 8th Circumpolar Agricultural Conference & Inaugural University of the Arctic Food Summit*, pages 98–111, Girwood, Alaska, USA, September 2013. Alaska Agricultural & Forestry Experiment Station.
- [71] https://www.hydro.mb.ca/francais/corporate/about_us.shtml. Consulté le 03/09/2018.
- [72] Manitoba Hydro. Profiles in R&D Applied Research and Development that serves society today and tomorrow. Solar Energy Greenhouses Update, Octobre 2006. Consulté le 04/09/2018. https://www.builditsolar.com/Projects/Sunspace/ManitobaGH/solar_energy_greenhouses.pdf.
- [73] E Beshada, Q Zhang, and R Boris. Winter performance of a solar energy greenhouse in southern Manitoba. *Canadian Biosystems Engineering*, 48 :8, 2006.

- [74] Md. Shamim Ahamed, Huiqing Guo, and Karen Tanino. Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese-style solar greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150 :235–244, July 2018.
- [75] Richard Giroux, Alain Berinstain, Stephen Braham, Thomas Graham, Matthew Bamsey, Keegan Boyd, Matthew Silver, Alexis Lussier-Desbiens, Pascal Lee, Marc Boucher, Keith Cowing, and Michael Dixon. Greenhouses in extreme environments : The Arthur Clarke Mars Greenhouse design and operation overview. *Advances in Space Research*, 38(6) :1248–1259, January 2006.
- [76] <http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=9721>. Consulté le 10/09/2018.
- [77] M. Bamsey, A. Berinstain, T. Graham, P. Neron, R. Giroux, S. Braham, R. Ferl, A. L. Paul, and M. Dixon. Developing strategies for automated remote plant production systems : Environmental control and monitoring of the Arthur Clarke Mars Greenhouse in the Canadian High Arctic. *Advances in Space Research*, 44(12) :1367–1381, December 2009.
- [78] <https://www.yukoncollege.yk.ca/innovation/cold-climate-innovation>. Consulté le 04/12/2018.
- [79] <https://www.yukoncollege.yk.ca/innovation/projects/greenhouse-kits>. Consulté le 03/12/2018.
- [80] <https://solargrowing.weebly.com/>. Consulté le 03/12/2018.
- [81] Nicolas Fabien-Ouellet, Dzuy-Tam Tran, and Misha Shodjaee-Zrudlo. Canadian Integrated Northern Greenhouse for National Food Security. Technical report, Université McGill, Montréal, Canada, December 2013.
- [82] http://etab.ac-poitiers.fr/lycee-hotelier-la-rochelle/IMG/pdf/Grammage_4.pdf. Consulté le 13/09/2018.
- [83] Charlotte Curtis, David Ledderhof, Ashley McCarl, and Ainsley McPherson. Arctic Salad : Design for the Production of Vegetables in Arviat, Nunavut. *Proceedings of the ENGG 3100 : Design III projects*, page 2, 2007.
- [84] Marcy Mahr, Jeff Pilsner, Ana Bockstrom, Mick Wilson, and George Meier. North Slovan Community Greenhouse Feasibility Study. Technical report, October 2010.
- [85] http://www.omafra.gov.on.ca/CropOp/fr/spec_veg/brassicas/bokc.html. Consulté le 10/12/2018.
- [86] http://www.omafra.gov.on.ca/CropOp/fr/spec_veg/cucurbits/orcuc.html. Consulté le 10/12/2018.
- [87] http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/monthly_data_f.html?hlyRange=2004-12-16%7C2018-12-05&dlyRange=2004-05-25%7C2018-12-04&mlyRange=

- 2005-03-01%7C2007-11-01&StationID=42503&Prov=NU&urlExtension=_f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2018&selRowPerPage=25&Line=3&searchMethod=contains&Month=12&Day=5&txtStationName=Iqaluit&timeframe=3&Year=2007. Consulté le 10/09/2018.
- [88] http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/monthly_data_f.html?hlyRange=2003-08-07%7C2018-12-05&dlyRange=2003-08-01%7C2018-12-04&mlyRange=2003-08-01%7C2007-11-01&StationID=41883&Prov=NT&urlExtension=_f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2018&selRowPerPage=25&Line=4&searchMethod=contains&Month=12&Day=5&txtStationName=Inuvik&timeframe=3&Year=2007. Consulté le 10/09/2018.
- [89] <https://fr.climate-data.org/amerique-du-nord/canada/colombie-britannique/invermere-11589/>. Consulté le 05/07/2018.
- [90] <https://fr.climate-data.org/amerique-du-nord/canada/quebec/kuujjuaq-718971/>. Consulté le 05/07/2018.
- [91] <https://www.kippzonen.com/Product/117/CMP3-Pyranometre>. Consulté le 10/06/2020.
- [92] <https://www.conrad.fr/p/enregistreur-de-donnees-multifonctions-voltcraft-dl-121th-dl-121th-valeur-de-mesure-temperature-humidite-de-lair-40-105057>. Consulté le 10/06/2020.
- [93] M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon. Updated world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5) :1633–1644, 2007.
- [94] Bram Henricus Emanuel Vanthoor. *A model-based greenhouse design method*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, June 2011.
- [95] https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?searchType=stnName&txtStationName=kuujjuaq&searchMethod=contains&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=6095&dispBack=1. Consulté le 20/02/2020.
- [96] Paul Piché, Didier Haillet, Stéphane Gibout, Cédric Arrabie, Marc-André Lamontagne, Véronique Gilbert, and Jean-Pierre Bédécarrats. Design, construction and analysis of a thermal energy storage system adapted to greenhouse cultivation in isolated northern communities. *Solar Energy*, 204 :90–105, July 2020.
- [97] Guruprasad Alva, Lingkun Liu, Xiang Huang, and Guiyin Fang. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68 :693–706, February 2017.

- [98] M. Taki, A. Rohani, and M. Rahmati-Joneidabad. Solar thermal simulation and applications in greenhouse. *Information Processing in Agriculture*, November 2017.
- [99] M. Santamouris, C.A. Balaras, E. Dascalaki, and M. Vallindras. Passive solar agricultural greenhouses : A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, 53(5) :411–426, November 1994.
- [100] Thibaut Esence, Arnaud Bruch, Sophie Molina, Benoit Stutz, and Jean-François Fourmigué. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 153 :628–654, September 2017.
- [101] D.P. Muniak. *Regulation Fixtures in Hydronic Heating Installations : Types, Structures, Characteristics and Applications*. Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing, 2018.
- [102] Ion Paraschivoiu, Michel Prud’homme, Luc Robillard, and Patrick Vasseur. *Mécanique des fluides*. Presses internationales polytechniques, Montréal, 2003.
- [103] I.E. Idel’cik. *Mémento des pertes de charge, coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement*. Eyrolles, 3ème edition, 1986.
- [104] <http://vortexpowerfans.com/vtx-series>. Consulté le 15/07/2018.
- [105] K.V. Garzoli. Design of rock piles for greenhouse energy storage. *Acta Horticulturae*, 257 :21–28, December 1989.
- [106] Richard C Dorf. *CRC handbook of engineering tables*. CRC Press, 2003.
- [107] Arnold S. Berger. 11 - serial communication systems. In Arnold S. Berger, editor, *Debugging Embedded and Real-Time Systems*, pages 239 – 256. Newnes, 2020.
- [108] <https://www.eplastics.com/pdf/Thermoclear-DATA-SHEET.pdf>. Consulté le 15/09/2018.
- [109] Frédéric Brassard, conseiller aux relations autochtones, Hydro-Québec. Communication personnelle du 31/01/20.
- [110] <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20170823-17047-04735>. Consulté le 31/01/2020.
- [111] https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf. Consulté le 31/01/2020.
- [112] J.C. Roy, T. Boulard, C. Kittas, and S. Wang. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1 : the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, 83(1) :1–20, September 2002.

-
- [113] T. Boulard, C. Kittas, J.C. Roy, and S. Wang. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 2 : determination of the distributed greenhouse climate. *Biosystems Engineering*, 83(2) :129–147, 2002.
- [114] Homa Esmaeli and Ramin Roshandel. Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions. *Renewable Energy*, 145 :1255–1265, January 2020.
- [115] Rim Ben Ali, Salwa Bouadila, and Abdelkader Mami. Experimental validation of the dynamic thermal behavior of two types of agricultural greenhouses in the Mediterranean context. *Renewable Energy*, 147 :118–129, March 2020.
- [116] E. Mashonjowa, F. Ronsse, J.R. Milford, and J.G. Pieters. Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model. *Solar Energy*, 91 :381–393, May 2013.
- [117] V. P. Sethi and S. K. Sharma. Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system. *Solar Energy*, 81(6) :723–741, June 2007.
- [118] Naijun Zhou, Yaxiong Yu, Jinping Yi, and Rui Liu. A study on thermal calculation method for a plastic greenhouse with solar energy storage and heating. *Solar Energy*, 142 :39–48, January 2017.
- [119] Alessandro Deiana, Enrico Fabrizio, and Raffaella Gerboni. Energy performance optimization of typical Chinese solar greenhouses by means of dynamic simulation. In *Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich*, page 9, Zurich, July 2014.
- [120] T. Boulard and S. Wang. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34(1-3) :173–190, May 2002.
- [121] Rack-woo Kim, Se-woon Hong, In-bok Lee, and Kyeong-seok Kwon. Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 2 : Application of the CFD model. *Biosystems Engineering*, 164 :257–280, December 2017.
- [122] Edwin A. Villagrán, Esteban J. Baeza Romero, and Carlos R. Bojacá. Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate. *Biosystems Engineering*, 188 :288–304, December 2019.
- [123] R. Nebbali, J.C. Roy, and T. Boulard. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renewable Energy*, 43 :111–129, July 2012.
- [124] H. F. de Zwart. *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 1996. OCLC : 35779519.

- [125] <https://www.math.univ-toulouse.fr/~jbhu/Ellipses.pdf>. Consulté le 15/03/2021.
- [126] Mottus Matti, Sulev Madis, Frederic Baret, Lopez-Lozano Raoul, and Anu Reinart. Photosynthetically Active Radiation : Measurement and Modeling. In *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, pages 7970–8000. Springer, January 2011.
- [127] John Lennox Monteith and M. H. Unsworth. *Principles of environmental physics : plants, animals, and the atmosphere*. Elsevier/Academic Press, Amsterdam ; Boston, 4th ed edition, 2013. OCLC : ocn858967864.
- [128] Cecilia Stanghellini. *Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management*. PhD thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, June 1987.
- [129] Khalid A. Joudi and Ammar A. Farhan. A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 91 :76–82, February 2015.
- [130] T.L. Bergman, F.P. Incropera, D.P. DeWitt, and A.S. Lavine. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2011.
- [131] Luca Evangelisti, Claudia Guattari, and Francesco Asdrubali. On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance : A critical review. *Energy and Buildings*, 183 :607–625, January 2019.
- [132] Sami Niemelä, Petri Räisänen, and Hannu Savijärvi. Comparison of surface radiative flux parameterizations : Part I : Longwave radiation. *Atmospheric Research*, 58(1) :1–18, June 2001.
- [133] https://doc.modelica.org/Modelica%203.2.3/Resources/helpDymola/Modelica_Media_Air_MoistAir.html#Modelica.Media.Air.MoistAir.saturationPressure. Consulté le 18/03/2021.
- [134] A. Saul and W. Wagner. International Equations for the Saturation Properties of Ordinary Water Substance. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 16(4) :893–901, October 1987.
- [135] T. Boulard and A. Baille. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents.pdf. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61 :37–48, 1995.
- [136] B. Morille, C. Migeon, and P.E. Bournet. Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Horticulturae*, 152 :80–91, March 2013.
- [137] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. Consulté le 03/07/2020.
- [138] Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling. Technical report, Modelica Association, 2017.

-
- [139] Queralt Altes-Buch, Sylvain Quoilin, and Vincent Lemort. Greenhouses : A Modelica Library for the Simulation of Greenhouse Climate and Energy Systems. pages 533–542, February 2019.
- [140] Peter Fritzson, Adrian Pop, Adeel Asghar, Bernhard Bachmann, Willi Braun, Robert Braun, Lena Buffoni, Francesco Casella, Rodrigo Castro, Alejandro Danós, Rödiger Franke, Mahder Gebremedhin, Bernt Lie, Alachew Mengist, Kannan Moudgalya, Lennart Ochel, Arunkumar Palanisamy, Wladimir Schamai, Martin Söhlund, Bernhard Thiele, Volker Waurich, and Per Östlund. The OpenModelica Integrated Modeling, Simulation, and Optimization Environment. In *Proceedings of the 1st American Modelica conference*, pages 206–219, Cambridge MA, USA, October 2018.
- [141] T Agami Reddy. Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs : Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. *AHRAE Trans*, 112 :226–240, 2006.
- [142] Daniel Coakley, Paul Raftery, and Marcus Keane. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37 :123–141, September 2014.
- [143] Debaditya Chakraborty and Hazem Elzarka. Performance testing of energy models : are we using the right statistical metrics ? *Journal of Building Performance Simulation*, 11(4) :433–448, July 2018.
- [144] Florian Opitz and Peter Treffinger. Packed bed thermal energy storage model – Generalized approach and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 73(1) :245–252, December 2014.
- [145] J A Clarke, P A Strachan, and C Pernot. An approach to the calibration of building energy simulation models. *ASHRAE Trans*, pages 917–927, 1993.
- [146] Paul Raftery, Marcus Keane, and James O’Donnell. Calibrating whole building energy models : An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, 43(9) :2356–2364, September 2011.
- [147] Frédéric Léveillé-Guillemette and Danielle Monfet. Calibration d’un modèle énergétique et analyse économique de mesures de conservation d’énergie d’une serre communautaire à Montréal.pdf. In *Proceedings of eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada*, pages 512–521, Montréal, Canada, May 2018.
- [148] James M. O’Reilly, Frank E. Karasz, and Harvey E. Bair. Thermodynamic properties of lexan polycarbonate from 110-560 K. *Journal of Polymer Science Part C : Polymer Symposia*, 6(1) :109–115, 1964.
- [149] Marieke Burghoorn, Dorrit Roosen-Melsen, Joris Riet, Sami Sabik, Zeger Vroon, Iryna Yakimets, and Pascal Buskens. Single layer broadband anti-reflective coa-

- tings for plastic substrates produced by full wafer and roll-to-roll step-and-flash nano-imprint lithography. *Materials*, 6 :3710–3726, 09 2013.
- [150] <http://www.proplastik.lt/wp-content/uploads/2017/08/Lexan-katalogas.pdf>. Consulté le 15/09/2018.
- [151] Takeshi Kuroyanagi. Investigating air leakage and wind pressure coefficients of single-span plastic greenhouses using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 163 :15–27, November 2017.
- [152] T.E.W. Schumann. Heat transfer : A liquid flowing through a porous prism. *Journal of the Franklin Institute*, 208(3) :405–416, September 1929.
- [153] Evelyn Gunawan, Nicolò Giordano, Páll Jensson, Juliet Newson, and Jasmin Raymond. Alternative heating systems for northern remote communities : Techno-economic analysis of ground-coupled heat pumps in Kuujjuaq, Nunavik, Canada. *Renewable Energy*, 147 :1540–1553, March 2020.
- [154] Nicolò Giordano, chercheur au Centre Eau Terre Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, Canada. Communication personnelle du 03/07/19.
- [155] P. G. Kosky, Robert T. Balmer, William Keat, and George Wise. *Exploring engineering : an introduction to engineering and design*. Elsevier/AP, Burlington, MA, third edition edition, 2013.
- [156] John Beek. Design of packed catalytic reactors. In Thomas B. Drew, John W. Hoopes, and Theodore Vermeulen, editors, *Advances in Chemical Engineering*, volume 3, pages 203 – 271. Academic Press, 1962.
- [157] M. A. Al-Nimr, M. K. Abu-Qudais, and M. D. Mashaqi. Dynamic behaviour of a packed bed energy storage system. *Energy Conversion and Management*, 37(1) :23–30, January 1996. Publisher : Pergamon.
- [158] Markus Hänchen, Sarah Brückner, and Aldo Steinfeld. High-temperature thermal storage using a packed bed of rocks – Heat transfer analysis and experimental validation. *Applied Thermal Engineering*, 31(10) :1798–1806, July 2011.
- [159] Mario Cascetta, Giorgio Cau, Pierpaolo Puddu, and Fabio Serra. A comparison between CFD simulation and experimental investigation of a packed-bed thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 98 :1263–1272, April 2016.
- [160] D.H. Willits, P. Chandra, and M.M. Peet. Modelling solar energy storage systems for greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(1) :73–93, July 1985.
- [161] Y. Jemmal, N. Zari, M. Asbik, and M. Maaroufi. Experimental characterization and thermal performance comparison of six Moroccan rocks used as filler materials in a packed bed storage system. *Journal of Energy Storage*, 30 :101513, August 2020.

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES EXACTES ET LEURS APPLICATIONS (ED211)

LABORATOIRE DE THERMIQUE, ÉNERGÉTIQUE ET PROCÉDÉS (LATEP)

Paul PICHÉ

paul.piche31@laposte.net