

Développement et évaluation d'un modèle de serre nordique communautaire couplée à un système de stockage thermique

par

Timothée MAHEUX

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 18 DÉCEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Timothée Maheux, 2023



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

M. Stéphane Gibout, co-directeur de mémoire
Laboratoire de thermique, énergétique et procédés
Université de Pau et des Pays de l'Adour

M. Kun Zhang, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 08/12/2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

On entend souvent que la recherche est une épreuve solitaire. J'ai eu au contraire la chance d'être accompagné dans ce voyage par des personnes très bienveillantes.

En premier lieu, j'aimerais remercier mes directeurs Didier Haillot, Stéphane Gibout et Danielle Monfet pour la création d'une relation de collaboration plutôt que de direction. Vous avez réussi à me motiver à toujours pousser la réflexion et à creuser des axes intéressants tout en me faisant confiance dans mon travail. J'allais travailler non pour rendre un travail à mes directeurs, mais parce que j'étais motivé à résoudre les défis qui nous étaient posés, et j'espère pouvoir continuer à travailler comme cela pendant la suite de mon parcours.

Deuxièmement, je souhaite remercier toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu travailler pendant ce projet, que ce soit mes collègues du LTSB avec lesquels les moments de rigolade ou d'aide mutuelle ont rythmé mes journées, Paul Piché pour la transmission de son travail agrémentée de conseils scientifiques et moins scientifiques, ainsi que les personnes ayant participé au projet de serre de Radisson auquel j'ai beaucoup aimé participer : Hugo, Audrey, Catherine et Bernard du CISA ainsi qu'André et Gabriel des Jardins du 53^{ème} Taïga.

Sur un plan plus personnel, mais non moins important, j'adresse un grand merci à mes amis avec lesquelles les discussions animées du midi et tous les souvenirs en commun ont contribué à faire de cette expérience un moment riche de ma vie. Merci également à Marine pour son soutien depuis l'autre côté de l'Atlantique, tu as été une oreille attentive à l'ensemble de tous mes questionnements. Merci pour tout.

Enfin, je remercie mes parents pour le soutien tant moral que financier, et pour m'avoir encouragé même dans les moments les plus compliqués.

Création et étude d'un modèle de serre nordique communautaire couplée à un système de stockage thermique

Timothée MAHEUX

RÉSUMÉ

Plusieurs projets visent à développer la serriculture dans le Nord-du-Québec, dans le but de défendre une alimentation de meilleure qualité, moins chère et plus diversifiée. Dans ce cadre, le développement de systèmes de stockage liés à ces serres est en cours dans des villages de cette région. En effet, le climat local engendre une saison de culture courte et des températures nocturnes froides même en période estivale, ce qui rend la culture en serre difficile. Un système de stockage de l'énergie thermique vise alors à emmagasiner l'énergie thermique disponible en journée pour la réinjecter dans la serre la nuit.

Plusieurs raisons justifient le développement d'un modèle numérique de l'ensemble formé par la serre et le système de stockage : amélioration du contrôle, optimisation des dimensions des futurs systèmes, étude de faisabilité de couplage de systèmes énergétiques additionnels. Un sous-modèle de serre ainsi qu'un sous-modèle de stockage ont été développés précédemment. L'objectif de ce travail de recherche est de les coupler pour en faire un modèle unique puis d'étudier la validité des simulations.

Afin de répondre à cet objectif, le modèle de l'ensemble serre-lit de roches obtenu est analysé une première fois afin de définir les ajustements à y apporter pour obtenir des simulations proches de la réalité. Cette analyse montre une cohérence physique, mais une précision des simulations à améliorer : les températures simulées sont sous-estimées en début et en fin de saison de culture et surestimées en milieu de saison. Il est alors envisagé de réaliser un processus de calibration afin de redéfinir la valeur des paramètres du modèle incertains.

Le processus de calibration consiste en une étude de sensibilité suivie d'une calibration à l'aide d'un algorithme d'évolution différentielle et d'une analyse des performances obtenues. Ce processus est réalisé dans un premier lieu sur la serre puis sur la serre liée au système de stockage. La calibration n'ayant pas abouti à des résultats concluants, il est alors nécessaire d'affiner la modélisation du système, notamment sur les conditions aux limites du système de stockage.

L'étude des simulations du modèle numérique de stockage a permis de mettre en lumière la présence d'une dynamique de stockage thermique saisonnier. L'intégration de ce comportement dans le modèle numérique a permis de gagner en précision sur les simulations d'énergies échangées entre la serre et le système de stockage ainsi que sur la température intérieure de la serre simulée avec une erreur quadratique moyenne de $1,9^{\circ}\text{C}$.

Désormais, l'optimisation des caractéristiques des futurs dispositifs de stockage est rendue possible, ainsi que l'étude de faisabilité de l'ajout de systèmes énergétiques additionnels comme un système solaire thermique.

VIII

Mots clés : Stockage de l'énergie thermique, Lit de roches, Modélisation numérique, Modelica, Calibration, Efficacité énergétique, Serres

Creation and study of a community Nordic greenhouse coupled with a thermal storage system

Timothée MAHEUX

ABSTRACT

Several projects aim to develop greenhouse farming in the Northern Québec region, with the aim to promote better-quality, more affordable, and diversified food. In this context, the development of storage systems linked to these greenhouses is underway in villages throughout the region. The local climate results in a short growing season, and night-time temperatures are cold even in summer, making it difficult to grow crops in greenhouses. The aim of a thermal energy storage system is to store the thermal energy available during the day and re-inject it into the greenhouse at night.

There are several reasons for developing a combined numerical model of the greenhouse and storage system: improved control, optimization of future systems dimensions, feasibility study of coupling additional energy systems. Both a greenhouse sub-model and a storage sub-model have already been developed. The aim of this research is to integrate them into a coupled model and then assess the viability of the simulations.

To achieve this goal, the resulting coupled model is analyzed for the first time, in order to determine the necessary adjustments for simulations to closely match reality. This analysis revealed that the model was physically coherent, but that the accuracy of the simulations needed enhancement: simulated temperatures were underestimated at the beginning and end of the growing season and overestimated in the middle. Consequently, a calibration process is planned to redefine the values of uncertain model parameters.

The calibration process consists of a sensitivity study, followed by calibration using a differential evolution algorithm, and an analysis of the performance obtained. This process is initially applied to the greenhouse and subsequently to the greenhouse linked to the storage system. Since the calibration did not yield conclusive results, it became necessary to refine the system modeling, particularly concerning the boundary conditions of the storage system.

An examination of the digital storage model simulations uncovered seasonal thermal storage dynamics. Integrating this behavior into the numerical model has improved the accuracy of simulations of energy exchange between the greenhouse and the storage system, as well as the internal temperature of the simulated greenhouse, resulting to a root-mean-square error of 1.9°C.

This advancement now allows for the optimization of future storage device characteristics and the exploration of the feasibility of integrating additional energy systems, such as a solar thermal system.

Keywords: Thermal energy storage, Rock-bed, Numerical modelling, Modelica, Calibration, Energy efficiency, Greenhouses

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Systèmes de stockage thermique appliqués aux serres	6
1.1.1 Système de stockage à lit de roches.....	8
1.1.2 Études expérimentales de systèmes de stockage à lits de roches.....	10
1.2 Modèles numériques associés aux systèmes de stockage thermique.....	14
1.2.1 Modèles de serres.....	14
1.2.2 Modèles de systèmes de stockage thermique.....	16
1.3 Calibration.....	18
1.3.1 Étude de sensibilité	20
1.3.2 Algorithmes d'optimisation appliqués à la calibration	21
1.3.3 Calibration multi-objectif.....	23
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	25
2.1 Couplage du modèle SLR	27
2.2 Analyse initiale du modèle.....	27
2.3 Première phase d'ajustement : calibration du sous-modèle de serre et du modèle SLR	29
2.4 Seconde phase d'ajustement : tests de simulation du STE et modification du sous- modèle de stockage	31
CHAPITRE 3 CAS D'ÉTUDE : DESCRIPTION, MODÈLES NUMÉRIQUES ET ANALYSES INITIALES	33
3.1 Cas d'étude de Kuujjuaq.....	33
3.1.1 Serre	34
3.1.2 Système de stockage thermique de l'énergie de Kuujjuaq	36
3.2 Modèles numériques associés au cas d'étude de Kuujjuaq	38
3.2.1 Sous-modèle de serre	38
3.2.1.1 Flux convectifs.....	42
3.2.1.2 Flux radiatifs	42
3.2.1.3 Flux conductifs.....	45
3.2.1.4 Flux liés à la ventilation.....	47
3.2.2 Sous-modèle de stockage.....	48
3.3 Couplage des sous-modèles et outils d'analyse du modèle SLR.....	51
3.4 Analyse initiale du modèle SLR	55
3.4.1 Étude qualitative : cohérence physique des simulations.....	55
3.4.2 Étude quantitative : capacité à prévoir les températures types	59
3.4.3 Constats.....	61
CHAPITRE 4 PREMIÈRE PHASE D'AJUSTEMENT : CALIBRATION ET ÉTUDE DES MODÈLES NUMÉRIQUES.....	65
4.1 Calibration du sous-modèle de serre.....	65

4.1.1	Étude de sensibilité	67
4.1.2	Calibration avec la température intérieure (stratégie n°1)	69
4.1.3	Calibration avec les températures types (stratégie n°2)	71
4.2	Calibration du modèle SLR	74
4.2.1	Étude de sensibilité du modèle SLR	74
4.2.2	Calibration avec les températures types	76
4.3	Comparaison des températures obtenues	79
4.4	Étude énergétique du modèle SLR calibré	80
4.4.1	Énergies chargées et déchargées	80
4.4.2	Exploitation des indicateurs de performances	82
CHAPITRE 5 SECONDE PHASE D'AJUSTEMENT : ÉTUDE ET ADAPTATION		
	DU SOUS-MODÈLE DE STOCKAGE	85
5.1	Modélisation adiabatique du système de stockage de l'énergie	86
5.2	Modélisation d'une perte thermique constante	89
5.3	Modélisation d'un échange avec masse thermique	92
CHAPITRE 6 SECONDE PHASE D'AJUSTEMENT : ADAPTATION ET		
	ANALYSE FINALE DU MODÈLE SLR	97
6.1	Ajustements du modèle SLR	97
6.1.1	Adaptation de la modélisation de la ventilation	98
6.1.2	Terre de culture liée aux deux sous-modèles	98
6.1.3	Modélisation des gabions	100
6.1.4	Capacité thermique massique équivalente de l'air	102
6.1.5	Flux thermique avec le sol sous le STE	103
6.2	Calibration du modèle SLR	103
6.3	Analyse du modèle SLR	104
6.3.1	Analyse énergétique du STE	105
6.3.2	Analyse sur des quinzaines représentatives de la saison 2019	109
CHAPITRE 7 DISCUSSION ET PERSPECTIVES		
7.1	Discussion	121
7.2	Améliorations du modèle	121
7.2.1	Modélisation de l'instrumentation	122
7.2.2	Transfert thermique STE – terre de culture	122
7.2.3	Étude de validité pour le cas d'étude de Radisson	122
7.3	Construction d'un nouveau STE à Radisson	123
7.3.1	Instrumentation	125
7.3.2	Instrumentation complémentaire	126
7.3.3	Amélioration du contrôle	127
7.3.4	Solaire thermique	129
CONCLUSION		131
BIBLIOGRAPHIE		135

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Indicateurs de performances des lits de roches.....13
Tableau 3.1	Détails des capteurs de la serre34
Tableau 3.2	Dimensions de la serre de Kuujjuaq36
Tableau 3.3	Caractéristiques du système de stockage de Kuujjuaq36
Tableau 4.1	Étude de sensibilité des paramètres du sous-modèle de serre.....68
Tableau 4.2	Paramètres du sous-modèle de serre calibrés avec la stratégie n°169
Tableau 4.3	Paramètres du sous-modèle de serre calibrés avec la stratégie n°272
Tableau 4.4	Étude de sensibilité des paramètres du sous-modèle de stockage75
Tableau 4.5	Paramètres du sous-modèle de stockage calibrés avec le modèle SLR76
Tableau 4.6	Indicateurs de performance mesurés, simulés avant et après calibration sur la saison 2019.....83
Tableau 6.1	Paramètres du modèle final calibrés104
Tableau 6.2	Indicateurs de performance du modèle final pour la saison 2019108
Tableau 6.3	Indicateurs de précision du modèle appliqués à la température intérieure de la serre118
Tableau 7.1	Dimensions de la serre et du système de stockage de Radisson124
Tableau 7.2	Détails des capteurs intérieurs installés à Radisson126

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Techniques de stockage thermique7
Figure 1.2	Schéma d'un lit de roches Tirée de Piché (2021, p. 67).....9
Figure 1.3	Modèle nodal de serre Tirée de Vanthoor (2011, p.23).....15
Figure 2.1	Démarche d'obtention d'un modèle numérique de serre incluant un STE-LR.....26
Figure 2.2	Phases d'ajustement du modèle numérique.....28
Figure 3.1	Placements des capteurs de l'instrumentation de la serre Tirée de Piché (2021, p.50).....35
Figure 3.2	Vue extérieure (a) et intérieure (b) de la serre de Kuujjuaq35
Figure 3.3	Lits de roches en cours de construction (a) et terminés (b) à Kuujjuaq.....37
Figure 3.4	Placement des sondes de température dans le lit de roches de Kuujjuaq Tirée de Piché (2021, p.87).....37
Figure 3.5	Modèle nodal de la serre Tirée de Piché (2021, p.107)40
Figure 3.6	Entrées et sorties du sous-modèle de serre41
Figure 3.7	Modèle solaire Tirée de Piché (2021, p.67).....44
Figure 3.8	Modèle conductif du sol Tirée de Piché (202146
Figure 3.9	Entrées et sorties du sous-modèle de stockage48
Figure 3.10	Échanges thermiques dans une maille de stockage.....49
Figure 3.11	Entrées et sorties du modèle SLR51
Figure 3.12	Contrôle du système de stockage de Kuujjuaq52
Figure 3.13	Température intérieure et état du STE simulés, température extérieure et ressource solaire du 6 au 10 juin 201956
Figure 3.14	Température intérieure simulée et mesurée, état du STE simulé et réel, température de sortie du stock simulée du 16 au 21 juillet 2022.....57

Figure 3.15	Température intérieure simulée et mesurée, état du STE réel utilisé comme consigne du STE simulé, température de sortie du stock simulée du 16 au 21 juillet 2022	58
Figure 3.16	Températures types intérieures quotidiennes pour (a) début, (b) milieu et (c) fin de saison	59
Figure 3.17	Température au milieu du lit simulée et mesurée et ressource solaire	61
Figure 4.1	Température intérieure de la serre simulée initialement sur les périodes représentatives de la saison 2017	66
Figure 4.2	Coefficients de sensibilité des paramètres du sous-modèle de serre	67
Figure 4.3	Température intérieure calibrée avec la température intérieure simulée ...	70
Figure 4.4	Température intérieure calibrée avec la température intérieure, et basée sur les températures types	73
Figure 4.5	Valeur des coefficients de sensibilité des paramètres du sous-modèle de stockage	75
Figure 4.6	Température intérieure du système SLR mesurée, simulée avant et après recalibration du 6 juin au 14 juin 2019	77
Figure 4.7	Température de l'air dans le lit du 16 juin au 3 juillet 2019	78
Figure 4.8	Températures types mesurées et simulées avant et après calibration	79
Figure 4.9	Énergies chargées et déchargées mesurées et calibrées par semaine sur la saison 2019	81
Figure 4.10	Coefficients de performance pour la saison 2019	82
Figure 5.1	Énergie advective nette absorbée mesurée et simulée du 30 mai 2019 au 23 août 2019	87
Figure 5.2	Zoom sur la Figure 5.1	88
Figure 5.3	Énergie advective nette absorbée avec hypothèse de perte thermique du 30 mai 2019 au 23 août 2019	90
Figure 5.4	Énergie advective nette absorbée avec hypothèse de perte thermique du 30 mai 2019 au 25 octobre 2019	91
Figure 5.5	Modélisation d'une maille de stockage présentant un lien thermique avec un nœud Terre	93

Figure 5.6	Énergie absorbée avec hypothèse de masse thermique du 30 mai au 25 octobre 2019.....	94
Figure 6.1	Vue en coupe des gabions, des lits de roches et de la terre de culture.....	99
Figure 6.2	Modélisation de la terre de culture.....	100
Figure 6.3	Serre de Radisson avec gabions et STE apparents.....	101
Figure 6.4	Énergie advective nette absorbée et transmise à la terre en 2019.....	105
Figure 6.5	Énergies chargées et déchargées mesurées et simulées avec le modèle SLR final pour la saison 2019.....	106
Figure 6.6	Coefficients de performance de la saison 2019	107
Figure 6.7	Analyse des simulations du modèle SLR du 02/06/2019 au 15/06/2019	111
Figure 6.8	Analyse des simulations du modèle SLR du 04/08/2019 au 17/08/2019	113
Figure 6.9	Analyse des simulations du modèle SLR du 26/09/2019 au 11/10/2019	115
Figure 6.10	Températures types en 2019	116
Figure 7.1	Schéma de la serre de Radisson.....	124
Figure 7.2	Emplacement des sondes de température dans le lit de roches instrumenté.....	125
Figure 7.3	Paramétrage du STE sur la plateforme Maximus	128
Figure 7.4	Schéma d'intention d'un système solaire thermique à Radisson	129

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AG	Algorithme Génétique
APR	Appel à Projet de Recherche
CLO	Courte Longueur d'Onde
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COP	Coefficient de Performance
DL	Data Logger
ÉANA	Énergie Advective Nette Absorbée
ED	Évolution Différentielle
GLO	Grande Longueur d'Onde
LAI	Leaf Area Index / Indice foliaire
MAD	Maximum Absolute Difference / Différence absolue maximale
MAE	Mean Absolute Error / Erreur absolue moyenne
MCP	Matériau à changement de phase
ME	Mean Error / Erreur moyenne
MFN	Modélisation des Fluides Dynamique
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm / Algorithme génétique multi-objectif
NSGA	Non-Dominating Sorting Genetic Algorithm / Algorithme génétique à tri non dominant
OHMi	Observatoire Homme-Milieu international
PANA	Puissance Advective Nette Absorbée
PAR	Photosynthesis Active Radiation / Rayonnement photosynthétiquement actif
RH	Relative Humidity / Humidité Relative
RMSE	Root Mean Square Error / Erreur quadratique moyenne
SLR	Serre - Lit de Roches
STD	Simulation Thermique Dynamique
STE	Stockage Thermique de l'Énergie
STE-LR	Stockage Thermique de l'Énergie à Lit de Roches
TLL	Thermal Load Levelling / Nivellement de la charge thermique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Symboles :

C	Coefficient
c_p	Capacité thermique massique
CS	Coefficient de sensibilité
E	Énergie
F	Valeur de mutation
G	Génération
m	Vecteur muté
q	Débit d'air
Q	Énergie
\dot{Q}	Puissance
T	Température
U	État d'activation
w	Poids
x	Vecteur individu
Δt	Intervalle temporel
δ	Dérivée partielle
ε	Fraction de vide / Émissivité
η	Coefficient
ρ	Masse volumique
σ	Constante de Stefan-Boltzmann

Indices :

air	Air
$best$	Meilleur
c	Charge
Can	Canopée

<i>d</i>	Décharge
<i>élec</i>	Électrique
<i>Env</i>	Enveloppe
<i>f</i>	Fluide
<i>fui</i>	Fuite
<i>hc</i>	Valeur initiale
<i>i</i>	Estampille temporelle
<i>int</i>	Intérieur
<i>m</i>	Mesuré; Modifié; Muté
<i>max</i>	Maximal
<i>min</i>	Minimal
<i>moy</i>	Moyen
<i>multi</i>	Multiple
<i>n</i>	Nœud
<i>r</i>	Récupération
<i>rad</i>	Radiatif
<i>s</i>	Simulé ; Stockage ; solide
<i>Terre</i>	Terre de culture
<i>venti</i>	Ventilation

Unités de mesure :

J	Joule
g	gramme
K	Kelvin
m	mètre
W	Watt
°C	Degré Celsius

INTRODUCTION

Les communautés isolées du Nunavik, un territoire faisant partie de la région Nord-du-Québec et abritant 16 000 habitants répartis en 16 villages (MAMH, 2023) font face à des difficultés alimentaires touchant notamment la qualité, le prix et la disponibilité de produits frais (Avard, 2015). Afin de pallier ces problématiques, le développement de la serriculture a été proposé (Lamalice et al., 2018) et est soutenu par le gouvernement québécois à travers le Plan Nord (Société du Plan Nord, 2020). Malgré ces efforts, l'exploitation de serres communautaires au nord du 49^{ème} parallèle est complexifiée par l'utilisation d'infrastructures « standards » conçues pour les climats continentaux et non adaptées au climat nordique (Piché, 2021).

Un moyen d'adapter ces serres « standards » au climat nordique est l'utilisation de systèmes de Stockage Thermique de l'Énergie (STE). Ceux-ci permettent d'améliorer le comportement thermique des serres en stockant la chaleur excédentaire de la journée afin de la réinjecter dans la serre la nuit. Un système de stockage a été construit en 2019 dans une des serres communautaires de Kuujuaq par Piché (2021) dans l'objectif d'augmenter la température dans la serre pendant la nuit. L'énergie thermique chargée pendant la journée pourrait être utilisée pour compenser les pertes thermiques nocturnes en la déchargeant pendant la nuit.

L'installation de ce système de stockage a été réalisée dans le cadre d'un appel à projet de recherche dont l'objectif est d'améliorer la souveraineté alimentaire au Nunavik et financé par l'Observatoire Homme-Milieus international (OHMi) Nunavik. Ce travail de maîtrise prend la suite de la thèse de Piché (2021) qui a développé et construit un système de stockage thermique de l'énergie (STE) à Kuujuaq et développé des sous-modèles de serre et de stockage visant à être couplés pour simuler l'interaction entre la serre et le STE.

La preuve de concept réalisée par Piché (2021) dans le cadre d'une utilisation nordique ouvre désormais la voie à l'étude des améliorations possibles des STE installés dans cette région en utilisant un modèle numérique. Plusieurs raisons justifient le développement d'un modèle numérique Serre-Lit de Roches (SLR) constitué par la serre et le système de stockage.

Premièrement, l'utilisation du modèle permettra d'améliorer les STE existants en optimisant les stratégies de contrôle. Deuxièmement, le modèle numérique soutiendra la mise en place de nouveaux systèmes de stockage en étudiant l'impact potentiel sur une serre donnée et en optimisant leurs caractéristiques. Enfin, le modèle permettra d'étudier la faisabilité d'ajout de nouvelles technologies solaires, par exemple un système solaire thermique aéraulique.

Dans cette optique, l'objectif de recherche est d'obtenir un modèle numérique permettant d'évaluer et d'améliorer les performances thermiques d'une serre liée à un système de Stockage Thermique de l'Energie à Lit de Roches (STE-LR) afin d'améliorer leur contrôle et de mieux dimensionner les futurs systèmes. La structure de ce mémoire contenant sept chapitres est présentée sur la Figure 0.1.

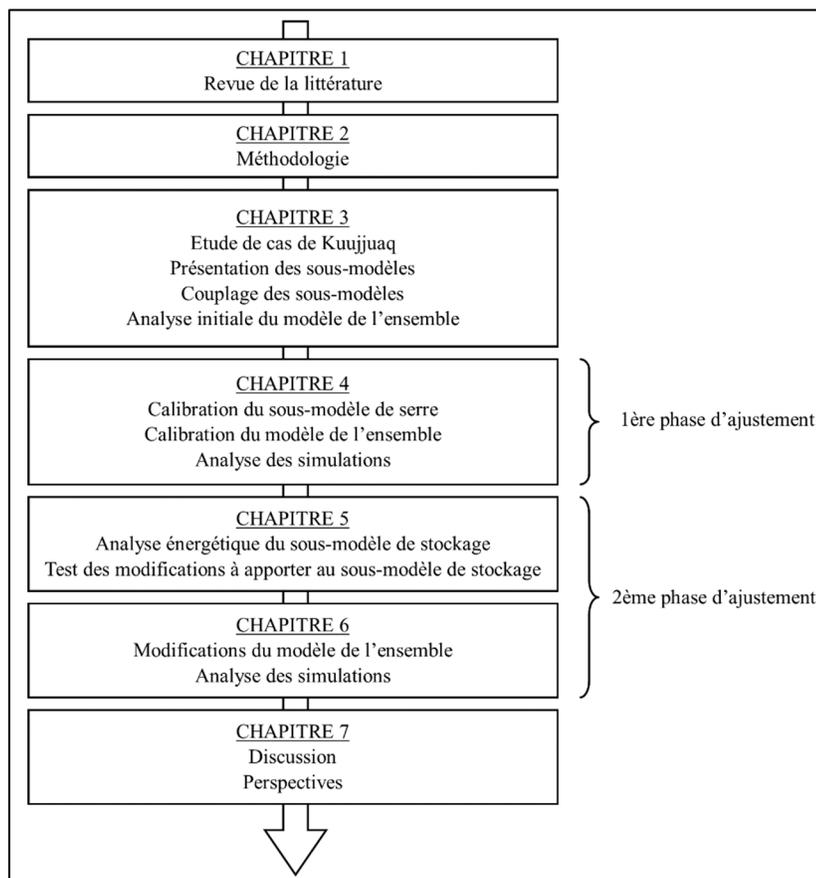


Figure 0.1 Structure du mémoire

Le premier chapitre présente la revue de la littérature traitant des systèmes de stockage thermique et des modèles numériques de ces systèmes, ainsi que les problématiques de calibration associées. La méthodologie basée sur un processus itératif et permettant d'obtenir un modèle numérique de la serre et du système de stockage thermique étudiés est détaillée dans le deuxième chapitre. Dans le troisième chapitre, la serre et le système de stockage étudiés sont présentés ainsi que leurs sous-modèles numériques puis le couplage de ces sous-modèles est explicité et suivi de l'analyse initiale du modèle de l'ensemble serre-lit de roches. Cette analyse permettra de définir les ajustements à apporter au modèle. Ainsi, une première itération d'ajustement composée de la recalibration du sous-modèle de serre et du modèle de l'ensemble Serre- Lit de Roches (SLR) suivie de l'analyse entre les mesures, le modèle initial et le modèle calibré selon le point de vue des températures puis d'un point de vue énergétique sont abordés dans le quatrième chapitre. La seconde itération d'ajustement est détaillée dans le cinquième et sixième chapitre. Le cinquième chapitre aborde le test de plusieurs hypothèses de modélisation du lit de roches, ainsi que l'impact de celles-ci sur les simulations. Dans le sixième chapitre, la modification du modèle SLR est réalisée et l'étude des simulations du modèle SLR final est menée. Enfin, le septième chapitre fait l'état des lieux des perspectives de suite du travail dans le domaine expérimental et numérique.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La consommation énergétique des serres représente une part importante des coûts d'exploitation des producteurs, soit 15 à 30% des coûts, selon le Syndicat des producteurs en serre du Québec (2008). La consommation d'énergie résulte de l'utilisation de systèmes dits « actifs » contrôlant les conditions intérieures de la serre (température, humidité, lumière...).

Badji (2022) a classé les systèmes actifs de contrôle des conditions intérieures des serres en cinq catégories : les systèmes visant la gestion de la température (chauffage et refroidissement), le contrôle de l'humidité (déshumidification) et du taux de dioxyde de carbone (enrichissement en CO_2), la gestion de l'éclairage (lampes) et l'apport hydrique (techniques anciennes et modernes d'irrigation). La gestion de la température est l'axe le plus étudié : elle concerne 26 articles sur les 36 de l'étude de Badji (2022) se penchant sur le contrôle des conditions intérieures, le reste des articles étudiant l'irradiation, le taux de dioxyde de carbone, l'humidité ou l'intensité lumineuse . En effet, les technologies de chauffage étant principalement les ventilo-convecteurs, les générateurs d'air chaud et les pompes à chaleur, ces systèmes représentent un poste important de consommation énergétique (et de dépenses) qu'il faut chercher à réduire.

Pour cela, de nombreuses initiatives sont mises en place concernant la conception, la mise en place de systèmes actifs ou l'amélioration du contrôle des serres (Zhang et al., 2022). Ainsi, Sethi et Sharma (2008) ont mené une revue de littérature rassemblant 62 applications de solutions de réductions en besoins thermiques pour les serres. Parmi ces articles, 46 traitaient de systèmes à stockage thermique de l'énergie.

Applicables à une large palette d'utilisation, les systèmes de stockage de l'énergie permettent de déphaser les moments de production de l'énergie des moments de consommation. Les

technologies de stockage se classent en trois catégories (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009) : le stockage électrique qui rassemble notamment les batteries et les piles; le stockage mécanique à l'aide d'air comprimé (Du, Bian, & Xiong, 2022) ou d'eau pompée en hauteur (Li, Yang, Zhao, Wang, & Yin, 2023) et le stockage thermique utilisé notamment dans les réseaux de chaleur (Lamrani, Belcaid, Lebrouhi, Khodadadi, & El Rhafiki, 2023).

L'installation de systèmes de stockage thermique de l'énergie fait partie des innovations qui permettent un lissage des températures dans la serre à l'échelle quotidienne (Bouhdjar, Belhamel, Belkhiri, & Boulbina, 1996) ou à l'échelle saisonnière (Xu, Li, Wang, & Liu, 2014). En effet, une température modérée dans la serre est une caractéristique majeure des conditions impactant la croissance des plantes (Tiwari, 2003). Parmi les 62 solutions compilées par Sethi et Sharma (2008), 12 études évaluent l'utilisation des systèmes de stockage thermique de l'énergie à lits de roches (STE-LR). Ce chapitre dédié à la revue de littérature se focalisera sur cette technologie.

L'objectif de ce travail de recherche est d'obtenir un modèle numérique permettant d'évaluer et d'améliorer les performances thermiques d'une serre liée à un STE-LR afin d'améliorer leur contrôle et de mieux dimensionner les futurs systèmes. La problématique de cette revue de littérature sera de comprendre comment les modèles équivalents sont étudiés, calibrés et validés dans les travaux antérieurs. Elle sera divisée en trois sections. La première section présente l'état de l'art des différentes solutions de stockage thermique appliquées aux serres, en particulier les systèmes à lits de roches. La deuxième section concerne les modèles numériques développés pour simuler les impacts des systèmes de stockage sur les serres : modèles de serres et modèles de système de stockage à lits de roches. Enfin, la troisième section aborde la calibration des modèles numériques.

1.1 Systèmes de stockage thermique appliqués aux serres

Les systèmes de stockage thermique permettent de stocker l'énergie sous trois formes différentes qui sont représentées dans la Figure 1.1. Le stockage sensible permet

d'emmagasiner la chaleur en faisant varier l'énergie interne d'un matériau par l'intermédiaire de sa température. À l'inverse, le stockage latent utilise l'énergie latente d'un matériau à changement de phase pour stocker ou libérer de l'énergie. Enfin, le stockage thermo-chimique exploite les énergies de réactions chimiques exothermiques ou endothermiques (Sarbu & Sebarchievici, 2018).

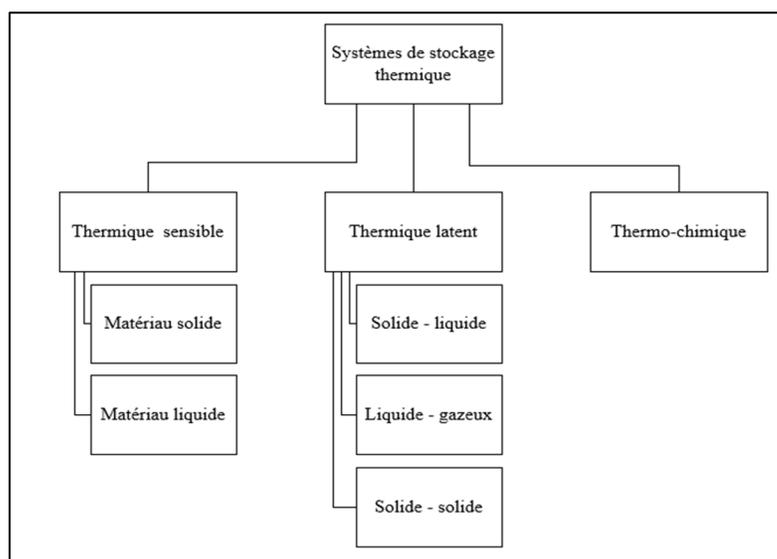


Figure 1.1 Techniques de stockage thermique

Gorjian (2021) a réalisé un état de l'art des techniques de stockage et d'exploitation de la ressource solaire dans le domaine de la serriculture qu'il a classées en trois catégories : stockage latent, sensible et thermo-chimique.

Premièrement, les systèmes de stockage thermiques latents permettent de stocker l'énergie thermique en faisant varier la température d'un matériau de stockage appelé Matériau à Changement de Phase (MCP). Deux comparaisons ont été réalisées afin d'établir les performances thermiques et économiques des différents matériaux MCP. Sethi et Sharma (2008) ont démontré que le MCP le plus utilisé dans le contexte d'études portant sur l'intégration à une serre était le chlorure de calcium hexahydraté ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$). Par la suite, Shukla (2016) a conclu que les problématiques techniques et économiques liées à ces systèmes ne permettaient pas encore leur utilisation en serriculture.

Une deuxième manière de stocker l'énergie thermique est de l'utiliser dans le cadre de réactions chimiques. Le concept réside dans le fait d'utiliser le caractère endothermique de réactions chimiques pour séparer des molécules, et de provoquer la réaction inverse afin de récupérer cette énergie. Par exemple, Aydin, Casey, & Riffat (2015) ont mené une revue des 27 travaux de recherche cherchant à développer ces technologies, mais elles sont limitées par des contraintes techniques liées notamment à la corrosion et la densité énergétique des installations (de Gracia & Cabeza, 2015). L'application à la serriculture n'est alors pas envisagée à l'heure actuelle.

Enfin, les systèmes de stockage thermiques sensibles permettent de stocker l'énergie thermique en faisant varier la température d'un matériau de stockage. Différents matériaux sont utilisables : sable, eau et roches sont les plus étudiés (Khatod, Katekar, & Deshmukh, 2022). Deux matériaux sont couramment utilisés en raison de leur bon rapport entre caractéristiques thermiques et coût : l'eau et la roche. Par exemple, Lu (2017) a étudié les performances d'un stockage thermique où l'unité de stockage est un réservoir d'eau de 8 m³ pour améliorer le comportement thermique d'une serre chinoise pendant l'hiver. Cependant, dans un climat nordique, l'utilisation d'un stockage à l'eau peut être problématique en raison des risques de gèle omniprésent. Conséquemment, les systèmes de stockage thermique sensible à lits de roches sont plus appropriés pour ce climat et seront abordés plus en détail dans les sections 1.1.1 et 1.1.2.

1.1.1 Système de stockage à lit de roches

Les systèmes à lits de roches sont des systèmes de stockage thermique sensible dont le matériau de stockage est la roche et le fluide caloporteur est l'air. Ces systèmes sont dits actifs car leur fonctionnement est conditionné à un apport d'énergie pour le contrôle ainsi que le fonctionnement du système de circulation d'air. La Figure 1.2 représente un schéma de lit de roches.

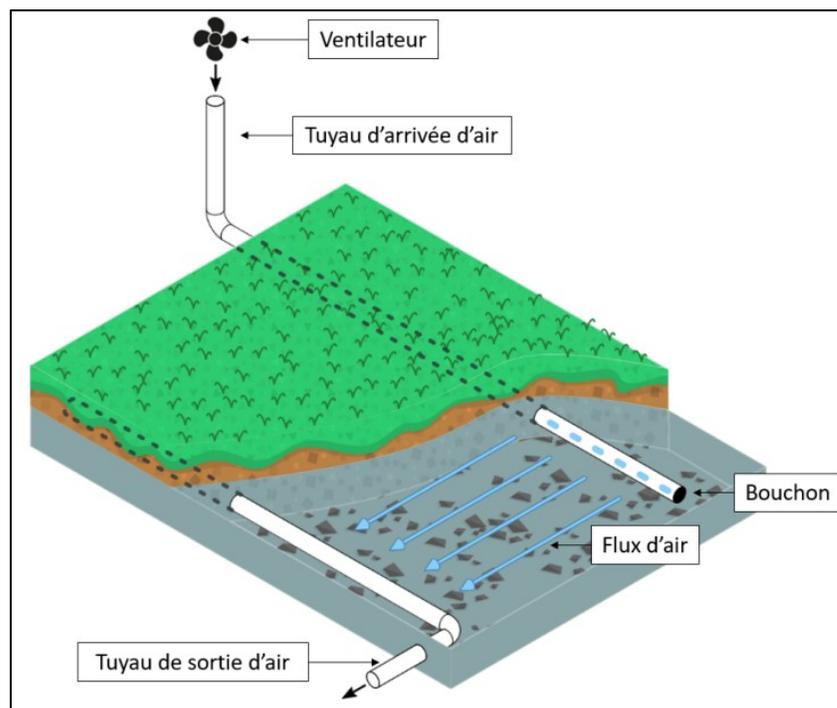


Figure 1.2 Schéma d'un lit de roches
Tirée de Piché (2021, p. 67)

Un lit de roches, représenté sur la Figure 1.2, permet de stocker l'énergie solaire thermique dans des roches généralement placées sous la serre. Le fonctionnement d'un tel système peut être détaillé comme suit :

- 1) Collecte de la chaleur : le STE-LR est intégré à un système de collecte de chaleur, dans ce cas une serre. Lorsque la température dans la serre dépasse la plage de température idéale souhaitée, l'air de la serre passe dans le système de stockage comme fluide caloporteur : l'air chaud circule à travers le lit de roches constitué de petits granulats de roches et transfère son énergie thermique aux roches. Le système de circulation d'air est représenté sur la Figure 1.2 et consiste en un ventilateur, un tuyau d'arrivée d'air et un tuyau de sortie d'air;
- 2) Stockage de la chaleur : les roches ayant capté l'énergie thermique de l'air à son passage, leur température augmente et l'énergie thermique est alors chargée dans le lit de roches. Comme visible sur la Figure 1.2, les roches sont placées entre le tuyau d'arrivée et de sortie d'air;
- 3) Libération de la chaleur : lorsque la chaleur est requise, par exemple pendant la nuit ou lorsque le soleil n'est pas disponible, l'air froid circule à travers le lit de roches réchauffé. Les granulats de roches restituent alors la chaleur chargée à l'air, le réchauffant à nouveau.

Santamouris (1994) a réalisé une revue de littérature sur les serres étant équipées de système de collecte d'énergie thermique dans la serre ou étant elles-mêmes un système de collecte. Il a montré que les systèmes de stockage par lits de roches sont l'une des principales technologies utilisées dans ce cas: 14 serres sur les 95 étudiées en étaient équipées.

Les systèmes à lits de roches sont parfois couplés à d'autres technologies. Par exemple, Bazgaou (2020) couple un système à lit de roches à des tubes noirs remplis d'eau permettant de capter le rayonnement solaire et réchauffer le sol pendant la nuit. De même, le système de lit de roches de Piché (2021) est placé dans des gabions formés de roches échangeant naturellement avec l'air ambiant. Ces roches augmentent alors la masse thermique de la serre et permettent de stocker passivement l'énergie thermique car aucun apport d'énergie ne conditionne ce comportement .

Les systèmes de stockage discutés ci-dessus sont utilisés à une périodicité quotidienne : ils sont utilisés de manière à réduire les écarts entre les températures diurnes et nocturnes. Des systèmes de stockage saisonniers inspirés de la géothermie sont également étudiés : Zhang (2015) a développé un système de stockage où le sol sert de matériau de stockage et où l'énergie thermique chargée pendant l'été est réutilisée pendant l'hiver. Le système permet alors des réductions de dépenses énergétiques hivernales : pour une consigne de température intérieure de 12 °C tout au long de l'année, l'économie d'énergie est de 27,8 kWh.m⁻².an⁻¹.

1.1.2 Études expérimentales de systèmes de stockage à lits de roches

La section précédente a montré que des initiatives visent à lier des serres à des systèmes de stockage à lits de roches. L'étude des performances des systèmes de STE-LR peut s'effectuer selon plusieurs critères présentés dans la suite de la section. Le Tableau 1.1 de synthèse rassemble les performances des STE-LR répertoriées dans la littérature.

La première manière d'étudier les performances des systèmes de STE-LR est de comparer les températures atteintes dans la serre avant et après l'installation du système de stockage. Les études qui appliquent cette approche, répertoriées dans le Tableau 1.1 en orange, observent les températures minimales nocturnes dans la serre avant et après l'installation du STE, puis calculent la différence en termes de gain thermique en degrés Celsius. Sethi et Sharma (2008) ont démontré dans leur état de l'art que cette comparaison est principalement utilisée pour évaluer les performances des STE : 38 études sur les 62 utilisaient cette méthode. Piché (2020) a également réalisé cette étude afin d'évaluer la capacité du système à rendre la température intérieure nocturne supérieure à la température extérieure nocturne.

L'étude des températures est simple à réaliser, mais offre une comparaison limitée entre les études : un gain de température nocturne à un endroit et un climat donné n'est pas équivalent au même gain dans un climat et un lieu différents.

La seconde manière d'étudier les performances des STE-LR est d'adopter un point de vue énergétique. Il permet une comparaison simplifiée entre les différents cas, contrairement à une étude sur les températures. Trois indicateurs de performances énergétiques sont utilisés et détaillés dans le Tableau 1.1 dans la partie verte.

Le Coefficient de Performance COP est le rapport entre l'énergie utile $E_{déchargée}$ fournie par le système et l'énergie E_{elec} consommée pour son fonctionnement (équation (1.1)). Dans le cas des systèmes de stockage thermique, l'énergie déchargée par le système est considérée comme l'énergie utile. En revanche, dans le cas d'une utilisation en serre, la réduction de la température dans la serre en journée peut également être considérée comme un apport utile du système de stockage.

L'efficacité de charge η_c (équation (1.2)) est le rapport entre l'énergie chargée $E_{chargée}$ par le système de stockage et l'énergie disponible $E_{disponible}$. Dans le cas des utilisations en sericulture, les auteurs (Bouhdjar et al., 1996 ; Kurklu, Bilgin, & Ozkan, 2003 ; Piché, 2021)

définissent l'énergie disponible par l'énergie solaire incidente sur la surface intérieure de la serre.

L'efficacité de décharge η_d (équation (1.3)) est le rapport entre l'énergie déchargée $E_{déchargée}$ et l'énergie chargée $E_{chargée}$. Ces indicateurs n'ont pas la même utilité selon la période sur laquelle ils sont appliqués. Par exemple, Piché (2021) a montré que l'efficacité de décharge pouvait être très variable pendant la saison si elle était calculée hebdomadairement : elle varie entre 0% et 530% en fonction des températures. En effet, une semaine chaude fera l'objet de beaucoup de charge mais peu de décharge, ce qui se traduira par une efficacité de décharge faible. À l'inverse, lors d'une semaine froide, il peut y avoir plus de décharge que de charge, entraînant une efficacité de décharge supérieure à 100%

Une autre approche, utilisée par certains auteurs (Bazgaou et al., 2020 ; Kim, Kim, Lee, & Heo, 2022), est d'utiliser l'objectif final du STE comme indicateur de performance, c. -à d., d'utiliser les économies énergétiques de chauffage ou de climatisation comme indicateur de performance.

Tableau 1.1 Indicateurs de performances des lits de roches

Variable d'étude	Équation ou description	Résultat	Référence
Impact sur la température intérieure	Écart de température nocturne avec une serre sans STE	Entre 5°C et 7°C	(Piché, 2021)
		10°C	(Kurklu et al., 2003)
		3°C	(Gourdo et al., 2019)
		Entre 2°C et 5°C	(Bazgaou et al., 2020)
		Entre 2,2°C et 2,6°C	(Bazgaou et al., 2018)
		Entre 5°C et 10°C	(Asa'd, Ugursal, & Ben-Abdallah, 2019)
	Écart de température nocturne avec l'extérieur	Entre 3°C et 5°C	(Bezari, Lalmi, & Babou, s.d.)
Coefficient de performance	$COP = \frac{E_{déchargée}}{E_{élec}} \quad (1.1)$	Hebdomadaire entre 0 et 3,6	(Piché, 2021)
Efficacité de charge	$\eta_c = \frac{E_{chargée}}{E_{disponible}} \quad (1.2)$	Hebdomadaire entre 5,1% et 18,8%	(Piché, 2021)
		8% sur 96h	(Bouhdjar et al., 1996)
		34% sur 4 mois	(Kurklu et al., 2003)
Efficacité de décharge	$\eta_d = \frac{E_{déchargée}}{E_{chargée}} \quad (1.3)$	Hebdomadaire entre 0% et 530%	(Piché, 2021)
		80% sur 4 mois	(Kurklu et al., 2003)
Économies d'énergie de chauffage	Différence de consommation énergétique liée au chauffage entre avant et après l'installation du STE	Entre 75% et 100% d'économie par jours sur 10 jours	(Bazgaou et al., 2020)

Cette section a montré que les indicateurs de performances utilisés dans la littérature étaient variés et qu'il n'y avait pas de consensus pour leur utilisation, en particulier dans l'objectif de comparer des solutions équivalentes pour des applications différentes. Souvent, la comparaison des performances de la serre (température nocturne et consommation énergétique) est effectuée avant et après l'installation d'un système de stockage d'énergie.

1.2 Modèles numériques associés aux systèmes de stockage thermique

Les modèles numériques peuvent simuler plusieurs types de systèmes et être étudiés selon plusieurs variables. Dans une majorité de cas, le modèle numérique d'un système doit être calibré à l'aide de données mesurées afin de simuler avec précision le comportement du système.

1.2.1 Modèles de serres

La modélisation de l'air intérieur de la serre peut être réalisée par l'utilisation de logiciels de mécanique des fluides numérique (MFN) permettant la discrétisation du volume d'air (Dhiman, Sethi, Singh, & Sharma, 2019). Mais les modèles liés à la MFN sont coûteux en temps de calcul, ce qui réduit les fenêtres temporelles de simulation. L'hypothèse adaptée dans le cas d'une étude énergétique saisonnière de serre est alors de considérer le volume de la serre comme une cuve parfaitement brassée, et de définir un modèle nodal se composant d'un ensemble de systèmes considérés à température uniforme et échangeant entre eux. Le modèle consiste alors à calculer les bilans thermiques sur chaque nœud.

Le développement de ce type de modèles a commencé avec Bot (1983), qui a créé un premier modèle de serre. Les recherches sur le développement de modèles n'ont pas arrêté depuis, car trois leviers favorisent les efforts pour obtenir un modèle précis, applicable à toutes les serres : les premiers modèles étaient pour simuler une serre donnée et les avancées technologiques intégrées aux serres doivent être incluses aux modèles déjà existants. Ainsi, le modèle de Bot a pu être amélioré notamment par les travaux de Kurata (1991) sur la transmissivité du matériau d'enveloppe, de Boulard et Baille (1995) pour leurs travaux sur la ventilation.

Par la suite, De Zwart (1996) a proposé un modèle de serre nommé KASPRO permettant de simuler une serre Venlo en prenant en compte des systèmes de chauffage ainsi que de stockage thermique avec un pas de temps d'une minute. Son modèle a été validé pour une utilisation avec un pas de temps de 10 minutes ou une analyse quotidienne, ce qui permet notamment d'étudier les possibilités d'économies d'énergie de systèmes énergétiques additionnels.

Ces modèles ont par la suite été adaptés afin d'améliorer le contrôle d'une serre par Luo (2005) qui a développé un modèle KASPRO validé avec une erreur standard maximale de 1,5°C dans le cadre d'une serre Venlo dans un climat de Chine subtropicale.

Vanthoor (2011) a adapté les modèles de de Zwart (1996) et de Bot (1983) pour développer un modèle de serre valide pour plusieurs architectures de serre et plusieurs climats (climat tempéré, méditerranéen et semi-aride) tel que représenté sur la Figure 1.3.

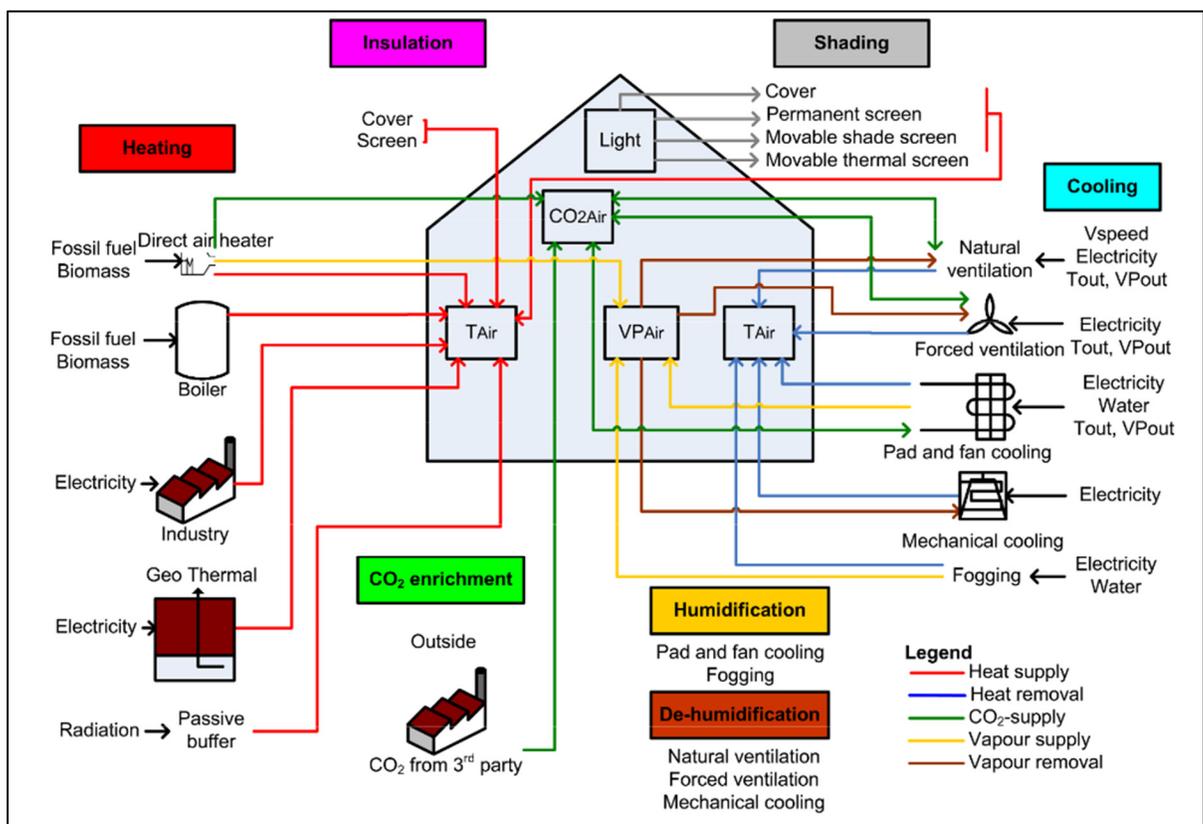


Figure 1.3 Modèle nodal de serre
Tirée de Vanthoor (2011, p.23)

Comme discuté précédemment et illustré sur la Figure 1.3, un modèle nodal de serre consiste à considérer l'air intérieur (parfois discrétisé en plusieurs nœuds horizontaux) comme ayant une température uniforme et à résoudre le bilan énergétique sur l'ensemble du volume d'air.

La résolution de ce bilan passe par la considération d'autres nœuds à température uniforme échangeant avec l'air :

- La canopée
- L'enveloppe
- Le sol
- L'air extérieur

Avec ces nœuds sont échangés différents types de flux thermiques :

- Échanges convectifs
- Échanges radiatifs
- Échanges conductifs
- Échanges massiques d'humidité

Le modèle de Vanthoor (2011) est devenu le modèle de référence pour l'utilisation de modèles de serre, et a notamment été repris par Altes-Buch (2019) pour la création de la modélisation de serre avec le langage Modelica. Cette librairie a été adaptée par Piché (2021) qui créa un sous-modèle de serre applicable à un projet de stockage thermique de l'énergie. Ce sous-modèle, dont l'erreur quadratique moyenne a été évaluée à 1,53°C sur la température intérieure de la serre, sera détaillé dans la section 3.2.2.

1.2.2 Modèles de systèmes de stockage thermique

Les systèmes de stockage thermique nécessitent d'être modélisés pour être intégrés à des modèles thermiques de systèmes solaires (Coutier & Farber, 1982). Plusieurs stratégies de modélisation existent et permettent de s'adapter aux différents choix technologiques de stockage (notamment la nature des matériaux caloporteurs et de stockage) : Esence (2017) a scindé ces stratégies en deux groupes : les modèles négligeant les gradients présents dans le matériau solide du STE, et les modèles prenant en compte ces gradients. Dans le premier groupe, cinq types de modèles existent :

- 1) Le modèle de Schumann (1929) est le premier modèle à avoir été développé et est à l'origine du reste des modèles de cette famille. Il consiste en deux équations différentielles régissant la température de chacun des matériaux du système considérés à température uniforme dans le plan orthogonal au sens du fluide : une équation pour le matériau gazeux ou liquide (1.4) et une équation pour le matériau solide (1.5).
- 2) Des modèles simplifiés développés par Vortmeyer et Schaefer (1974) considèrent une équation unique régissant la température des deux matériaux en négligeant une des composantes des équations de Schumann (1929);
- 3) Un modèle de STE à perturbation a été adapté par Votyakov et Bonanos (2014) permettant d'être plus précis que le modèle à un matériau, mais s'appliquant à moins de situations;
- 4) Un modèle à trois matériaux comprenant les parois entourant le STE a été proposé par Beasley et Clark (1984) et a permis de mettre en évidence l'impact thermique de ses parois;
- 5) Des modèles à deux dimensions (Klein, Roos, & Sheer, 2014) permettent de prendre en compte le comportement thermique du lit selon l'axe de déplacement du fluide, ainsi que dans son axe longitudinal.

Les équations du modèle de Schumann (1929) dont découlent le reste des modèles discutés plus haut sont les suivantes :

$$\varepsilon \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\dot{m}_f \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + H \cdot a \cdot (T_s - T_f) \quad (1.4)$$

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = H \cdot a \cdot (T_f - T_s) \quad (1.5)$$

Dans ces équations, ε représente la fraction de vide du lit, ρ_f et ρ_s désignent la masse volumique du fluide et du solide, c_f et c_s leur capacité thermique massique, T_f et T_s leur température, \dot{m}_f est le débit massique de fluide par unité de surface normale, H est le coefficient de transfert entre le fluide et le solide et a est la surface de contact entre les deux matériaux par unité de volume.

Les performances de ces modèles ont été étudiées par Ismail et Stuginsky Jr (1999) et ont montré que le modèle de Schumann (1929) avait le meilleur rapport entre précision et temps de résolution numérique. Piché (2021) a adapté ce modèle avec le logiciel OpenModelica en le transformant en un modèle discret permettant de modéliser les températures au sein de

mailles réparties le long de l'axe du lit de roches. Ce modèle a été calibré avec une erreur quadratique moyenne de $0,71^{\circ}\text{C}$ sur la température de l'air en sortie de système de stockage.

Dans le cadre de la modélisation des lits de roches, les auteurs considèrent un modèle à deux matériaux et adiabatique (Coutier & Farber, 1982 ; Garzoli, 1989 ; Piché, 2021). Il n'existe en revanche pas de modèle numérique de l'ensemble formé par une serre et un STE-LR dans la littérature.

1.3 Calibration

La calibration d'un modèle numérique fait référence au processus d'ajustement des paramètres ou des variables d'un modèle pour qu'ils correspondent aux données ou aux observations réelles. Cela implique généralement de trouver les valeurs optimales des paramètres du modèle afin qu'il puisse fournir des prédictions ou des résultats qui sont cohérents avec les mesures réelles ou les observations expérimentales. La calibration est essentielle pour obtenir des prédictions précises et fiables, ainsi que pour évaluer la performance et la validité du modèle. Elle permet d'améliorer la confiance dans les résultats et leur pertinence pour les applications pratiques.

Le processus de calibration peut être manuel ou automatisé, en fonction du nombre de paramètres à calibrer (Baba, Ge, Zmeureanu, & Wang, 2022). La calibration manuelle s'appuie sur un processus d'essai-erreur par le scientifique couplé à une étude critique des résultats afin d'améliorer les résultats de la calibration. D'un côté, les processus manuels se basent sur une approche analytique du problème. Cette approche peut prendre la forme de techniques de caractérisation, graphiques, de simplification du modèle ou d'extensions procédurales. De l'autre côté, les méthodes automatiques se basent sur des techniques d'optimisation ou alternatives. Les techniques d'optimisation sont basées sur une analyse bayésienne ou sur des algorithmes évolutionnaires. (Coakley, Raftery, & Keane, 2014)

La calibration d'un modèle numérique de serre est peu étudiée : seul Guzman-Cruz (2009) a publié un article à ce sujet. Lopez-Cruz (2018) a publié une revue sur les modèles de serre, parmi lesquels la majorité est calibrée (28 modèles sur les 30 répertoriés), mais les détails sur le processus de calibration ne sont pas fournis. En revanche, la calibration des modèles de bâtiments appliquée à la Simulation Thermique Dynamique (STD) est étudiée par de nombreux chercheurs : depuis 2002, 92 publications contiennent les termes « calibration », « building » et « model » dans leur titre. Coakley (2014) a conclu par sa revue de littérature sur la calibration des modèles de bâtiments qu'il n'y avait pas de consensus sur l'utilisation des différentes stratégies de calibration et que les auteurs restaient flous sur leurs choix. De plus, la calibration automatique appliquée à la STD fait face à de nombreux problèmes : pas de norme, coût de développement élevé, simplifications trop importantes, données d'entrée trop peu précises, incertitudes de mesure, interventions humaines mal identifiées, mais nécessaires.

Un paramètre à fixer lors d'une étude de calibration d'un modèle est la plage temporelle sur laquelle le modèle va être calibré. Comme discuté précédemment, les modèles de serres ont le plus souvent vocation à être exploités sur un cas particulier (une serre donnée dans un climat donné). De plus, aucune norme ne régit la validation d'un modèle de serre. Ainsi, la plupart des modèles de serre sont calibrés sur quelques jours (Chen et al., 2016 ; Guzmán-Cruz et al., 2009 ; Lu et al., 2017) contrairement aux modèles de bâtiments qui sont calibrés sur des temps représentatifs d'une année entière. Lorsqu'un modèle pouvant être utilisé dans plusieurs cas de figure est recherché, les calibrations sont réalisées sur des périodes présentant des dynamiques thermiques plus variées. Par exemple, Vanthoor (2011) a validé son modèle de serre dans le cas de trois climats différents (un climat tempéré océanique, méditerranéen et semi-aride) sur des périodes de 5 jours pour chaque climat.

Parmi les solutions automatiques, l'analyse bayésienne consiste à calculer une probabilité de distribution des solutions par inférence statistique utilisée pour les méta-modèles fiable et plus complet que la méthode déterministe. Les algorithmes évolutionnaires, introduits par Rechenberg (1994) sont adaptés aux problèmes longs à résoudre, car ont besoin de peu d'itérations pour atteindre une solution de haute qualité, en particulier les algorithmes

génétiques (Baba et al., 2022). La calibration par algorithmes d'optimisation est alors adaptée pour les problèmes de calibration de modèles de bâtiments comme en a conclu Chong (2021).

Un processus de calibration débute généralement par une étude de sensibilité permettant de choisir les paramètres à calibrer. Ensuite, un algorithme de calibration est utilisé afin de définir les valeurs des paramètres menant à la simulation la plus proche de la réalité. Enfin, une étude de validation permet de confirmer la justesse des résultats, généralement en testant le modèle calibré sur un autre jeu de données.

1.3.1 Étude de sensibilité

L'étude de sensibilité d'un modèle numérique vise à analyser l'influence des variations des paramètres d'entrée sur les résultats du modèle. Elle permet d'identifier les paramètres clés, de quantifier la variabilité des sorties, d'optimiser les paramètres, de simplifier le modèle et d'évaluer sa robustesse. En comprenant comment les paramètres affectent les résultats, il est possible de hiérarchiser leur importance, réduire l'incertitude, améliorer les performances du modèle et prendre des décisions plus éclairées basées sur une évaluation solide de sa fiabilité. L'étude de sensibilité doit être adaptée au processus de calibration qui la suivra : il faut évaluer la sensibilité des paramètres par rapport à l'indicateur utilisé plus tard pendant la calibration. Ainsi, la sensibilité sera calculée en observant l'impact des variations des paramètres sur l'erreur quadratique moyenne de la température intérieure de la serre.

Dans le cas des études énergétiques de bâtiments, Lam & Hui (Lam & Hui, 1996) ont proposé plusieurs manières d'évaluer la sensibilité des paramètres d'un modèle selon un critère choisi, dont le Coefficient de Sensibilité (CS) défini par l'équation (1.6).

$$CS = \frac{(OP_m - OP_{bc})/OP_{bc}}{(IP_m - IP_{bc})/IP_{bc}} \quad (1.6)$$

Le coefficient de sensibilité CS est défini comme le pourcentage de variation du résultat de la simulation par rapport au pourcentage de variation du paramètre d'entrée. La valeur de la

variable de sortie considérée obtenue pour la valeur modifiée du paramètre évalué est représentée par OP_m , tandis que OP_{bc} est la valeur de la variable de sortie considérée obtenue avec la valeur initiale du paramètre évalué. IP_m et IP_{bc} représentent respectivement la valeur modifiée et la valeur initiale du paramètre incertain évalué.

Dans le cas de la calibration d'un modèle de serre, Vanthoor (2011) utilise une variation de 10% de la valeur IP_{bc} des paramètres pour obtenir leur valeur IP_m .

1.3.2 Algorithmes d'optimisation appliqués à la calibration

Comme vu précédemment, les algorithmes d'optimisation sont adaptés à la calibration d'un modèle de bâtiment par leur capacité à trouver rapidement une solution à un problème complexe.

Les algorithmes d'optimisation les plus répandus sont dits « à recherche directe » : l'algorithme de Nelder et Mead est adapté d'une méthode du simplexe basée sur un polyèdre dont les sommets représentent des solutions possibles et dans lequel l'algorithme va former un chemin vers le sommet représentant la meilleure solution; l'algorithme de Hooke et Jeeves qui débute par une phase d'exploration de l'espace de recherche, les algorithmes génétiques (Goldberg, 1989) inspirés du processus d'évolution naturelle basé sur la notion de sélection naturelle, de reproduction et de mutation des individus au sein d'une population et les algorithmes avec stratégies d'évolution (Rechenberg, 1994). Ces algorithmes fonctionnent par la création d'un vecteur solution qui doit ensuite être évalué pour décider de le garder ou non. Si le nouveau vecteur permet de réduire la fonction coût, il est gardé, et il est exclu dans le cas opposé. Malgré des garde-fous implémentés dans les algorithmes (mutations par exemple), la campagne de calibration risque de mener à un extremum local de la fonction coût.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont utilisé ces algorithmes afin de calibrer des modèles de serre ou de bâtiments (Baptista, Bailey, Meneses, & Navas, 2010 ; Chen et al., 2016 ; Guzmán-Cruz et al., 2009).

L'algorithme d'Évolution Différentielle de Storn & Price (1997) a été adapté d'un algorithme génétique avec la capacité des méthodes du Simplexe à explorer l'espace de recherche en introduisant la différence entre deux vecteurs solutions dans la stratégie de création de nouveaux vecteurs à tester. Cette stratégie permet alors de réduire les risques d'atteindre un extremum local. Cet algorithme est décrit ci-dessous :

- 1) Initialisation : l'algorithme d'évolution différentielle commence par générer une population initiale de vecteurs de paramètres. Chaque vecteur représente un candidat potentiel dans l'espace de recherche. La taille et la composition de la population sont définies par l'utilisateur.
- 2) Mutation : Pour chaque vecteur de la population, la mutation est appliquée pour créer un vecteur mutant. La mutation est réalisée en combinant les vecteurs existants dans la population. Pour cela, on choisit trois vecteurs de la population et on les combine en utilisant l'équation (1.7) :

$$m_{i,G} = x_{i,G} + F \cdot (x_{a,G} - x_{b,G}) \quad (1.7)$$

Le vecteur mutant est constitué d'un vecteur $x_{i,G}$ et d'une portion F de la différence entre deux vecteurs $x_{a,G}$ et $x_{b,G}$. Le choix des vecteurs i , a et b dépend de la stratégie adoptée;

- 3) Recombinaison : La recombinaison est ensuite appliquée entre le vecteur mutant et le vecteur original pour produire un vecteur de test. La recombinaison est généralement réalisée en utilisant un opérateur de croisement tel que le croisement uniforme ou le croisement exponentiel.
- 4) Sélection : La fonction objectif est évaluée pour le vecteur de test. Si le vecteur de test est meilleur que le vecteur original, il est sélectionné pour la génération suivante. Sinon, le vecteur original est conservé.
- 5) Remplacement : Le processus de sélection est répété pour chaque vecteur de la population, garantissant que seuls les vecteurs les plus performants sont conservés dans la population suivante.
- 6) Critère d'arrêt : L'algorithme continue à faire évoluer la population en répétant les étapes 2 à 5 jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. Ce critère peut être le nombre maximal d'itérations, la convergence de la population ou l'atteinte d'une valeur minimale pour la fonction-objectif.

1.3.3 Calibration multi-objectif

Il a été vu plus tôt que plusieurs objectifs pouvaient être visés par l'utilisation d'un modèle numérique. Dans le cas d'un bâtiment, il peut être attendu de simuler avec précision la température dans plusieurs pièces. Il est alors nécessaire de calibrer les modèles en prenant en compte plusieurs critères. Dans ce but, la calibration multicritère est une possibilité.

Premièrement, des algorithmes de calibration acceptant plusieurs critères sont disponibles et appelés Multi-Objective Genetic Algorithms (MOGA). Ces algorithmes définissent un front de Pareto (une manière d'améliorer un des critères sans en dégrader un autre) pour choisir une solution qui maximise la précision sur l'ensemble des critères. Le plus utilisé est le Non-Dominating Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) (Baba et al., 2022). Deuxièmement, une adaptation de la fonction objectif peut être envisagée : Tap (2000) propose pour la calibration d'une serre un indicateur composite $RMSE_{multi}$ formé d'une somme pondérée d'indicateurs $RMSE_i$ par un poids w_i et défini dans l'équation (1.8). Guzmán-Cruz (2009) a réutilisé cette technique pour la calibration d'un modèle de serre basée sur des algorithmes évolutionnaires.

$$RMSE_{multi} = w_{min} * RMSE_{min} + w_{moy} * RMSE_{moy} + w_{max} * RMSE_{max} \quad (1.8)$$

Cette revue de la littérature avait comme sujet l'étude expérimentale et numérique des serres couplées à des STE. Ces systèmes de stockage se répartissent en trois catégories : les systèmes de stockage latents, sensibles et thermochimiques. Les systèmes de stockage étudiés peuvent être instrumentés et étudiés expérimentalement selon plusieurs indicateurs de performances liés aux énergies mises en jeu ou à l'impact sur la température de la serre, cette deuxième étude étant plus simple à mettre en œuvre, mais permettant uniquement la comparaison avec la même serre avant la mise en place du système de stockage. Dans le cadre d'études numériques, des modèles de STE sont développés, mais peu souvent couplés à des modèles de serres. Les modèles de serres sont calibrés, mais un consensus n'a pas été trouvé par la communauté scientifique à propos des conditions de calibration : plages temporelles, précision attendue et validation des modèles.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

L'objectif de ce mémoire est d'obtenir un modèle numérique d'une serre liée à un système de stockage de l'énergie à lit de roches. Un aperçu de la démarche pour obtenir un modèle numérique valide est présenté dans la Figure 2.1. Cette démarche s'appuie sur le travail réalisé par Piché (2021) et présenté en gris dans la figure. Ce dernier a instrumenté une serre équipée d'un système de stockage thermique de l'énergie à lits de roches (STE-LR) et développé deux sous-modèles calibrés : un sous-modèle de serre et un sous-modèle de stockage. Ce projet de maîtrise, en blanc dans la figure, est réalisé en continuité de cette thèse.

La méthodologie permettant d'obtenir un modèle numérique valide s'appuie sur un processus itératif d'ajustement des modèles numériques. Une fois les sous-modèles couplés, une phase d'analyse initiale permet de définir les problématiques empêchant la validité du modèle Serre-Lit de Roches (SLR). Une phase d'ajustement débute avec la modification d'un sous-modèle ou du modèle SLR, suivie d'une analyse des simulations obtenues après ajustements. Si les simulations sont en adéquation avec les mesures réalisées, le modèle peut être validé. Si non, une nouvelle phase d'ajustement doit être menée.

La méthodologie présentera l'étape de couplage numérique des sous-modèles existants dans la section 2.1. La section 2.3 permettra de présenter la première phase d'ajustement menée : une calibration des modèles numériques. La deuxième phase d'ajustement, qui consiste en l'analyse énergétique et la modification du sous-modèle de stockage sera abordée dans la section 2.4.

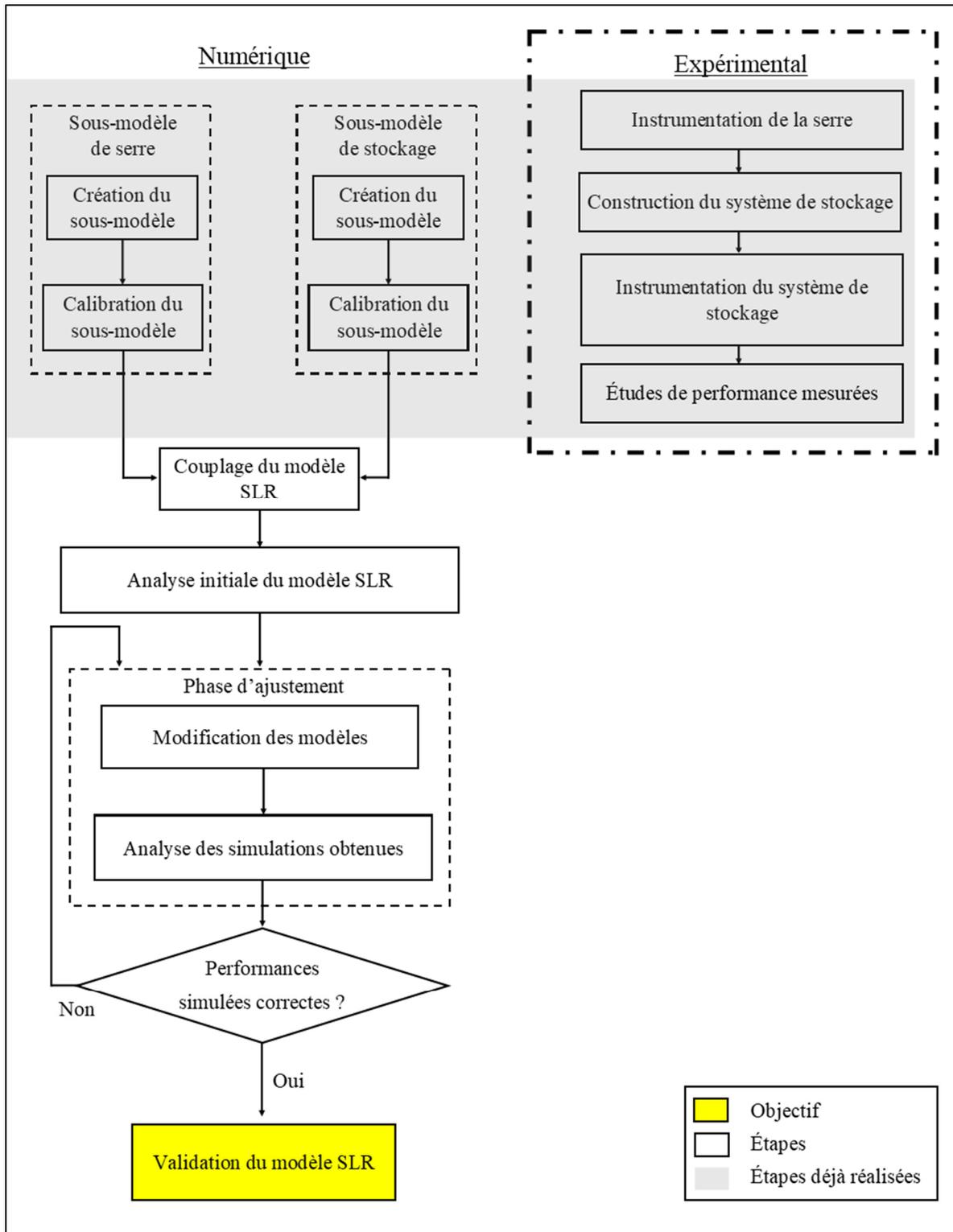


Figure 2.1 Démarche d'obtention d'un modèle numérique de serre incluant un STE-LR

2.1 Couplage du modèle SLR

Les travaux de Piché (2021) ont permis d'obtenir un modèle de serre et un modèle de système de stockage numériques indépendants. En premier lieu, le modèle de serre permet de simuler les conditions intérieures de la serre impactée par des conditions extérieures connues. En second lieu, le modèle de stockage vise à estimer la température de l'air et des roches dans le STE, qui dépendent de la température donnée en entrée du stockage. Le modèle permet alors de simuler les flux thermiques échangés entre le système de stockage et l'espace auquel il est lié, qui dépendent de la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie du STE.

Le couplage de ces sous-modèles fait l'objet du CHAPITRE 3. Le modèle Serre-Lit de Roches (SLR) permettra de simuler l'interaction entre la serre et le STE, afin d'estimer la température intérieure de la serre ainsi que les échanges thermiques avec le système de stockage, permettant de faire les études de performances du système. Une fois le modèle numérique obtenu, il est nécessaire d'analyser la précision de ses simulations.

2.2 Analyse initiale du modèle

Le premier stade d'analyse sera qualitatif : l'observation du comportement thermique (températures et flux thermiques) du système SLR par rapport aux conditions extérieures (ressource solaire, température extérieure) permettra de définir les points d'attention pour l'analyse du modèle.

Le second stade d'analyse sera basé sur des données agrégées sur une période de 24 heures et appelées « températures types » : les températures minimales, moyennes et maximales sur une journée. Elles permettent ainsi de s'affranchir des événements de court terme, comme l'ouverture d'une porte de la serre. De plus, elles permettent d'évaluer les conditions intérieures fournies aux plantes, car elles sont sensibles aux variations de température et aux températures extrêmes atteintes lors de leur croissance. En effet, la température idéale pour la croissance d'une espèce de plante n'est pas seulement une température minimale, c'est en

réalité une plage thermique constituée d'une température minimale et d'une maximale (Tiwari, 2003). Elles seront comparées avec les températures types mesurées afin de commenter la fiabilité des simulations sur des périodes représentatives de la période d'utilisation de la serre :

- Le début de saison, du 11 au 31 mai 2020;
- Le milieu de saison, du 11 au 31 juillet 2022;
- La fin de saison, du 11 au 30 septembre 2021.

Ces stratégies d'analyse seront également utilisées à la fin des phases d'ajustement des modèles numériques afin de valider ou non le modèle de l'ensemble serre-lit de roches obtenu. Les phases d'ajustement du modèle sont représentées sur la Figure 2.2 et sont détaillées dans les sections 2.3 et 2.4.

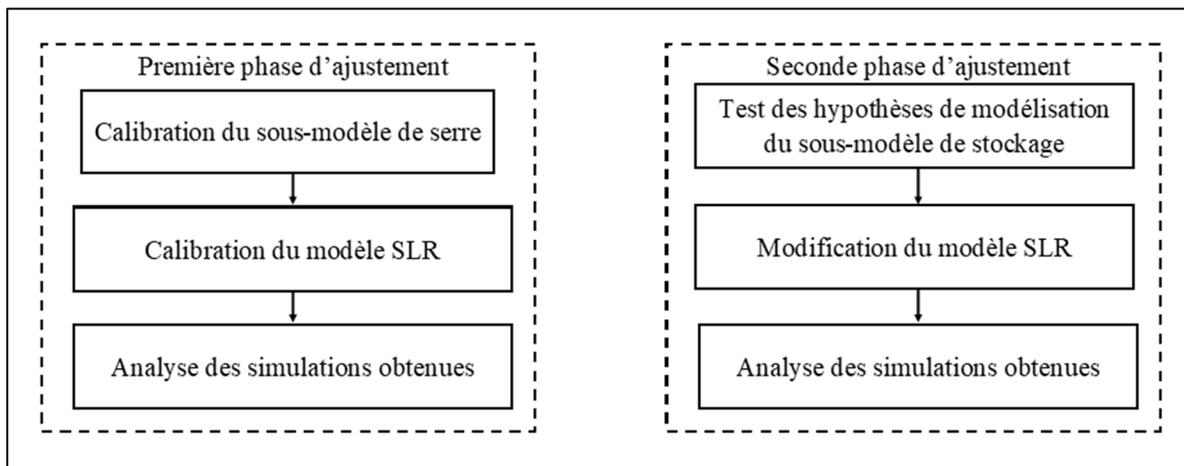


Figure 2.2 Phases d'ajustement du modèle numérique

2.3 Première phase d'ajustement : calibration du sous-modèle de serre et du modèle SLR

Un modèle de serre met en jeu un grand nombre de flux physiques dont les composantes sont parfois difficiles à évaluer. Ces caractéristiques physiques sont incertaines, car elles peuvent varier dans le temps (vieillesse de l'enveloppe de la serre, croissance des plantes) ou dépendre des caractéristiques du système (taille des roches du lit, caractéristiques thermiques des roches utilisées, etc.).

Afin de tenter de valider le modèle SLR - couplage de la serre et du système de stockage - il est nécessaire de comparer le comportement du système simulé avec son comportement réel. Une instrumentation menée par Piché (2021) et détaillée dans la section 3.1 a permis d'avoir accès aux données thermiques du système, qui permettront de calibrer et valider le modèle.

Un processus de calibration des modèles est mené dans le CHAPITRE 4 à l'aide d'un algorithme détaillé dans la section 1.3.2. Le processus de calibration vise à fixer les paramètres incertains en comparant les résultats simulés par le modèle avec les données mesurées dans la serre étudiée grâce à l'instrumentation menée antérieurement. L'algorithme de calibration, en faisant varier les valeurs des paramètres incertains, va proposer un ensemble de valeurs pour ces paramètres minimisant l'écart avec les mesures. Une plage de variation acceptable est à renseigner pour chaque paramètre. Les plages définies par Piché (2021) seront utilisées pour ce travail.

L'étude de sensibilité du modèle est menée avec l'utilisation du coefficient de sensibilité défini par l'équation (1.6). Cette étude de sensibilité permettra de sélectionner les paramètres à calibrer.

L'indicateur de performance choisi pour calibrer le modèle est l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée par l'équation (2.1) en évaluant cette performance selon la température intérieure de la serre T_{int} .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - m_i)^2} \quad (2.1)$$

Dans cette équation, N représente le nombre de valeurs, s_i la valeur simulée et m_i la valeur mesurée à l'instant i .

Le modèle SLR sera calibré avec l'aide d'un algorithme issu de la librairie Scipy adapté d'un algorithme génétique et nommé Évolution Différentielle (ÉD) (Storn & Price, 1997). Un algorithme génétique permet de calibrer un modèle de bâtiment avec précision et rapidité (Baba et al., 2022) en s'inspirant de la génétique (Goldberg, 1989).

L'algorithme d'évolution différentielle est paramétré de manière à joindre rapidité de convergence et augmentation de l'espace de recherche afin de réduire les risques de converger vers un minimum local. La stratégie de mutation est la « best1bin » qui crée les vecteurs mutés de la génération $G+1$ selon l'équation (2.2).

$$m_{i,G} = x_{best,G} + F \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (2.2)$$

Où $x_{i,G+1}$ représente le $i^{\text{ème}}$ individu de la génération $G+1$, où $x_{best,G}$ est le meilleur individu de la génération G , où F représente la valeur de mutation permettant de croiser deux individus choisis aléatoirement. Par la suite, une étape de « crossover » permet de réaliser un croisement entre les vecteurs initiaux de la génération G et les vecteurs mutés obtenus pendant l'étape de mutation.

Dans ce travail, les simulations menées par l'algorithme de calibration pour le modèle SLR couvrent toute la saison : elles vont du 31 mai 2019 au 25 octobre 2019 avec un pas de temps de 10 minutes.

2.4 Seconde phase d'ajustement : tests de simulation du STE et modification du sous-modèle de stockage

La première phase d'ajustement n'ayant pas mené à la validation du modèle SLR, une nouvelle stratégie d'ajustement basée sur l'analyse énergétique du sous-modèle de stockage sera menée. Cette phase se déroule en deux étapes distinctes abordées par le CHAPITRE 5 et le CHAPITRE 6.

Premièrement, le sous-modèle de stockage sera étudié sans le coupler au sous-modèle de serre dans le CHAPITRE 5. L'analyse de l'énergie absorbée par le STE pendant une saison grâce à l'Énergie Advective Nette Absorbée (ÉANA) définie dans la section 3.3 sera réalisée. Cette énergie représente la différence entre l'énergie étant rentrée et sortie dans le STE par l'intermédiaire du flux d'air lorsque le STE est en marche. Cette démarche permettra de mettre en lumière le manque de prise en compte de l'impact de la terre de culture sur le comportement du STE grâce à plusieurs hypothèses de simulation du STE-LR.

Deuxièmement, l'hypothèse de simulation choisie dans le CHAPITRE 5 sera ajoutée au modèle SLR dans le CHAPITRE 6, ainsi que d'autres ajustements thermiques (gabions, ventilation...). La validité du modèle SLR sera ensuite étudiée grâce à l'étude approfondie des simulations obtenues par le modèle SLR ajusté pendant la seconde phase. Les températures types simulées et mesurées seront comparées. Les indicateurs énergétiques utilisés par Piché (2021) et détaillés dans la section 1.1.2 seront également appliqués au modèle SLR. Le coefficient de performance (équation (1.1)) est le rapport entre l'énergie déchargée par le STE et l'énergie électrique nécessaire à son fonctionnement. L'efficacité de charge (équation (1.2)) est le rapport entre l'énergie chargée et l'énergie solaire impactant la serre. Enfin, l'efficacité de décharge (équation (1.3)) est le rapport entre l'énergie déchargée et l'énergie chargée. Le calcul des énergies chargées et déchargées sera défini dans la section 3.3.

CHAPITRE 3

CAS D'ÉTUDE : DESCRIPTION, MODÈLES NUMÉRIQUES ET ANALYSES INITIALES

Ce chapitre porte sur le cas d'étude de Kuujjuaq et le couplage des sous-modèles numériques de la serre et du système de stockage thermique de l'énergie. Dans un premier temps la serre ainsi que le système de stockage thermique qui lui a été ajouté sont décrits. Dans un deuxième temps, les sous-modèles numériques de serre et de stockage sont présentés. Le couplage des sous-modèles est présenté dans une troisième section en explicitant les flux échangés entre les deux sous-modèles ainsi que les données d'entrée et de sortie. Dans un quatrième temps, l'analyse du modèle SLR afin de définir les ajustements à lui apporter.

3.1 Cas d'étude de Kuujjuaq

Ce travail s'inscrit dans un projet d'amélioration du comportement thermique d'une serre communautaire à Kuujjuaq (58°06'N, 68°24'O), ville située au nord du Québec, qui sert de cas d'étude aux travaux réalisés. Kuujjuaq est un des 14 villages du Nunavik, le territoire du nord du Québec, qui réunit les terres situées au-delà du 55^{ème} parallèle. Le village abritait 2825 habitants en 2023 (MAMH, 2023) et deux serres communautaires d'environ 140m² chacune. La surface de culture est divisée en plusieurs parcelles attribuées aux habitants qui le réclament, et sont exploitées librement.

En France, le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) développe des Observatoires Hommes-Milieu (OHM) locaux ou internationaux (OHMi). Parmi ces derniers, l'OHMi Nunavik étudie les aspects sociaux-économiques du lien entre les populations locales, le changement climatique et l'application du Plan Nord visant à développer économiquement les régions nordiques québécoises. Le Laboratoire d'Excellence « Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieu » finance les travaux des OHM à travers des Appels à Projets de Recherche (APR). L'APR Siqiniq vise à étudier l'aspect

énergétique des serres concernées par l’OHMi Nunavik afin d’améliorer les conditions de culture sur ces terres où le climat local et l’accès difficile à l’énergie rend compliqué le développement de la serriculture.

Dans ce cadre, la plus récente des deux serres de Kuujjuaq, construite en 2013, a été instrumentée en 2016 afin d’étudier son comportement thermique pour définir les possibilités d’amélioration. La serre et son comportement initial sont développés dans la section 3.1.1. L’analyse des résultats a mené à la création d’un projet d’installation d’un système de stockage de l’énergie à lits de roches. Le système de stockage a été construit et instrumenté en novembre 2018. Il est présenté dans la section 3.1.2.

3.1.1 Serre

Les caractéristiques de la serre la plus récente, et dont il sera question dans la suite de ce travail, sont réunies dans le Tableau 3.2. Les cultures, réalisées par les habitants grâce à des parcelles attribuées gratuitement, se composaient de légumes verts dits « froids » (bok choy, laitue, courgettes) cultivés de fin mai à fin septembre. La serre est visible sur la Figure 3.2.

Dans une volonté d’améliorer le comportement thermique de la serre la plus récente, une campagne d’instrumentation a été menée en 2017 afin d’analyser les variables liées aux conditions intérieures de la serre. Un pyranomètre (P1 sur la Figure 3.1) et 9 capteurs de température et d’humidité (T1 à T9 sur la Figure 3.1) ont été installés. Les détails des capteurs sont disponibles dans le Tableau 3.1 .

Tableau 3.1 Détails des capteurs de la serre

Capteur	Plage de mesure	Incertitude	Modèle	Fournisseur
Pyranomètre	0 à 2000 W.m ⁻²	20 W.m ⁻²	CMP3	Zipp & Konen
Thermomètre	-40 à 70°	1°C	DL-121TH	Voltcraft
Hygromètre	0 à 100%	3%	DL-121TH	Voltcraft

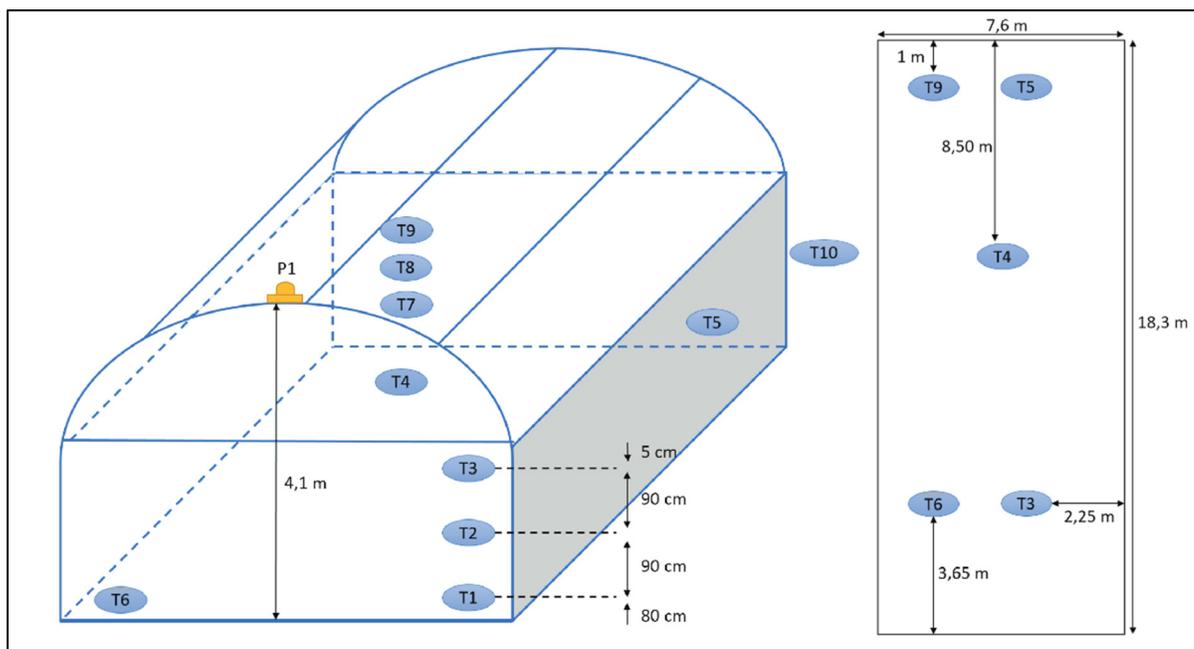


Figure 3.1 Placements des capteurs de l'instrumentation de la serre
Tirée de Piché (2021, p.50)



a)



b)

Figure 3.2 Vue extérieure (a) et intérieure (b) de la serre de Kuujjuaq

Tableau 3.2 Dimensions de la serre de Kuujjuaq

Géométrie de la serre	Quonset
Orientation de l'axe serre	Nord-Est / Sud-Ouest
Enveloppe de la serre	Polycarbonate alvéolé double vitrage
Dimension de la serre (L×l×H)	18,3 m × 7,6 m × 4,1 m
Surface totale de la serre	139 m ²
Surface de culture	87 m ²
Volume intérieur de la serre	448 m ³

3.1.2 Système de stockage thermique de l'énergie de Kuujjuaq

L'analyse initiale de la serre de Kuujjuaq ayant montré une ressource solaire suffisante, mais une baisse trop conséquente des températures nocturnes, il a été décidé la construction en 2018 d'un système de STE-LR (Piché, 2021), dont le fonctionnement est expliqué dans la section 1.1.1. Les caractéristiques du système de stockage de Kuujjuaq sont réunies dans le Tableau 3.3. Un des lits de roches partiellement rempli est visible sur la Figure 3.3a). La serre après installation du STE-LR est visible sur la Figure 3.3b).

Tableau 3.3 Caractéristiques du système de stockage de Kuujjuaq

Nombre lits	4
Dimensions lit (L×l×H)	8,7 m × 2,5 m × 0,3 m
Volume lit	6,525 m ³
Diamètre équivalent des roches	10 cm

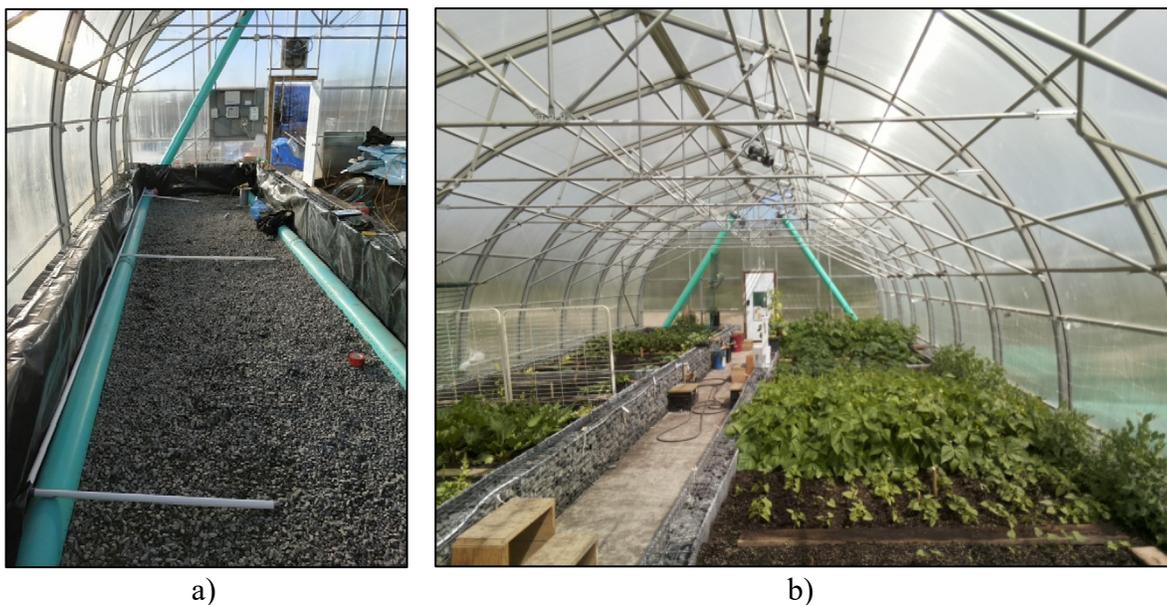


Figure 3.3 Lits de roches en cours de construction (a) et terminés (b) à Kuujjuaq

Dans le cas du projet de serre avec STE à Kuujjuaq, les deux systèmes ont déjà été instrumentés : les détails de la position et de la nature des capteurs sont disponibles dans Piché (2021). Pour l'analyse du STE dans la suite de ce travail, les cinq sondes de température de type PT100 dont la plage de mesure est $[-50^{\circ}\text{C}; 200^{\circ}\text{C}]$ et la précision est de $0,2^{\circ}\text{C}$, placées dans le lit de roches aux points 1 à 5 tel qu'illustré dans la Figure 3.4, seront utilisées. Ces sondes sont placées au bout des tuyaux gris visibles sur la Figure 3.3.

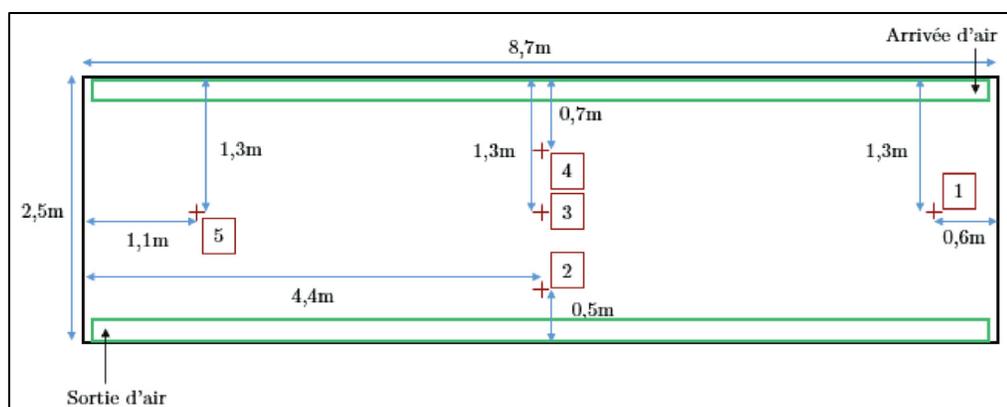


Figure 3.4 Placement des sondes de température dans le lit de roches de Kuujjuaq
Tirée de Piché (2021, p.87)

Cette instrumentation présente de nombreux enjeux d'utilisation des données colligées. Premièrement, il y a une incertitude sur la nature de la température mesurée par les cinq sondes placées dans le lit de roches : il est difficile de déterminer si elles donnent la température des roches, de l'air entre les roches, ou d'un mélange des deux. Deuxièmement, des interruptions d'alimentation dans la serre empêchent la collecte de données. Troisièmement, les Data Loggers (DL) donnant notamment la température en sortie de STE doivent être physiquement collectés à intervalle régulier. Enfin, des coupures de liaison à internet arrivent régulièrement et bloquent l'envoi de données.

3.2 Modèles numériques associés au cas d'étude de Kuujjuaq

Comme expliqué dans l'introduction, l'objectif de ce travail est de développer un modèle numérique de l'ensemble formé par la serre et le système de stockage pour le cas d'étude de Kuujjuaq. Les travaux de Piché (2021) ont permis de développer deux sous modèles numériques : un sous-modèle de serre et un sous-modèle de système de stockage. Les sous-modèles ont été développés grâce au langage de modélisation multiphysique Modelica et les simulations ont été réalisées avec le logiciel OpenModelica. Différentes hypothèses et stratégies de simulation ont été posées par Piché (2021) afin de simuler les échanges thermiques entre les différents sous-modèles. Les hypothèses de calcul et les données d'entrée et de sortie sont rappelées pour le sous-modèle de serre dans la section 3.2.1 et le sous-modèle de stockage est présenté dans la section 3.2.2.

3.2.1 Sous-modèle de serre

L'objectif principal de ce sous-modèle, représenté sur la Figure 3.6, est de simuler la température de l'air intérieur de la serre. Pour simuler la température de l'air intérieur, le modèle numérique est construit selon une approche nodale : la serre est divisée en sous-systèmes appelés « Nœuds » ou « volumes de contrôle » : l'air intérieur, l'enveloppe, la surface du sol et la canopée. Ces nœuds sont visibles sur la Figure 3.5 et sont considérés comme étant chacun à température uniforme. Ils échangent des flux thermiques et massiques, calculés

grâce à des bilans d'énergie et de masse sur chaque nœud. Les bilans thermiques sur chaque nœud n se réalisent alors par l'équation (3.1) :

$$m_n \cdot c_{p,n} \cdot \frac{dT_n}{dt} = \sum_{j \neq n} \dot{Q}_{jn} \quad (3.1)$$

Où l'évolution temporelle de la température du nœud $\frac{dT_n}{dt}$ dépend de la masse du nœud m_n , de sa capacité thermique massique $c_{p,n}$ et de la somme des flux thermiques des autres nœuds vers le nœud étudié \dot{Q}_{jn} .

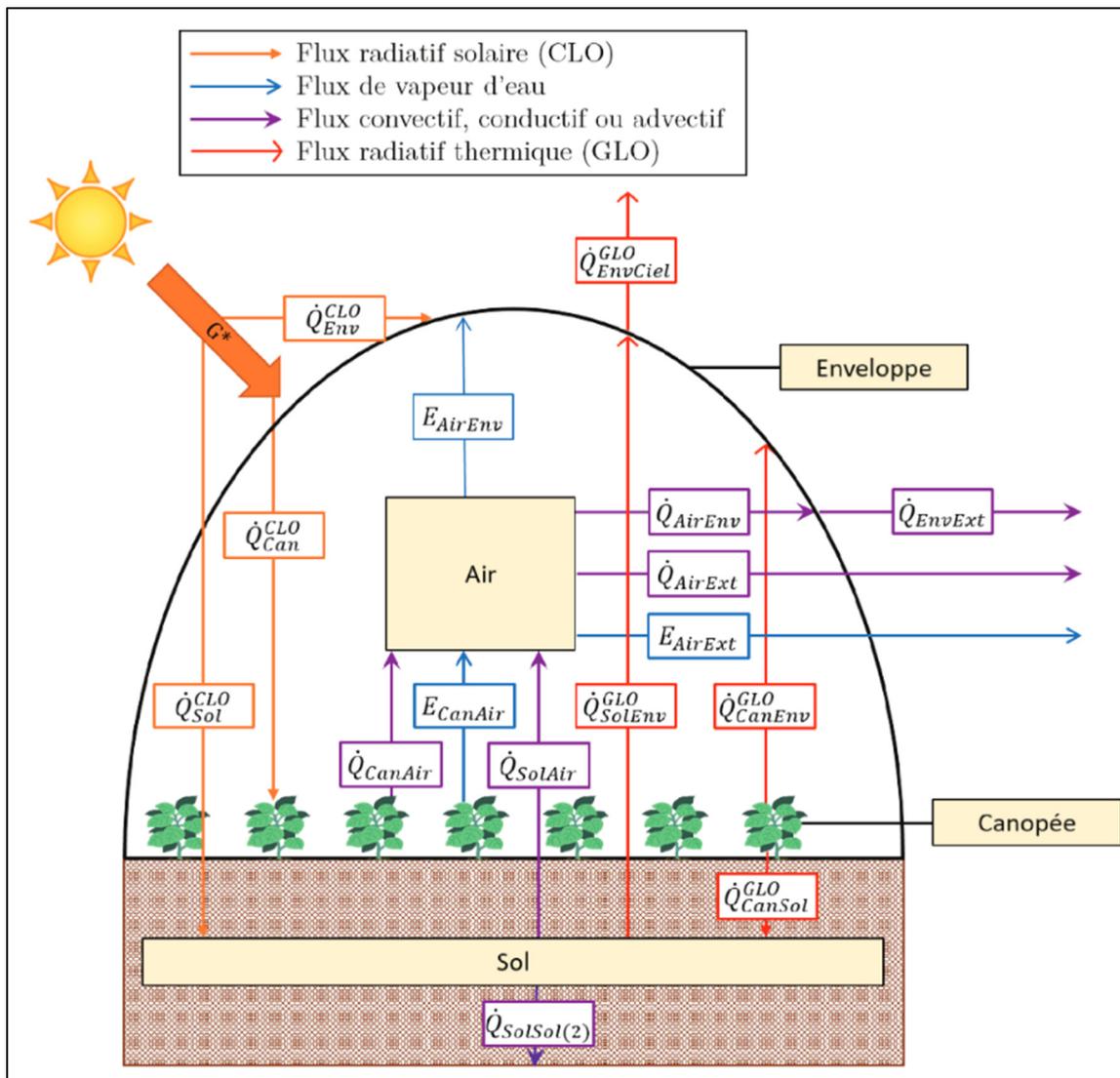


Figure 3.5 Modèle nodal de la serre
Tirée de Piché (2021, p.107)

Comme représenté sur la Figure 3.5, chaque nœud peut échanger avec les autres par l'intermédiaire de flux thermiques radiatifs infrarouges, convectifs et conductifs. Les nœuds échangent également de l'énergie liée à des changements d'états de l'eau (transpiration des plantes représentée par le terme E_{CanAir} dans la Figure 3.5 par exemple). De plus, la serre est en lien avec son environnement extérieur, ce qui nécessite de renseigner des conditions extérieures en entrée du modèle pour simuler les flux thermiques et la température intérieure, comme représenté sur la Figure 3.6.

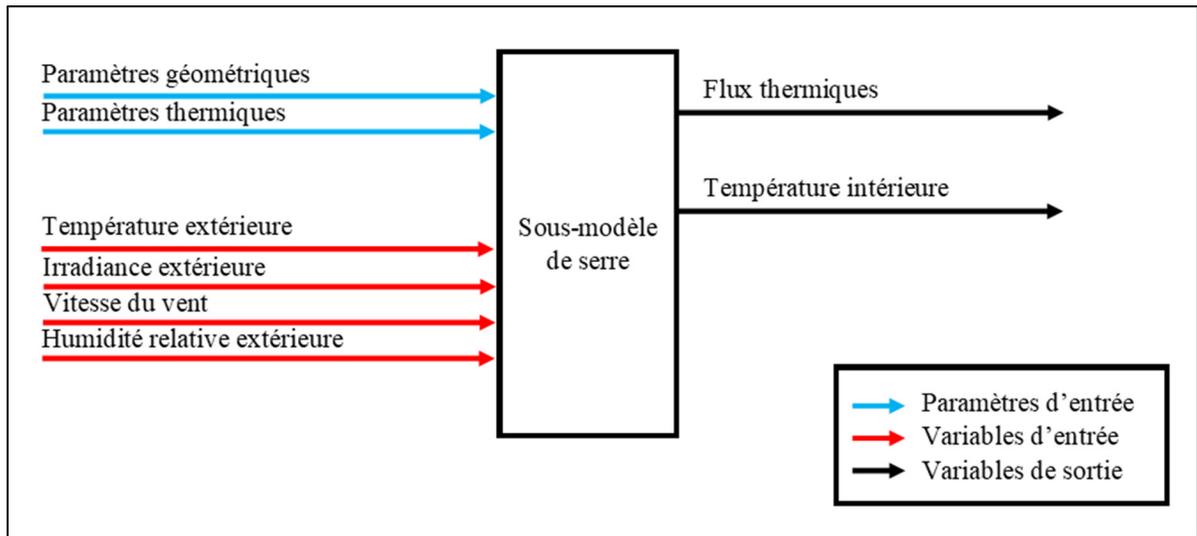


Figure 3.6 Entrées et sorties du sous-modèle de serre

En plus des paramètres géométriques et thermiques de la serre, plusieurs conditions extérieures, en rouge sur la gauche de la Figure 3.6, ont un impact sur les bilans thermiques et doivent être renseignées en entrée du modèle :

- La température extérieure influence le flux thermique convectif qui a lieu entre l'enveloppe de la serre et l'air extérieur. De plus, elle permet de calculer la température du ciel définie dans l'équation (3.2) définie par Niemelä (2001) qui est utilisée pour calculer le flux radiatif entre l'enveloppe de la serre et le ciel. Cette équation a été validée sur un site à la même latitude que Kuujuaq (Sodankylä) et pour un ciel dégagé (Niemelä et al., 2001). Elle dépend du coefficient d'émissivité du ciel calculé par l'équation (3.3) grâce à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air extérieur $P_{H_2O,ext}$.

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel}^{0,25} \cdot T_{ext} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{ciel} = \begin{cases} 0,72 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot (P_{H_2O,ext} - 200) & \text{si } P_{H_2O,ext} \geq 200 \text{ Pa} \\ 0,7 - 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot (P_{H_2O,ext} - 200) & \text{si } P_{H_2O,ext} < 200 \text{ Pa} \end{cases} \quad (3.3)$$

- L'humidité relative extérieure impacte le taux d'humidité intérieur par l'intermédiaire du renouvellement d'air dû aux fuites et à la ventilation.
- L'irradiance extérieure provoque notamment un réchauffement des différents éléments de la serre. Le rayonnement solaire frappe l'ensemble des éléments de la serre et est simulé par l'intermédiaire d'un modèle solaire à plusieurs couches semi-transparentes détaillé dans le paragraphe 3.2.1.2.
- La vitesse du vent exerce une influence sur le transfert convectif entre l'enveloppe et l'air extérieur, ainsi que sur le taux de renouvellement d'air lors de l'ouverture du volet du toit de la serre.

3.2.1.1 Flux convectifs

Les flux convectifs concernent l'échange entre la canopée et l'air, le sol et l'air, entre l'air et l'enveloppe et entre l'enveloppe et l'air extérieur. Un flux convectif entre un nœud solide s et un nœud fluide f est calculé par l'équation (3.4) :

$$\dot{Q}_{sf} = H_{sf} \cdot A_s \cdot (T_s - T_f) \quad (3.4)$$

Où le flux thermique \dot{Q}_{sf} dépend du coefficient de transfert convectif H_{sf} , de la surface A_s du nœud solide et de la différence entre la température du nœud solide T_s et du nœud fluide T_f .

3.2.1.2 Flux radiatifs

Les flux radiatifs infrarouges sont calculés entre la canopée et l'enveloppe, la canopée et le sol, le sol et l'enveloppe et l'enveloppe et le ciel. Ils sont appelés infrarouges car les éléments de la serre étant à environ 20°C, la loi de Wien stipule alors que la longueur d'onde associée au maximum d'émission est de l'ordre de 10µm, un rayonnement infrarouge. L'application de la loi du rayonnement de Kirchhoff permet alors de calculer le flux radiatif entre deux nœuds considérés comme des corps gris dont l'absorbance et l'émissivité sont égales.

Le flux convectif infrarouge \dot{Q}_{ab} entre deux nœuds a et b est alors calculé par l'équation (3.5) :

$$\dot{Q}_{ab} = A_a^{rad} \cdot \varepsilon_a \cdot \varepsilon_b \cdot F_{ab} \cdot \sigma \cdot (T_a^4 - T_b^4) \quad (3.5)$$

Où A_a^{rad} est la surface effective d'émission de l'élément a , ε_a et ε_b représentent l'émissivité des nœuds a et b , F_{ab} est le facteur de forme entre les nœuds a et b , T_a et T_b sont les températures des nœuds a et b .

Dans le cas de la canopée, la surface effective d'émission radiative est calculée par l'équation (3.6) définie par de Zwart (1996) :

$$A_{can}^{rad} = A_{serre} \cdot (1 - e^{-K_{can}^{GLO} \cdot LAI}) \quad (3.6)$$

Où A_{serre} est la surface de la serre, K_{can}^{GLO} est le coefficient d'extinction de la canopée dans le cas des flux infrarouges. LAI est le Leaf Area Index, soit l'indice foliaire qui représente la surface de feuilles par unité de surface au sol.

Le soleil émet également un rayonnement solaire à Courte Longueur d'Onde (CLO) dont l'impact sur la serre est modélisé par l'intermédiaire d'un modèle solaire adapté par Piché (2021) à multiples couches semi-transparentes représentées sur la Figure 3.7.

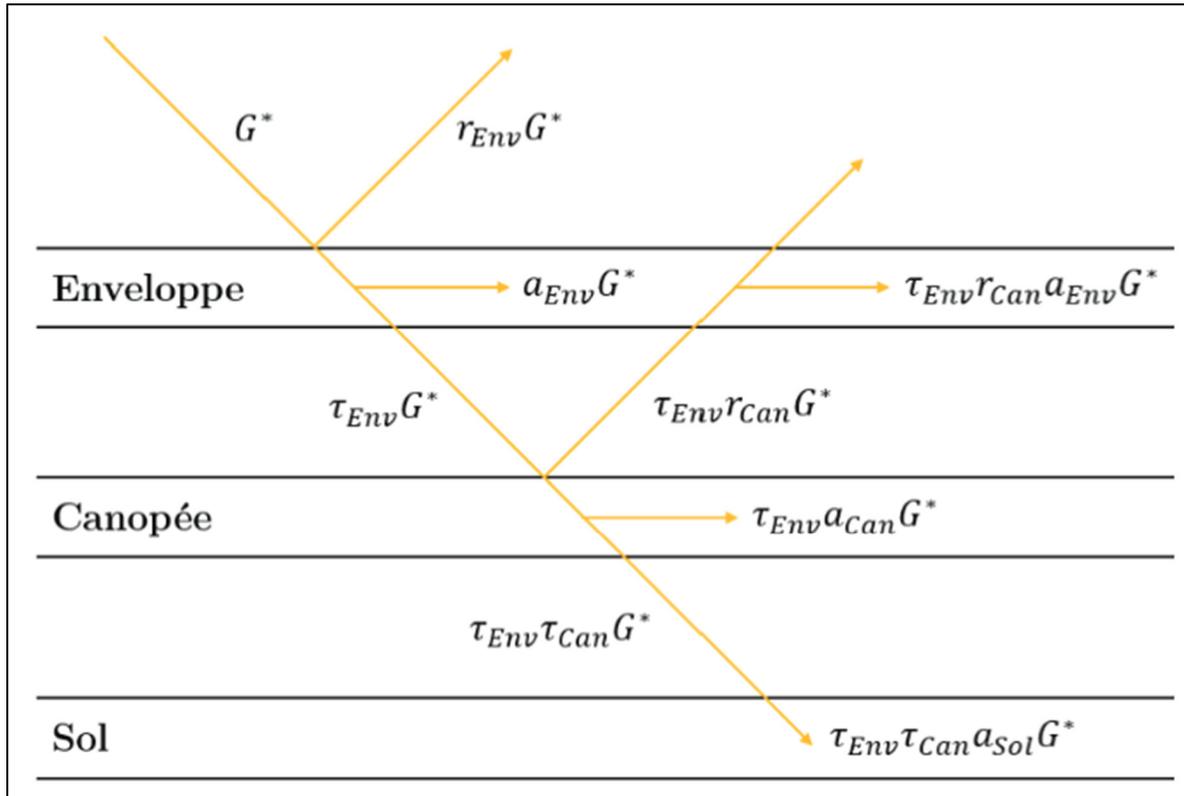


Figure 3.7 Modèle solaire
Tirée de Piché (2021, p.67)

Comme représenté sur la Figure 3.7, le flux solaire frappe l'enveloppe, la canopée et le sol. Le flux solaire reçu par l'enveloppe est la somme du flux direct G^* absorbé par l'enveloppe et de la fraction du flux transmis par l'enveloppe puis réfléchi par la canopée et absorbé par l'enveloppe. Il s'exprime alors par l'équation (3.7) :

$$\dot{Q}_{Env}^{CLO} = a_{Env}^{CLO} \cdot (1 + \tau_{Env}^{CLO} \cdot r_{Env}^{CLO}) \cdot G^* \cdot A_{serre} \quad (3.7)$$

Où a_{Env}^{CLO} est le coefficient d'absorption de l'enveloppe, τ_{Env}^{CLO} est le coefficient de transmission de l'enveloppe et r_{Env}^{CLO} est le coefficient de réflexion de la serre.

Le flux solaire absorbé par la canopée est égal au produit du coefficient d'absorption de la canopée a_{Can}^{CLO} par la fraction du flux solaire transmis par l'enveloppe :

$$\dot{Q}_{Can}^{CLO} = \tau_{Env}^{CLO} \cdot a_{Can}^{CLO} \cdot G^* \cdot A_{serre} \quad (3.8)$$

Enfin, le flux thermique absorbé par le sol est égal à la fraction du flux solaire transmis par l'enveloppe et par la canopée puis absorbé par le sol, comme explicité par l'équation (3.9) :

$$\dot{Q}_{Sol}^{CLO} = \tau_{Env}^{CLO} \cdot \tau_{Can}^{CLO} \cdot a_{Sol}^{CLO} \cdot G^* \cdot A_{serre} \quad (3.9)$$

Dans le cas de la canopée, la loi de Beer-Lambert est utilisée pour définir le coefficient de transmission de la canopée grâce à l'indice foliaire (LAI) et au coefficient d'extinction de la canopée pour les CLO :

$$\tau_{Can}^{CLO} = e^{-K_{can}^{CLO} \cdot LAI} \quad (3.10)$$

Pour chaque nœud n , les coefficients de transmission τ_n^{CLO} , de réflexion r_n^{CLO} et d'absorption a_n^{CLO} sont liés par l'équation (3.11) :

$$\tau_n^{CLO} + a_n^{CLO} + r_n^{CLO} = 1 \quad (3.11)$$

Le sol réfléchit une partie du flux l'impactant, son coefficient d'absorption a_{Sol}^{CLO} est donc inférieur à 1, mais la fraction réfléchie n'est pas incluse au bilan de la canopée. Seule une réflexion est intégrée au modèle solaire : la primo-réflexion de la canopée repartant vers l'enveloppe.

3.2.1.3 Flux conductifs

Le sol de la serre fait l'objet d'un flux conductif vertical. Afin de le simuler, le sol est divisé en plusieurs couches horizontales à température uniforme qui échangent entre elles, et dont la plus profonde est à température constante.

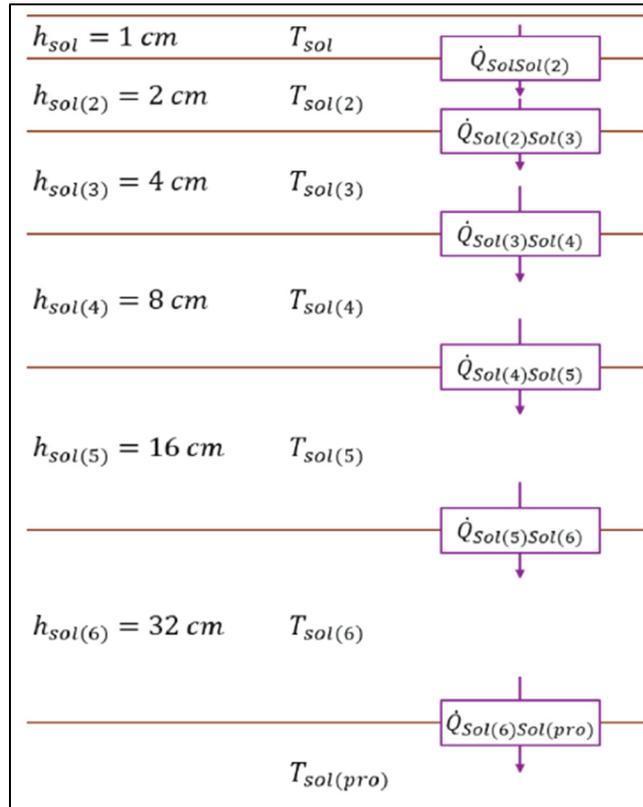


Figure 3.8 Modèle conductif du sol
Tirée de Piché (2021)

Dans une couche de sol i , le bilan thermique permettant de calculer sa température est défini par l'équation (3.12) :

$$\rho_{sol} \cdot A_{sol} \cdot h_{sol(i)} \cdot c_{p,sol} \cdot \frac{dT_{sol(i)}}{dt} = \dot{Q}_{Sol(i-1)Sol(i)} - \dot{Q}_{Sol(i)Sol(i+1)} \quad (3.12)$$

Avec ρ_{sol} la masse volumique du sol, A_{sol} la surface du sol, $h_{sol(i)}$ la hauteur de la couche i , $c_{p,sol}$ la capacité thermique massique du sol. Un flux conductif entre la couche i et $i+1$ de sol s'exprime par l'équation (3.13) :

$$\dot{Q}_{Sol(i)Sol(i+1)} = \frac{2 \cdot \lambda_{sol}}{h_{sol(i)} + h_{sol(i+1)}} \cdot A_{sol} \cdot (T_{sol(i)} - T_{sol(i+1)}) \quad (3.13)$$

Ici, λ_{sol} désigne la conductivité thermique du sol et sera appelée λ_{Flr} par la suite. Dans le cas de la dernière couche du sol, elle est considérée de hauteur nulle et à température constante.

3.2.1.4 Flux liés à la ventilation

La ventilation de la serre est modélisée par un flux advectif, représenté par l'équation (3.14) :

$$\dot{Q}_{AirExt} = \rho_{air} \cdot c_{p,air} \cdot f_{venti} \cdot (T_{air} - T_{ext}) \quad (3.14)$$

Le terme f_{venti} est le débit volumique d'air depuis l'extérieur vers la serre, et est composé d'un terme $f_{venti,fui}$ représentant les fuites à travers les parois et d'un terme $f_{venti,toit}$ représentant la ventilation provoquée par l'ouverture des ouvrants en cas de température trop élevée :

$$f_{venti} = f_{venti,fui} + f_{venti,toit} \quad (3.15)$$

Premièrement, le terme $f_{venti,fui}$ est calculé par l'équation (3.16) (Vanthoor, 2011) où c_{fui} est un coefficient de fuite, et v_{vent} est la vitesse du vent :

$$f_{venti,fui} = \begin{cases} 0,25 \cdot c_{fui} \cdot A_{serre} & \text{si } v_{vent} < 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ v_{vent} \cdot c_{fui} \cdot A_{serre} & \text{si } v_{vent} \geq 0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases} \quad (3.16)$$

Deuxièmement, le terme $f_{venti,toit}$ s'obtient grâce à l'équation (3.17) (Boulard & Baille, 1995):

$$f_{venti,toit} = \frac{h_{vent} \cdot L_{serre} \cdot C_d}{2} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot h_{venti}}{2} \cdot \frac{|T_{air} - T_{ext}|}{\bar{T}_{airext}} + C_w \cdot v_{vent}^2} \quad (3.17)$$

Le terme $f_{venti,toit}$ dépend notamment de h_{venti} qui représente la hauteur d'ouverture du toit, ainsi que de L_{serre} la longueur de la serre, C_d appelé coefficient de décharge, g l'accélération

gravitationnelle, $\bar{T}_{air\text{ext}}$ la moyenne entre la température intérieure et extérieure et C_w le coefficient de vent.

La hauteur d'ouverture du toit h_{venti} est calculée par une fonction continue pouvant varier entre 0 et $h_{ventimax}$, la hauteur maximale pouvant atteindre le toit ouvert. Cette fonction est définie par l'équation (3.18) avec \bar{T}_{OuvFer} désignant la moyenne entre les températures d'ouverture et de fermeture du toit :

$$h_{venti} = \frac{h_{venti,max}}{1 + \exp(-5 * (T_{air} - \bar{T}_{OuvFer}))} \quad (3.18)$$

3.2.2 Sous-modèle de stockage

L'objectif principal du sous-modèle de stockage est de calculer la température de l'air à la sortie du système. Plusieurs éléments influencent l'état thermique du lit. Premièrement, l'état d'activation des ventilateurs permet de définir si de l'air circule dans les roches. Secondairement, la température de l'air à l'entrée du STE influence le flux thermique advectif entrant dans le lit de roches tel que présenté à la Figure 3.9.

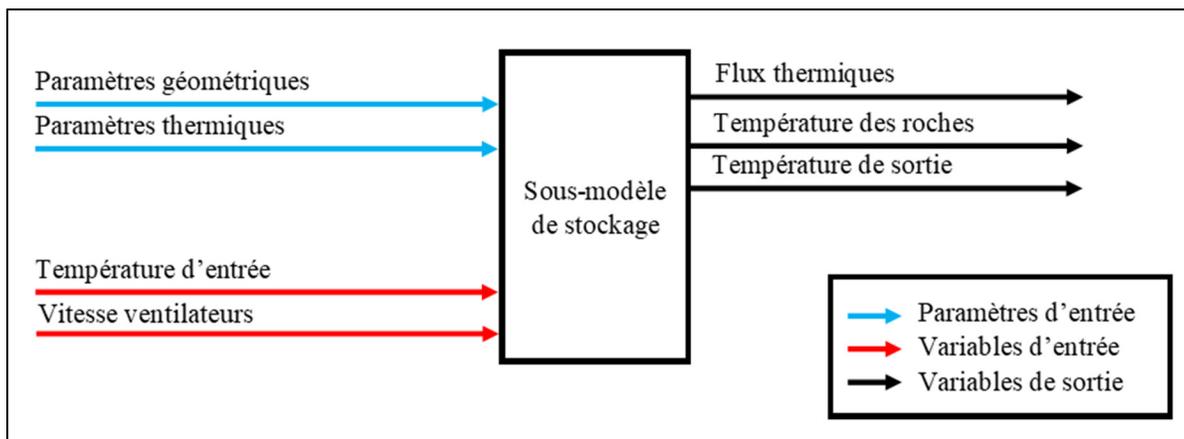


Figure 3.9 Entrées et sorties du sous-modèle de stockage

Le modèle de stockage est construit par une division du lit en couches composées d'un ensemble de roches et d'air dont les températures associées sont considérées comme uniformes. En effet, comme défini plus tôt, le STE est conçu de manière que le flux d'air dans le lit de roches soit uniforme en évitant les chemins préférentiels. Par conséquent, l'hypothèse que la température du lit est uniforme selon les axes perpendiculaires au flux d'air a été posée due à un caractère supposé adiabatique du système. Il est supposé qu'il n'échange aucun flux thermique avec les surfaces l'entourant : gabions, mousse isolante et terre de culture (cette hypothèse est discutable lorsque le système est éteint, elle sera étudiée ultérieurement). Un gradient de température ne peut alors uniquement se former sur l'axe de déplacement du flux d'air, justifiant cette division en mailles visibles sur la Figure 3.10.

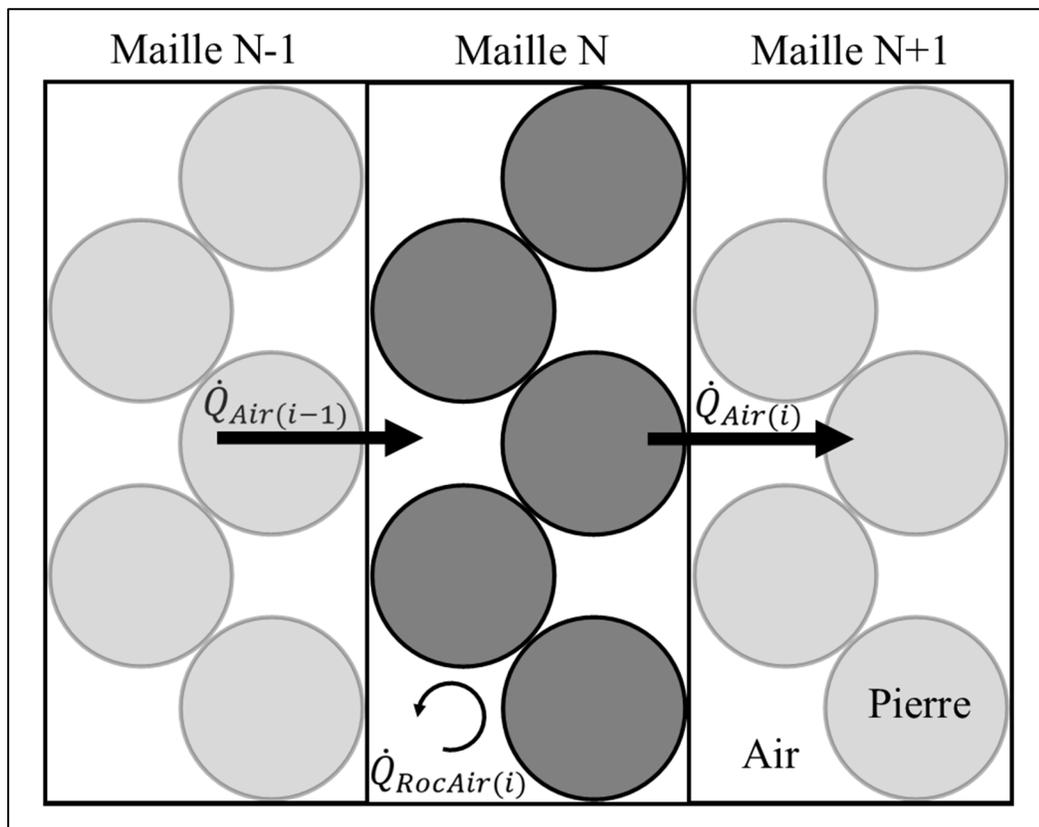


Figure 3.10 Échanges thermiques dans une maille de stockage

Dans chaque maille, trois flux thermiques entrent en jeu : un flux advectif d'entrée $\dot{Q}_{Air(i-1)}$, un flux advectif de sortie $\dot{Q}_{Air(i)}$ et un flux convectif $\dot{Q}_{RocAir(i)}$ entre les roches et l'air présents dans la maille i étudiée. Ces flux sont représentés sur la Figure 3.10.

$$\dot{Q}_{Air(i)} = U_{STE} \cdot q_v \cdot \rho_{air} \cdot c_{p,air} \cdot T_{air,lit(i)} \quad (3.19)$$

Où U_{STE} représente l'état du système (1 si en marche, 0 sinon) et q_v désigne le débit d'air dans un lit de roches. $T_{air,lit(i)}$ désigne la température de l'air à l'intérieur de la couche étudiée. Dans le cas de la première couche, elle est remplacée par la température d'entrée du stock qui est une donnée d'entrée du modèle comme représenté sur la Figure 3.9.

Le flux thermique convectif entre l'air et les roches d'une maille est calculé par l'équation (3.20) :

$$\dot{Q}_{RocAir(i)} = \frac{H_{RocAir} \cdot A_{Roc}}{N_{lit}} \cdot (T_{Roc(i)} - T_{air,lit(i)}) \quad (3.20)$$

Ce flux thermique dépend du nombre de mailles du lit N_{lit} , de la surface de roche dans le lit A_{Roc} , de la température des roches et de l'air dans la maille $T_{Roc(i)}$ et $T_{air,lit(i)}$ et du coefficient de transfert entre les roches et l'air H_{RocAir} .

Ainsi, les bilans thermiques de l'air et des roches dans la maille i (avec i allant de 1 à s) s'écrivent respectivement avec les équations (3.21) et (3.22).

$$\frac{\varepsilon_{lit} \cdot \rho_{air} \cdot V_{lit} \cdot c_{p,air}}{N_{maille}} \cdot \frac{dT_{air,lit(i)}}{dt} = \dot{Q}_{RocAir(i)} + \dot{Q}_{Air(i-1)} - \dot{Q}_{Air(i)} \quad (3.21)$$

$$\frac{(1 - \varepsilon_{lit}) \cdot \rho_{roc} \cdot V_{lit} \cdot c_{p,roc}}{N_{maille}} \cdot \frac{dT_{Roc,i}}{dt} = -\dot{Q}_{RocAir(i)} \quad (3.22)$$

3.3 Couplage des sous-modèles et outils d'analyse du modèle SLR

La section 3.2 ayant présenté les deux sous-modèles développés par Piché (2021), elle marque la fin de la description de son travail. Ce paragraphe présente le modèle numérique Serre-Lit de Roches (SLR) couplé et étudié dans le cadre de cette maîtrise. Le modèle SLR est développé avec le langage de programmation Modelica et les simulations sont menées avec le logiciel OpenModelica. Les simulations présentées par la suite ont été réalisées avec une résolution temporelle de 10 minutes. La même résolution sera utilisée pour l'étude et la validation du modèle. Le solveur utilisé par OpenModelica est le DASSL avec une tolérance de 1.10^{-6} et un ordre maximal d'intégration de 5. La Figure 3.11 détaille les entrées et sorties du modèle SLR, ainsi que le lien thermique entre les deux sous-modèles basé sur la température intérieure de la serre et la température en sortie du stockage thermique. Des outils d'analyse énergétique du modèle de la serre couplée au STE-LR, appelé modèle SLR par la suite, sont également introduits.

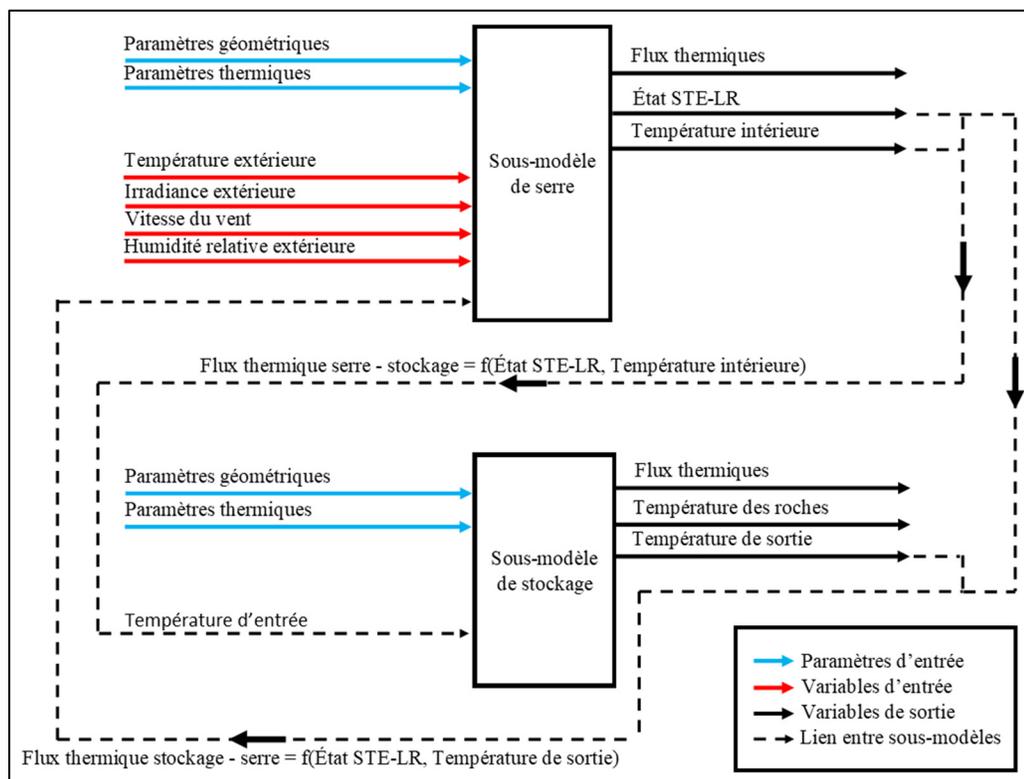


Figure 3.11 Entrées et sorties du modèle SLR

Comme visible sur la Figure 3.11, le couplage des deux sous-modèles consiste en l'intégration de deux flux thermiques entre les sous-modèles : un flux serre-stockage et un flux stockage-serre. Ces flux dépendent de trois variables : l'état d'activation du STE-LR, la température intérieure de la serre et la température de sortie du STE-LR. L'état d'activation du STE-LR et les équations liant les flux thermiques à ces variables seront explicitées dans la suite de cette section (Figure 3.12 et équations (3.23) et (3.24)). Comme illustré sur la Figure 3.11, le couplage des deux sous-modèles permet de n'avoir que les variables représentant les conditions extérieures du sous-modèle de serre comme variables d'entrée du modèle SLR. En effet, la température d'entrée du STE-LR et l'information d'activation du STE-LR sont des variables simulées par le modèle SLR.

Des consignes de régulation ont été définies afin de contrôler les ventilateurs du système de stockage, qui s'activent lorsqu'une phase de charge ou de décharge doit avoir lieu et qui représentent l'état d'activation du STE-LR. Pour ce faire, deux cycles d'hystérésis identiques à ceux intégrés au contrôleur de la serre de Kuujjuaq sont mis en place et représentés dans la Figure 3.12.

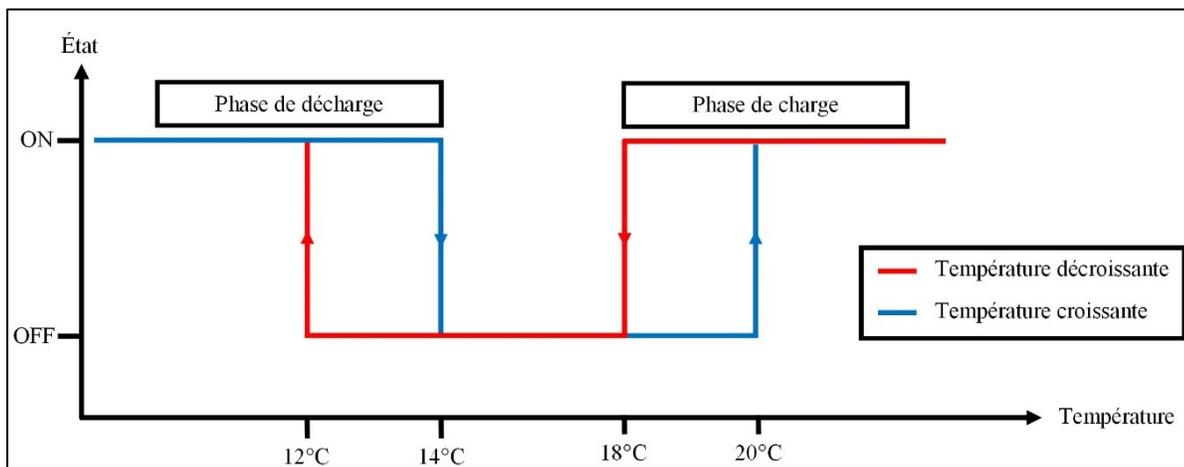


Figure 3.12 Contrôle du système de stockage de Kuujjuaq

La phase de charge représentée sur la droite de la Figure 3.12 débute lorsque la température dans la serre dépasse les 20°C et s'arrête lorsque la température redescend sous les 18°C. De la même manière, la phase de décharge -représentée sur la gauche de la Figure 3.12- débute lorsque la température intérieure descend sous 12°C jusqu'au moment où elle remonte au-dessus de 14°C.

Les phases de charge et de décharge définies précédemment mènent à un échange thermique entre la serre et le STE-LR. Cet échange se matérialise par deux flux thermiques : un flux « d'entrée » allant de la serre vers l'entrée du STE-LR et un flux « de sortie » allant de la sortie du STE-LR vers la serre. Ces flux sont détaillés ci-dessous.

L'équation (3.23) définit le flux thermique advectif allant de la serre vers le STE par l'intermédiaire de l'air de la serre entrant dans le STE :

$$\dot{Q}_{serre-stockage} = q_{air} \cdot c_{p,air} \cdot \rho_{air} \cdot U_{système} \cdot T_{air,serre} \quad (3.23)$$

Ce flux thermique permet de faire le lien entre la serre et le STE-LR en étant déduit du bilan thermique de l'air de la serre et en devenant le $\dot{Q}_{Air(i-1)}$ dans le bilan thermique de la première maille de STE dans l'équation (3.21) pour i étant égal à 1.

De même, l'équation (3.24) décrit le flux advectif allant du STE vers la serre grâce à l'air sortant du STE :

$$\dot{Q}_{stockage-serre} = q_{air} \cdot c_{p,air} \cdot \rho_{air} \cdot U_{système} \cdot T_{sortie,stockage} \quad (3.24)$$

La température de sortie de stockage $T_{sortie,stockage}$ est issue du calcul de la température de l'air dans la dernière maille du lit de roches grâce à l'équation (3.21) pour i étant égal à N_{maille} . Ce flux est alors ajouté au bilan thermique de l'air intérieur de la serre pour faire le lien entre le STE-LR et la serre.

Où q_{air} est le débit d'air circulant dans le STE-LR lorsqu'il est en marche, $c_{p,air}$ est la capacité thermique massique de l'air, ρ_{air} est la masse volumique de l'air, $U_{système}$ est une variable représentant l'état d'activation du STE-LR (0 s'il est éteint, 1 s'il est en marche), $T_{air,serre}$ est la température de l'air dans la serre et $T_{sortie,stockage}$ est la température de l'air en sortie du STE-LR.

De ces flux thermiques peut être définie une puissance nette absorbée par le STE-LR que l'on nommera la Puissance Advective Nette Absorbée (*PANA*) et qui servira d'outil d'analyse du modèle SLR . La PANA est par définition la différence entre la puissance advective entrant dans le STE-LR et la puissance advective en sortant (3.25) :

$$PANA = \dot{Q}_{serre-stockage} - \dot{Q}_{stockage-serre} \quad (3.25)$$

Intégrer cette puissance entre chaque pas de temps Δt de simulation permet de calculer une Énergie Advective Nette Absorbée entre le temps de début de simulation t_0 et le temps de fin de simulation t_f (3.26) :

$$EANA = \sum_{t_0}^{t_f} PANA \cdot \Delta t \quad (3.26)$$

La PANA permet également de définir l'énergie chargée et déchargée. En effet, lorsqu'une phase de charge est en cours, la PANA est positive. L'énergie chargée est alors définie par l'équation (3.27) qui permet de ne garder que la partie positive de la PANA :

$$E_c = \sum_{t_0}^{t_f} \max(PANA, 0) \cdot \Delta t \quad (3.27)$$

Réciproquement, lors d'une phase de décharge, la PANA est négative. L'énergie chargée est alors définie par l'équation (3.28) qui permet de ne garder que la partie négative de la PANA:

$$E_d = \sum_{t_0}^{t_f} \min(PANA, 0) \cdot \Delta t \quad (3.28)$$

La suite de ce chapitre s'attachera à réaliser l'étude initiale du modèle SLR afin de définir les éventuels ajustements à effectuer.

3.4 Analyse initiale du modèle SLR

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les résultats de simulations obtenus à partir du modèle SLR, dans le but d'améliorer ses estimations en définissant les ajustements à y apporter. Dans un premier temps, une évaluation qualitative sera réalisée pour vérifier la conformité générale du modèle par rapport aux données d'entrée représentant les conditions extérieures. Une fois cette validation effectuée, une analyse quantitative sera entreprise pour comparer les résultats des simulations avec les mesures réelles obtenues à partir de l'instrumentation de la serre de Kuujuaq. Ces analyses seront réalisées en étudiant la capacité du modèle à estimer les températures représentatives des journées de culture.

3.4.1 Étude qualitative : cohérence physique des simulations

L'objectif principal du modèle numérique est de simuler avec précision la température intérieure de la serre. Le modèle représentant un système thermique complexe, la première chose à vérifier est la cohérence globale des simulations. Par exemple, est-ce que la température intérieure de la serre suit logiquement les variations quotidiennes de température et de ressource solaire et est-ce que le STE se comporte en adéquation avec les attentes. La Figure 3.13 représente l'évolution de la température intérieure ainsi que l'état d'activation du STE-LR (appelé STE par la suite) simulés, en plus des conditions extérieures principales : l'irradiance solaire et la température extérieure, du 6 au 11 juin 2019, cette période permettant de démontrer clairement les dynamiques à observer.

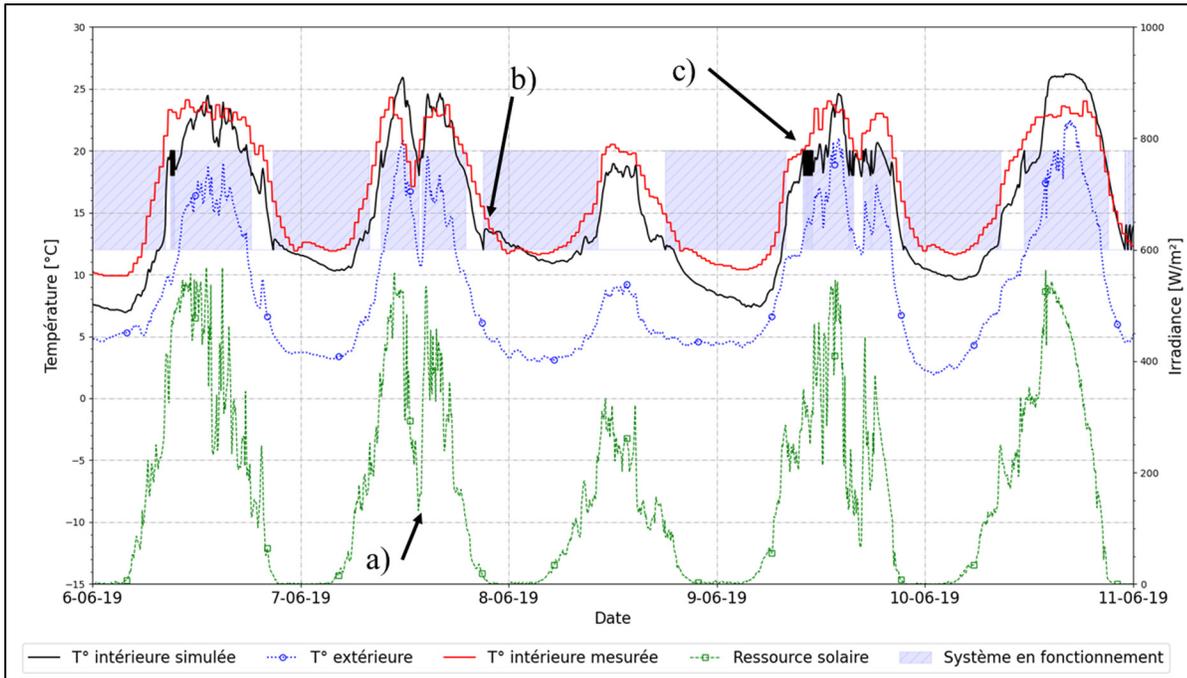


Figure 3.13 Température intérieure et état du STE simulés, température extérieure et ressource solaire du 6 au 10 juin 2019

La température simulée est en adéquation avec la température attendue à l'intérieur d'une serre avec une augmentation au lever du jour et une diminution en fin de journée lorsque la température extérieure baisse. Elle réagit également aux passages nuageux, comme visible le 7 juin (flèche a). De plus, le modèle respecte la fonction de découplage des températures basses visée dans le cadre du projet : pendant cette période, les températures nocturnes intérieures restent supérieures à 7°C alors que la température extérieure tombe en dessous de 3°C. Ce comportement suit le comportement mesuré et visible en rouge sur la Figure 3.13. Finalement, le modèle présente une simulation du STE cohérente avec les attentes : le système de stockage s'active en journée afin de charger de l'énergie thermique ainsi que la nuit pour la décharger (flèche b).

Les simulations présentent régulièrement un comportement qui n'est pas présent dans les mesures : des oscillations thermiques rapides entre 18°C et 20°C ou entre 12°C et 14°C. Ce comportement est notamment visible le 9 juin aux alentours de 12h sur la Figure 3.13 (flèche c). Ces oscillations s'expliquent par un basculement rapide de l'état du STE lorsque la

différence de température entre la serre et le système de stockage est assez élevée pour que le contrôleur passe rapidement de l'activation d'une phase de décharge ou de recharge à l'arrêt de cette même phase. La boucle d'hystérésis est alors parcourue rapidement. L'absence de ce basculement régulier dans les mesures pourrait être due à la présence d'une temporisation liée au basculement entre deux états dans le contrôleur de la serre.

La cohérence physique du modèle ayant été vérifiée, la prochaine étape est d'évaluer la précision des simulations. Cette évaluation commence avec la Figure 3.14, qui représente la température intérieure de la serre mesurée et simulée, ainsi que l'état d'activation du STE simulé et mesuré et la température simulée de l'air en sortie de STE du 16 au 21 juillet 2022.

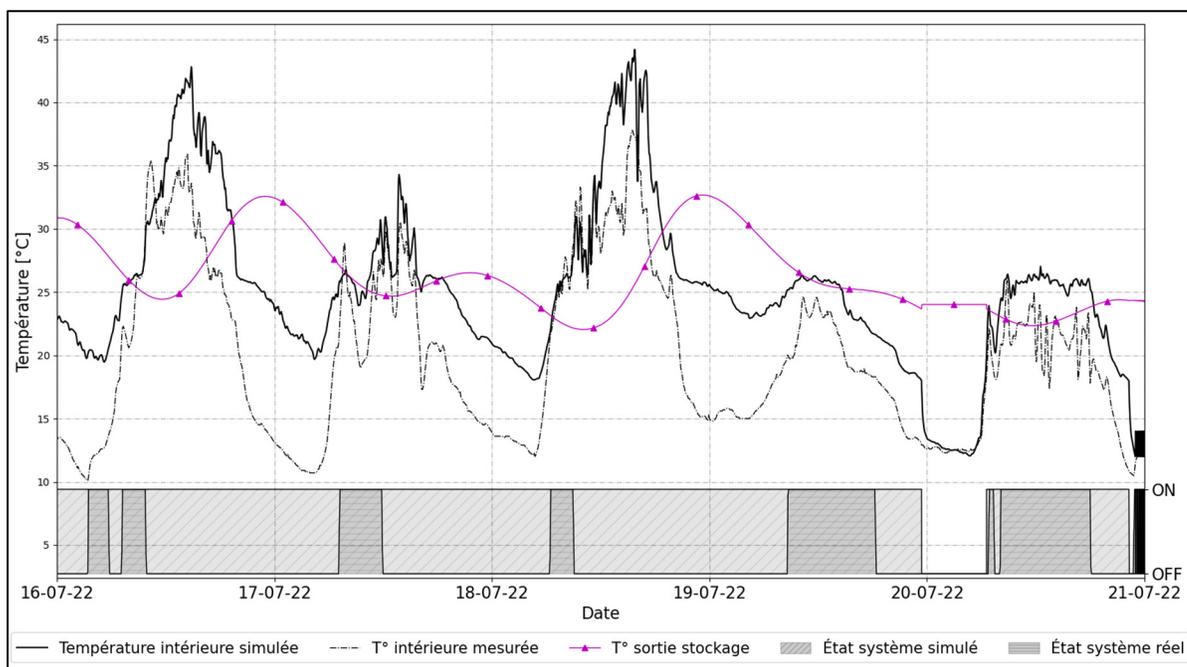


Figure 3.14 Température intérieure simulée et mesurée, état du STE simulé et réel, température de sortie du stock simulée du 16 au 21 juillet 2022

La Figure 3.14 révèle que le modèle a du mal à prédire de manière précise la température à l'intérieur de la serre : la température est surévaluée d'environ 10°C durant les nuits. Cette surévaluation est causée par le fait que la température en sortie du système STE est très élevée en fin de journée, ce qui compense les pertes thermiques nocturnes et maintient la température

intérieure au-dessus de 18°C donc le STE simulé n'arrête pas sa phase de charge : il reste en marche.

L'effet de cette instabilité est visible en observant l'évolution de la température le 20 juillet, un jour où la température de la serre passe sous 18°C . Dans ce cas, le STE s'arrête et la simulation retrouve une adéquation avec la réalité grâce au fait que de l'énergie thermique n'est plus injectée par le STE.

Afin de s'affranchir de la problématique de mauvaise simulation de l'état d'activation du STE, il est proposé d'ajouter la donnée d'activation des ventilateurs récoltée à Kuujuaq en données d'entrée plutôt que d'utiliser la donnée simulée. Ce remplacement permettra de discriminer les sources d'erreurs, afin de trouver le sous-modèle responsable des instabilités et sera utilisé dans la suite de cette analyse initiale. À titre d'exemple, la Figure 3.15 représente l'évolution de la température intérieure en sortie de système de stockage et la température intérieure de la serre dans les mêmes conditions que la Figure 3.14 dans le cas où l'état mesuré du système de stockage est utilisé comme consigne du système de stockage simulé.

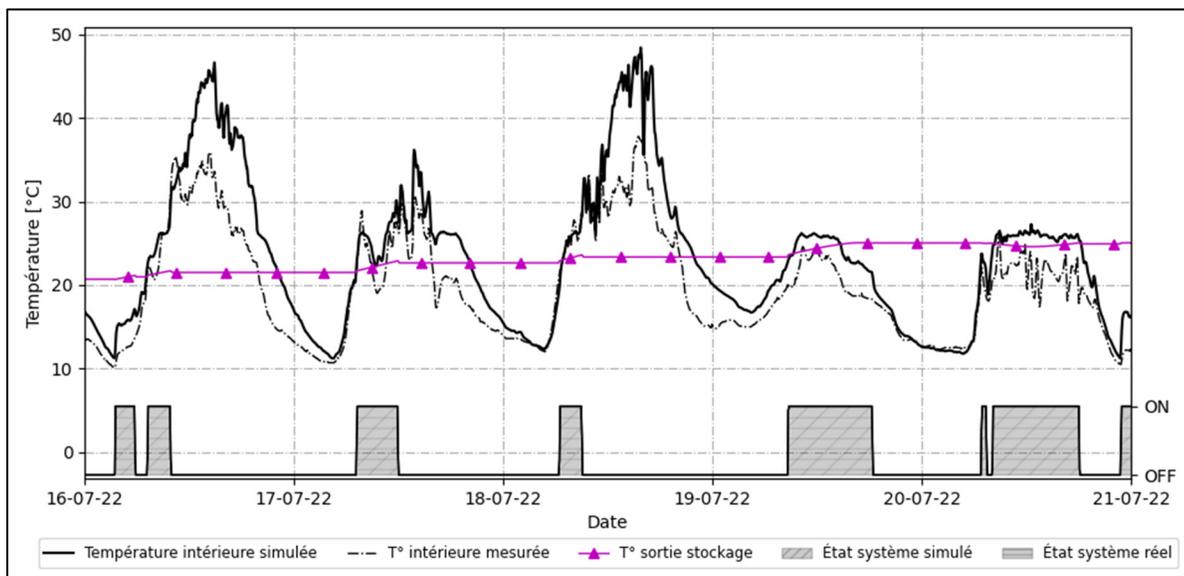


Figure 3.15 Température intérieure simulée et mesurée, état du STE réel utilisé comme consigne du STE simulé, température de sortie du stock simulée du 16 au 21 juillet 2022

La Figure 3.15 montre que le fait de forcer le STE simulé à s'activer en même temps que le STE réel rend le modèle SLR plus précis et en particulier à mieux suivre les dynamiques thermiques mesurées. Il est alors supposé que l'étude plus approfondie du modèle SLR avec cette stratégie de discrimination permette de comprendre et de résoudre le ou les problèmes des sous-modèles. Cette étude sera menée dans la prochaine section.

3.4.2 Étude quantitative : capacité à prévoir les températures types

Dans le but d'étudier le comportement du modèle à une échelle temporelle plus grande que quelques jours, il est proposé d'utiliser les températures types définies dans la section 2.1 sur les périodes représentatives de la saison de culture. Ainsi, la Figure 3.16 représente les températures types quotidiennes mesurées et simulées pour chaque jour des périodes étudiées.

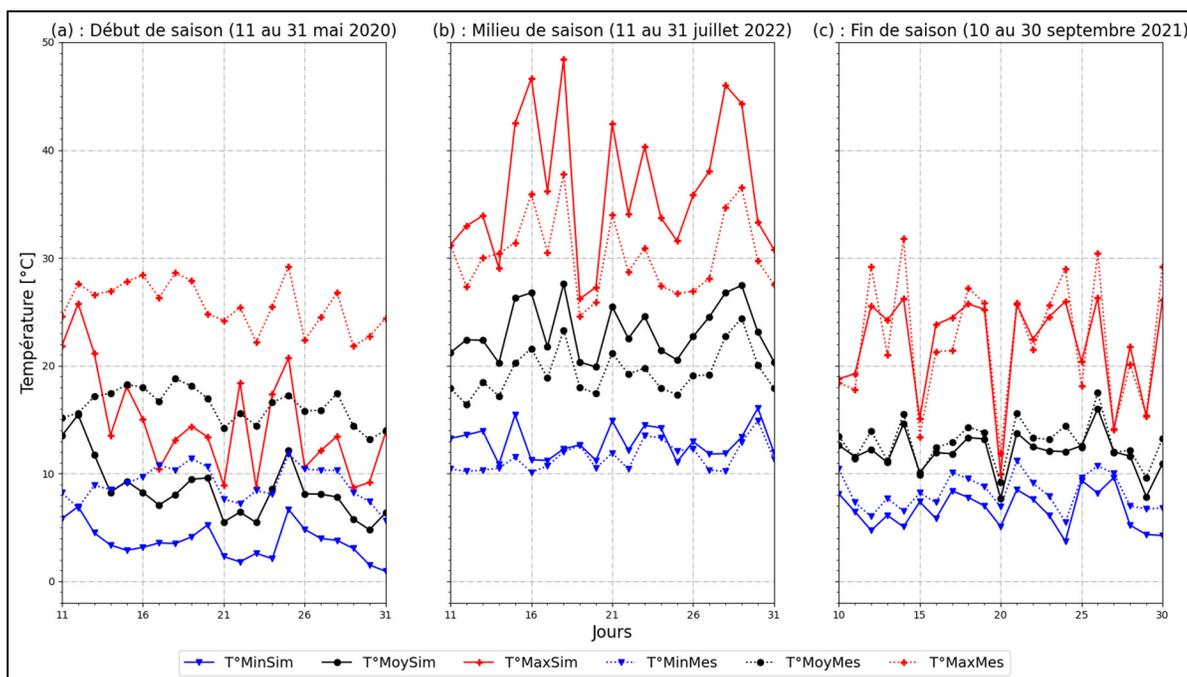


Figure 3.16 Températures types intérieures quotidiennes pour (a) début, (b) milieu et (c) fin de saison

Comme illustré sur la Figure 3.16, les dynamiques thermiques suivies par les températures types dépendent du moment de la saison étudié. En début de saison (Figure 3.16 (a)), au moment où les températures moyennes sont encore basses (la température moyenne sur cette période est de 3,4°C), l'ensemble des températures types simulées (en traits pleins sur la Figure 3.16) sont très largement sous-estimées : les écarts quadratiques moyens (2.1) avec les températures types mesurées (en pointillés sur la Figure 3.16) sont respectivement de 6°C, 8,4°C et 15,4°C pour les températures minimales, moyennes et maximales.

En milieu de saison, représentée dans la partie (b) de la Figure 3.16, les températures à Kuujjuaq sont les plus hautes de l'année : elle était en moyenne de 15,9° C du 11 au 31 juillet 2022. À ce moment, le modèle surestime la température de la serre. Malgré une légère surestimation des températures minimales (le RMSE de T_{min} est de 2,6°C), les températures maximales sont surestimées : le RMSE de T_{max} est de 6,3°C, ce qui provoque également une surestimation des températures moyennes dont le RMSE est de 3,5°C.

En fin de saison représentée dans la partie (c) de la Figure 3.16, les températures extérieures à Kuujjuaq sont tempérées : la température moyenne est de 7,2° C sur la période étudiée. Dans ce cas de figure, les RMSE sont meilleurs que lorsque les températures sont plus extrêmes : le RMSE de T_{min} est de 2,0°C, le RMSE des températures moyennes est de 1,4°C tandis que le RMSE de T_{max} est de 3,4°C.

Le sous-modèle de serre étant calibré avec une précision de 1,53°C (Piché, 2021), ces écarts pourraient être liés au sous-modèle de stockage. Il est donc proposé de se focaliser sur le STE. La Figure 3.17 représente la température au milieu du lit de roches pendant les périodes représentatives étudiées.

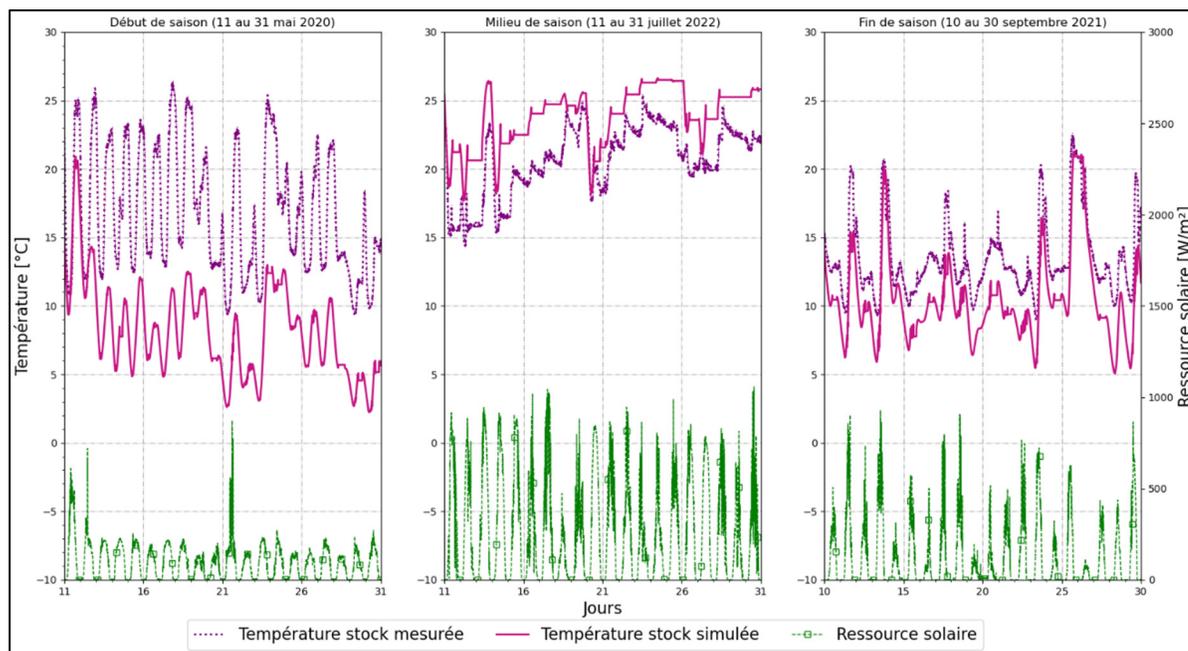


Figure 3.17 Température au milieu du lit simulée et mesurée et ressource solaire

La Figure 3.17 montre que les dynamiques thermiques suivies par la température dans le lit et la température intérieure de la serre se suivent. En effet, en début de saison, la température au milieu du STE est sous-estimée d'environ 10°C . À l'inverse, la température du lit en milieu de saison est surestimée d'environ 4°C . Les estimations en fin de saisons sont sous-estimées de 0°C à 4°C . Ces tendances sont également liées à la ressource solaire : une ressource solaire faible en début de saison (irradiance solaire de $102\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en moyenne sur la période étudiée) correspond à une sous-estimation des températures dans le lit de roches et inversement en milieu de saison où la ressource solaire est riche ($266\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en moyenne).

3.4.3 Constats

L'étude initiale du modèle SLR a montré que le couplage des sous-modèles n'est pas en mesure de simuler correctement les températures dans la serre. En revanche, discriminer les sous-modèles en forçant l'activation et la désactivation du STE permet d'obtenir de meilleurs résultats (voir Figure 3.14 et Figure 3.15). Par exemple, l'évolution des températures types, les températures dans le lit de roches et les variations de la température intérieure suivent les

mêmes dynamiques qu'en réalité, malgré une sous-estimation des températures en début et fin de saison et une surestimation en milieu de saison. Il est alors proposé de procéder à une campagne de calibration des modèles afin de tenter d'ajuster les paramètres incertains du modèle et de gagner assez en précision pour pouvoir inclure la simulation de l'état du STE au modèle sans provoquer les problèmes visibles sur la Figure 3.14.

Il a également été observé une forte disparité des conditions extérieures et intérieures pendant la saison de culture. Les sous-modèles ayant été validés sur des périodes courtes (du 23 août au 1^{er} septembre 2017 pour le sous-modèle de serre et du 31 mai au 6 juin 2019 pour le sous-modèle de stockage) ne représentant pas les conditions climatiques d'une saison de culture complète, il est alors proposé de réaliser une calibration utilisant un algorithme d'évolution différentielle sur les sous-modèles sur les périodes représentatives étudiées. La recalibration des sous-modèles (les sous-modèles ayant déjà été calibrés par Piché (2021)) permettra de définir une stratégie d'ajustement du modèle SLR, en isolant les paramètres indépendants du moment dans la saison et en fixant des points d'attention sur les phénomènes dépendant des conditions extérieures.

L'obtention d'un modèle de serre liée à un système de stockage thermique de l'énergie a consisté en un couplage de deux sous-modèles : un sous-modèle de serre et un sous-modèle de système de stockage. Le sous-modèle de serre vise à simuler la température de l'air intérieur de la serre en établissant des bilans thermiques sur les différents éléments de la serre tout en prenant en compte l'impact des conditions extérieures. Le sous-modèle de stockage permet de calculer la température de l'air en sortie du système de stockage grâce à une division du lit en plusieurs couches successives échangeant thermiquement grâce à l'air soufflé dans les roches. Ainsi, une fois les paramètres du sous-modèle (dimensions, caractéristiques thermiques) renseignés, la température d'entrée du STE ainsi que l'information d'activation sont les seules variables d'entrée du modèle. Le couplage des sous-modèles consiste en la création de deux liens thermiques entre la serre et le STE : un lien d'entrée entre l'air de la serre et la première maille du STE (la température intérieure de la serre devient alors la température d'entrée du STE), et le lien opposé entre la dernière maille du STE et la serre. De plus, la température de

la serre est utilisée afin de contrôler les ventilateurs du STE. L'analyse initiale du modèle a montré que le modèle SLR n'était pas valide en l'état actuel. Le CHAPITRE 4 traitera de la calibration des paramètres du sous-modèle de serre et du modèle SLR dans l'objectif de gagner en précision et de pouvoir valider le modèle SLR.

CHAPITRE 4

PREMIÈRE PHASE D'AJUSTEMENT : CALIBRATION ET ÉTUDE DES MODÈLES NUMÉRIQUES

L'analyse initiale du modèle SLR a montré que les simulations étaient physiquement correctes, mais qu'elles n'étaient pas précises. Afin d'améliorer la précision de simulation, un processus de calibration utilisant un algorithme d'évolution différentielle est réalisé. Le fonctionnement d'un algorithme d'évolution différentielle est détaillé dans la revue de la littérature à la section 1.3.2 et le paramétrage de l'algorithme choisi est détaillé dans la méthodologie à la section 2.3. Ainsi le sous-modèle de serre est recalibré et analysé dans la section 4.1 et la calibration du modèle SLR est abordée dans la section 4.2. L'analyse des températures simulées par le modèle SLR est menée dans la section 4.3 puis l'étude des échanges énergétiques entre la serre et le système de stockage est réalisée dans la section 4.4.

4.1 Calibration du sous-modèle de serre

Le sous-modèle de serre développé par Piché (2021) a été calibré sur une période de 9 jours, du 23 août au 31 août 2017 avec un RMSE sur la température intérieure de 1,53 °C. Il a été vu précédemment que le climat à Kuujuaq est très variable sur la durée de la saison de culture. Cette section vise à étudier la validité du sous-modèle sur une période plus longue et à recalibrer le sous-modèle si besoin. La Figure 4.1 montre l'évolution de la température dans la serre sur une période combinant 3 dizaines de jours représentant le début, le milieu et la fin de la saison : du 11 au 21 mai, du 21 au 31 juillet et du 20 au 30 septembre 2017.

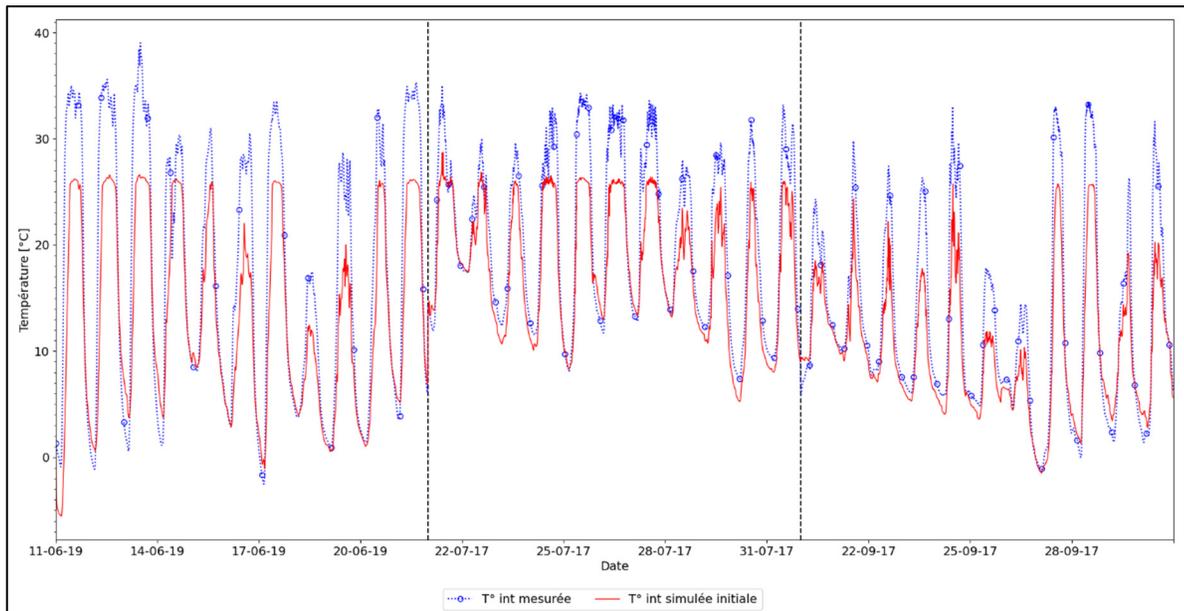


Figure 4.1 Température intérieure de la serre simulée initialement sur les périodes représentatives de la saison 2017

La Figure 4.1 représente la température intérieure de la serre mesurée et simulée sur les périodes d'étude de la saison 2017, ce qui permet d'étudier le sous-modèle de serre avant l'installation du STE à Kuujuaq. Les périodes d'étude ont été concaténées en une figure unique et sont séparées par des pointillés verticaux. Le sous-modèle de serre présente un RMSE de $4,67^{\circ}\text{C}$ sur l'ensemble de la saison. Le sous-modèle est beaucoup moins précis qu'attendu, avec une précision annoncée de $1,53^{\circ}\text{C}$ (Piché, 2021). Ce manque de précision semble être lié aux écarts sur les températures hautes comme visible sur la Figure 4.1.

À la suite de cette analyse, le sous-modèle de serre est recalibré avec une méthode d'évolution différentielle détaillée dans la section 1.3.2 En effet, Piché (2021) a déjà réalisé un processus de calibration mais cette méthode offre une solution qui n'est pas forcément optimale, une deuxième calibration avec un algorithme différent pourrait aboutir à une meilleure solution. Le choix des paramètres à recalibrer sera fait en réalisant une étude de sensibilité sur l'ensemble des paramètres ayant été calibrés précédemment par Piché (2021). Par la suite, deux méthodes de calibration seront testées et détaillées. Premièrement, une calibration sur l'ensemble des paramètres en utilisant la température intérieure comme métrique de calibration. Puis, comme

discuté dans le CHAPITRE 3, une étude basée sur les températures types sera réalisée : le sous-modèle de serre sera calibré en utilisant ces températures comme métriques de calibration.

4.1.1 Étude de sensibilité

L'étude de sensibilité permet d'estimer l'influence d'un paramètre sur les simulations d'un modèle. Elle est évaluée en calculant le coefficient de sensibilité selon l'équation (1.6) et dont la définition est décrite dans la section 1.3.1. Les coefficients de sensibilité par rapport au RMSE sur la température intérieure de la serre sont renseignés dans le Tableau 4.1. La fonction de chaque paramètre est décrite dans les équations du modèle explicitées dans la section 3.2. La valeur initiale utilisée pour le calcul des CS est celle calculée par la calibration initiale de Piché (2021), à laquelle 10% est ajouté afin d'avoir un écart relatif équivalent pour chaque paramètre. L'hypothèse d'un comportement linéaire des effets de la variation des paramètres sur le critère étudié a été posée. Cette hypothèse permet de considérer que l'effet relatif d'une augmentation de 10% du paramètre est équivalente à l'effet relatif d'une réduction de 10% de ce même critère. Cette hypothèse permet alors de calculer le CS avec une variation positive seulement.

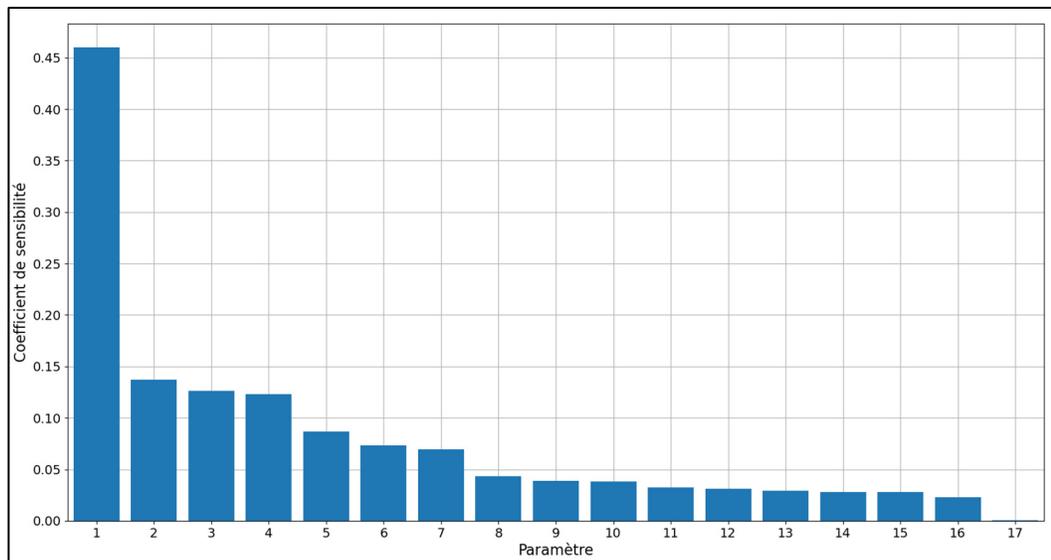


Figure 4.2 Coefficients de sensibilité des paramètres du sous-modèle de serre

Tableau 4.1 Étude de sensibilité des paramètres du sous-modèle de serre

Classement paramètre	Paramètre	Unité	Désignation paramètre	Valeur initiale	CS
1	Coefficient de transmission enveloppe	[-]	tau_Cov	0,8	0,460
2	Conductivité thermique sol	[W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	lambda_Flr	0,7	0,137
3	Émissivité sol	[-]	epsilon_Flr	0,9	0,126
4	Coefficient de réflexion canopée	[-]	rho_Can	0,1	0,123
5	Coefficient d'extinction canopée (CLO)	[-]	K_CLO_Can	0,8	0,0864
6	Hauteur ventilation maximale	[m]	h_vent_max	0,8	0,0732
7	Coefficient de décharge	[-]	C_d	0,6	0,0693
8	Coefficient de fuites	[-]	c_leakage	0,0001	0,0431
9	Coefficient d'extinction canopée (GLO)	[-]	K_GLO_Can	1	0,0388
10	Émissivité canopée	[-]	epsilon_Can	0,7	0,0383
11	Coefficient de réflexion sol	[-]	rho_Flr	0,05	0,0327
12	Coefficient de vent	[-]	C_w	0,03	0,0312
13	Température sol profond	[°C]	T_flrDeep	7	0,0291
14	Masse volumique sol	[kg.m ⁻³]	rho_d_Flr	1300	0,0283
15	Capacité thermique sol	[J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]	c_p_Flr	800	0,0283
16	Indice foliaire (LAI)	[-]	LAI	0,5	0,0227
17	Capacité thermique enveloppe	[J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]	c_p_Cov	1200	0,000332

Il existe une valeur de sensibilité similaire entre deux paramètres : la capacité thermique du sol et la masse volumique du sol (paramètres 14 et 15 sur la Figure 4.2). L'observation du modèle numérique permet de déceler le couplage de ces paramètres. En effet, ils jouent le même rôle dans une seule équation du modèle, il est donc possible d'en fixer un et de ne calibrer que le deuxième. Ici, la masse volumique a été fixée à sa valeur initiale de 800 J.K⁻¹.kg⁻¹. Par la suite, ces valeurs de sensibilité seront utilisées pour choisir les coefficients à calibrer en fonction de la stratégie de calibration.

4.1.2 Calibration avec la température intérieure (stratégie n°1)

La stratégie n°1 pour tenter de recalibrer le sous-modèle de serre est de le faire en sélectionnant tous les paramètres et en utilisant la température intérieure de la serre comme variable de calibration : c'est la donnée utilisée pour calculer l'erreur quadratique moyenne entre la simulation et la mesure. Les valeurs calibrées sont disponibles dans le Tableau 4.2. Pour rappel, les bornes de calibration sont identiques à celles définies par Piché (2021) pour la calibration du sous-modèle de serre.

Tableau 4.2 Paramètres du sous-modèle de serre calibrés avec la stratégie n°1

Paramètre calibré	Valeur min	Valeur max	Valeur calibrée
Coefficient transmission enveloppe	0,7	0,8	0,8
Conductivité thermique sol	0,7	1,7	0,7
Émissivité sol	0,8	1	0,8
Coefficient de réflexion canopée	0,1	0,2	0,1
Coefficient d'extinction canopée (CLO)	0,3	0,8	0,8
Hauteur ventilation maximale	0,5	1,5	0,5
Coefficient de décharge	0,4	0,8	0,4
Coefficient de fuites	0,0001	0,001	0,0001
Coefficient d'extinction canopée (GLO)	0,5	1	1
Émissivité canopée	0,7	1	0,7
Coefficient de réflexion sol	0,05	0,5	0,05
Coefficient de vent	0,03	0,14	0,03
Température sol profond	2	12	12
Masse volumique sol	1300	2300	2300
Indice foliaire (LAI)	0,5	2	0,736
Capacité thermique enveloppe	1000	1200	1014

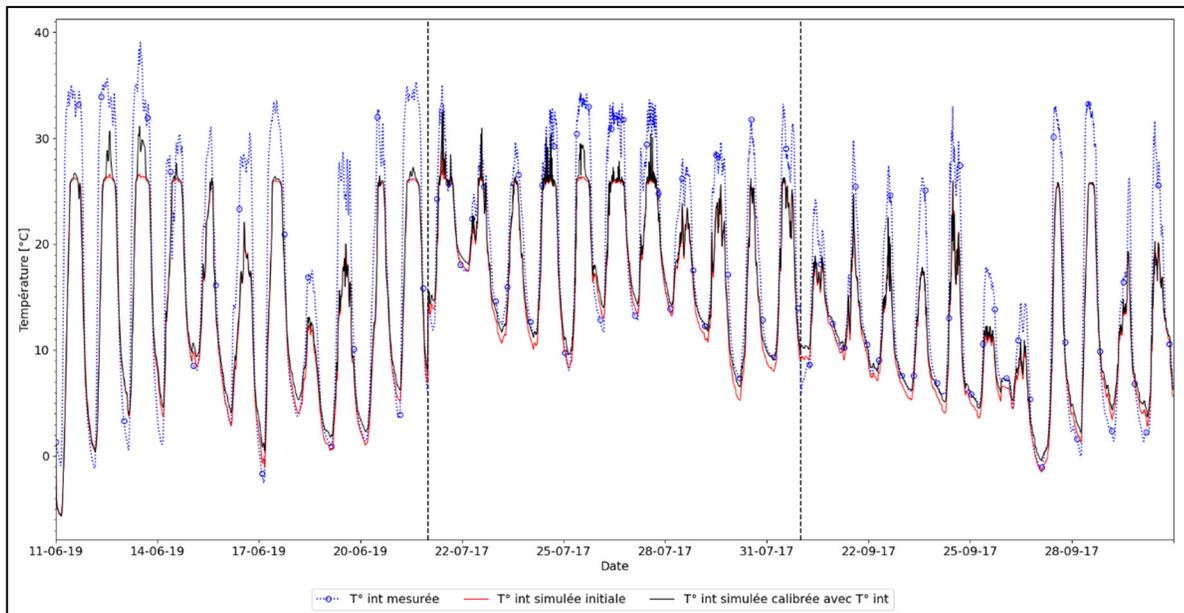


Figure 4.3 Température intérieure calibrée avec la température intérieure simulée

Cette stratégie de calibration mène à une solution ayant un meilleur comportement dans le cas des températures hautes, en particulier sur le début de la saison (à gauche des pointillés de gauche sur la Figure 4.3). Pour le cas des températures basses, la solution recalibrée présente un comportement différent, mais pas forcément meilleur : il est plus précis en fin de saison (à droite des pointillés de droite sur la Figure 4.3), mais moins bon en début de saison. Les températures restent mal estimées dans le cas de l'activation de la ventilation. Cette simulation mène à un RMSE de $4,67^{\circ}\text{C}$. Il est alors proposé de tenter de calibrer le sous-modèle en utilisant les températures types, dans la section 4.1.3. À noter que ce processus de calibration a mené à un positionnement de la grande majorité des paramètres (tous sauf l'indice foliaire (LAI) et la capacité thermique massique de l'enveloppe) à une de leurs bornes. Ce comportement sera discuté dans la section 6.2.

4.1.3 Calibration avec les températures types (stratégie n°2)

La deuxième stratégie mise en place pour tenter de recalibrer le sous-modèle de serre utilise des valeurs représentatives de la température intérieure quotidienne comme métrique de calibration. En effet, la stratégie n°1 présente le risque de considérer une variation de même amplitude, mais découplée temporellement comme étant très éloignée de la réalité. De plus, elle apporte beaucoup d'importance à la précision instantanée. En effet, le RMSE sur la température intérieure compare les données de la température mesurée et simulée à un temps donné, le pas de temps de simulation étant de 10 minutes. Dans un cas extrême, un calcul de la fonction objectif par rapport aux valeurs instantanées renverrait une valeur de précision mauvaise pour deux sinusoides de même amplitude, mais déphasées d'un quart de période. Or, ces deux problèmes ne sont pas cruciaux dans le cas de l'analyse d'une serre. Il a été vu précédemment que les températures extrêmes atteintes lors d'une journée ainsi que la température moyenne étaient plus importantes à étudier.

Ainsi, une calibration basée sur les températures types définies dans la section 2.1 est menée. Pour ce faire, les RMSE types issus des températures types et nommés $RMSE_{min}$, $RMSE_{moy}$ et $RMSE_{max}$ sont utilisés. Afin de pouvoir calibrer le sous-modèle en prenant en compte les trois critères avec une fonction objectif monocritère, la technique utilisée par Tap (2000) est exploitée : la création d'un RMSE mixte basé sur une somme pondérée des RMSE types est définie selon l'équation (1.8).

Dans le cas de la calibration de ce sous-modèle, il a été choisi de donner les poids aux indicateurs des T_{min} , T_{moy} et T_{max} de respectivement 0,4, 0,35 et 0,25. En effet, ce projet de système de stockage vise avant tout à augmenter les températures minimales dans la serre, une précision de simulation sur cette valeur est donc à privilégier.

En accord avec l'étude de sensibilité menée plus tôt, les paramètres présentés dans le Tableau 4.3 ont été sélectionnés afin de ne garder que les plus impactants tout en gardant dans le

processus de calibration l'ensemble des dynamiques thermiques mises en jeu dans la serre (Blasco, Martínez, Herrero, Ramos, & Sanchis, 2007).

Tableau 4.3 Paramètres du sous-modèle de serre calibrés avec la stratégie n°2

Paramètre calibré	Valeur min	Valeur max	Valeur calibrée
Coefficient de transmission enveloppe	0,7	0,8	0,796
Conductivité thermique sol	0,7	1,7	0,71
Émissivité sol	0,8	1	0,812
Coefficient de réflexion canopée	0,1	0,2	0,101
Coefficient d'extinction canopée (CLO)	0,3	0,8	0,788
Hauteur ventilation maximale	0,3	1,5	0,307
Coefficient de décharge	0,4	0,8	0,413
Coefficient de fuites	0,0001	0,001	0,000105
Coefficient d'extinction canopée (GLO)	0,5	1	0,581
Coefficient de vent	0,03	0,14	0,0306
Température sol profond	2	12	11,85
Masse volumique sol	1300	2300	1315
Leaf Area Index	0,5	2	1,34

Les valeurs des paramètres s'approchent en majorité des bornes, tout comme la stratégie n°1. Il est envisageable que le processus de calibration de la stratégie n°2 ait amené à tendre vers les mêmes valeurs dans le cas d'un nombre d'itérations plus important.

Les valeurs des RMSE types obtenus après le processus de calibration sont les suivants : 1,65°C pour le RMSE des températures minimales, 3,36°C pour les températures moyennes et 4,83°C pour les températures maximales. Le RMSE mixte obtenu par somme pondérée des RMSE types est alors de 3,05°C.

Cette stratégie de calibration mène alors à un RMSE sur la température intérieure de $4,31^\circ$, à comparer à un RMSE de $4,67^\circ\text{C}$ avant recalibration. La température intérieure reste très proche de la calibration initiale, sauf dans le cas des températures hautes en début et milieu de saison, pendant les moments d'activation de la ventilation. Cette température est représentée sur la Figure 4.4.

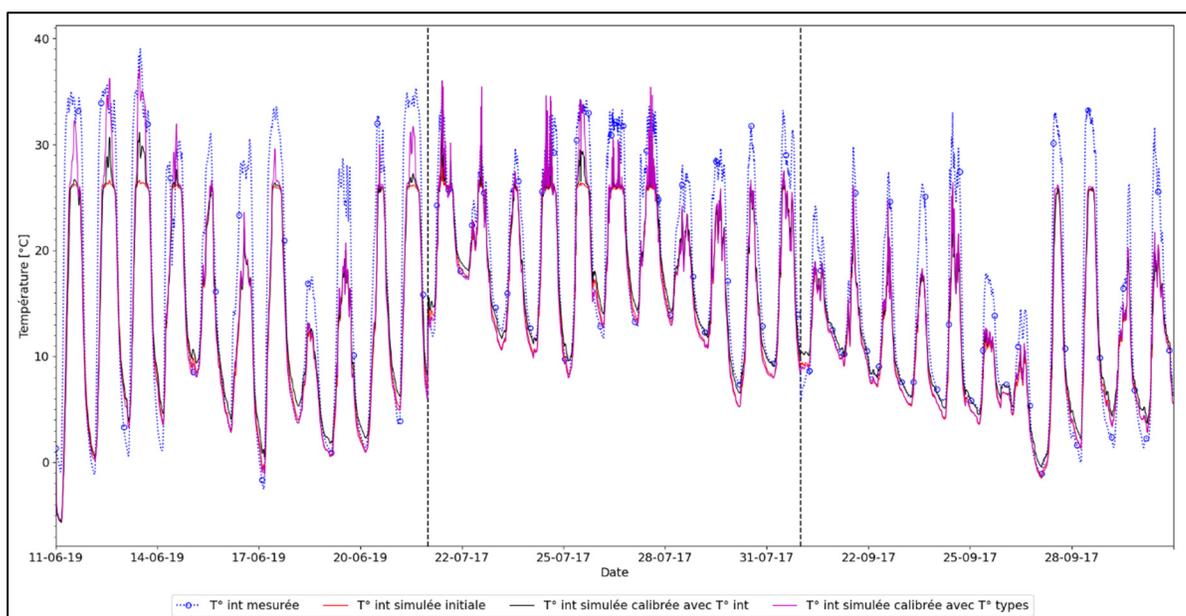


Figure 4.4 Température intérieure calibrée avec la température intérieure, et basée sur les températures types

Cette approche a apporté peu de changements dans le sous-modèle : les valeurs recalibrées atteignent des valeurs proches de leur valeur initiale, ce qui implique un comportement du sous-modèle proche de son comportement initial : passage du RMSE de $4,67^\circ\text{C}$ à $4,31^\circ\text{C}$ sur la température intérieure. Les problématiques de mauvaise estimation des températures hautes est toujours présente, ainsi que la mauvaise estimation des températures basses pendant toute la saison. La sous-estimation des températures hautes est un problème impactant l'ensemble de la période de simulation car l'erreur moyenne est de $2,92^\circ\text{C}$, ce qui correspond à une sous-estimation importante de la température intérieure. Cette problématique est certainement liée à la modélisation de la ventilation : le contrôleur est difficile à modéliser car les paramètres sont inconnus et couplés à des temporisations entre différentes phases d'ouverture du toit, alors

que le modèle numérique introduit une ouverture graduelle liée à la température intérieure de la serre définie dans la section 3.2.1.4. La section 4.2 visera à utiliser la même stratégie de calibration pour améliorer le modèle SLR.

4.2 Calibration du modèle SLR

Le sous-modèle de serre ayant tenté d'être recalibré, une stratégie équivalente peut être utilisée pour ajuster le sous-modèle de stockage. Malheureusement, les nombreux problèmes d'instrumentation à Kuujuaq exposés auparavant ne permettent pas d'avoir assez de confiance dans les données de température à l'intérieur ou en sortie du STE pour les utiliser dans un processus de calibration. La solution pour tenter de calibrer le sous-modèle de STE est donc de calibrer le modèle SLR en fixant les paramètres de la serre et en laissant les paramètres liés au stockage fluctuer. Pour ce faire, une étude de sensibilité des paramètres incertains est réalisée, puis le modèle SLR est calibré en concentrant le processus de calibration sur lesdits paramètres, en utilisant les températures types comme métrique de calibration, cette solution ayant donné de meilleurs résultats qu'une calibration sur la température intérieure.

4.2.1 Étude de sensibilité du modèle SLR

L'étude de sensibilité des paramètres incertains du sous-modèle reprend la même méthodologie que pour le sous-modèle de serre, en réalisant l'étude sur les paramètres calibrés par Piché (2021) lors de sa calibration initiale et en étudiant la sensibilité par rapport au RMSE sur la température intérieure de la serre. Les résultats de l'étude de sensibilité sont compilés dans le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Étude de sensibilité des paramètres du sous-modèle de stockage

Classement paramètre	Paramètre calibré	Unité	Désignation paramètre	Valeur initiale	CS sur RMSE
1	Débit d'air	[m ³ .h ⁻¹]	qc	650	1,22
2	Fraction de vide	[-]	epsilon	0,45	1,19
3	Capacité thermique roches	[J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]	c_p_Roc	900	1,17
4	Surface d'échange air-roches	[m ²]	S_RockAir	30	0,0789
5	Coefficient d'échange thermique forcé	[W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	H_RockAir_For	50	0,0774
6	Coefficient d'échange thermique naturel	[W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	H_RockAir_Nat	2	0,000313

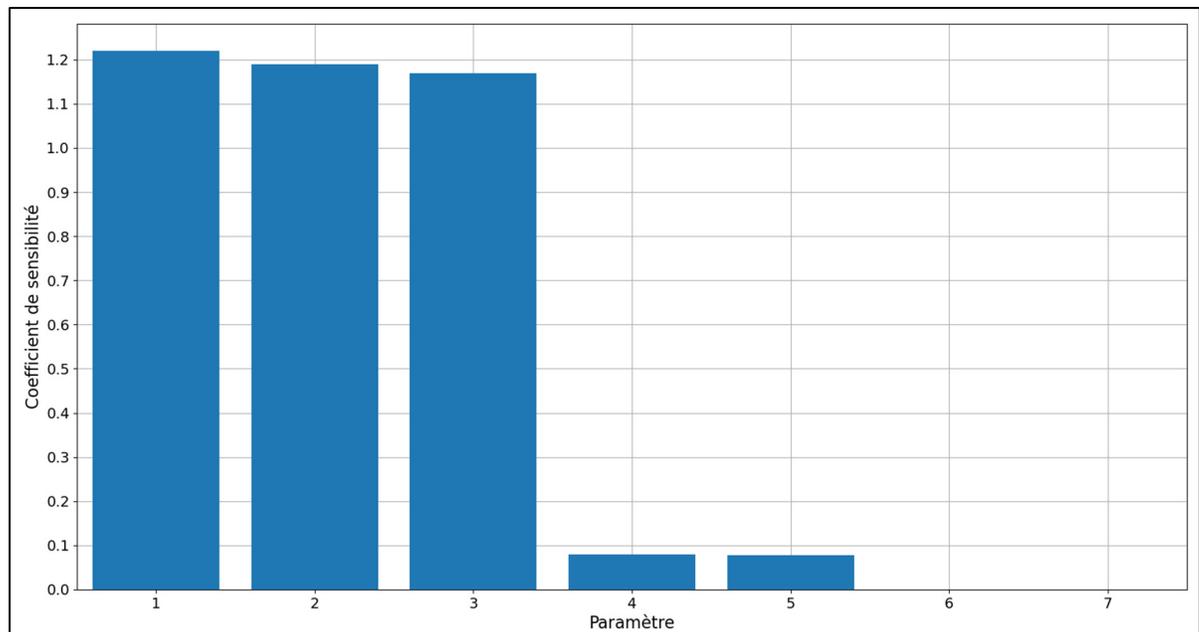


Figure 4.5 Valeur des coefficients de sensibilité des paramètres du sous-modèle de stockage

Au vu du peu de paramètres à calibrer et de la non-liaison de deux paramètres qui se traduirait par des coefficients de sensibilité égaux, il est décidé d'intégrer les six paramètres dans le processus de calibration.

4.2.2 Calibration avec les températures types

Le modèle SLR est calibré du 31 mai au 22 juillet 2019 sur un pas de temps de 10 minutes. De même que pour la calibration des paramètres du sous-modèle de serre, les bornes de calibration des paramètres du sous-modèle de stockage sont repris de Piché (2021). La valeur des paramètres calibrés est disponible dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Paramètres du sous-modèle de stockage calibrés avec le modèle SLR

Paramètre	Valeur min	Valeur max	Valeur initiale	Valeur calibrée
Débit d'air	500	850	750	822
Fraction de vide	0,3	0,5	0,45	0,301
Capacité thermique roches	800	1000	900	965
Surface d'échange air- roches	10	100	50	64,2
Coefficient d'échange thermique forcé	30	60	50	30,1
Coefficient d'échange thermique naturel	2	10	2	3,87

Le résultat de la calibration du sous-modèle de stockage sur la température intérieure de la serre est représenté sur la Figure 4.6 : la température mesurée est en pointillés bleus, la température simulée avant calibration du sous-modèle de stockage est en rouge et la température simulée après calibration est en noir.

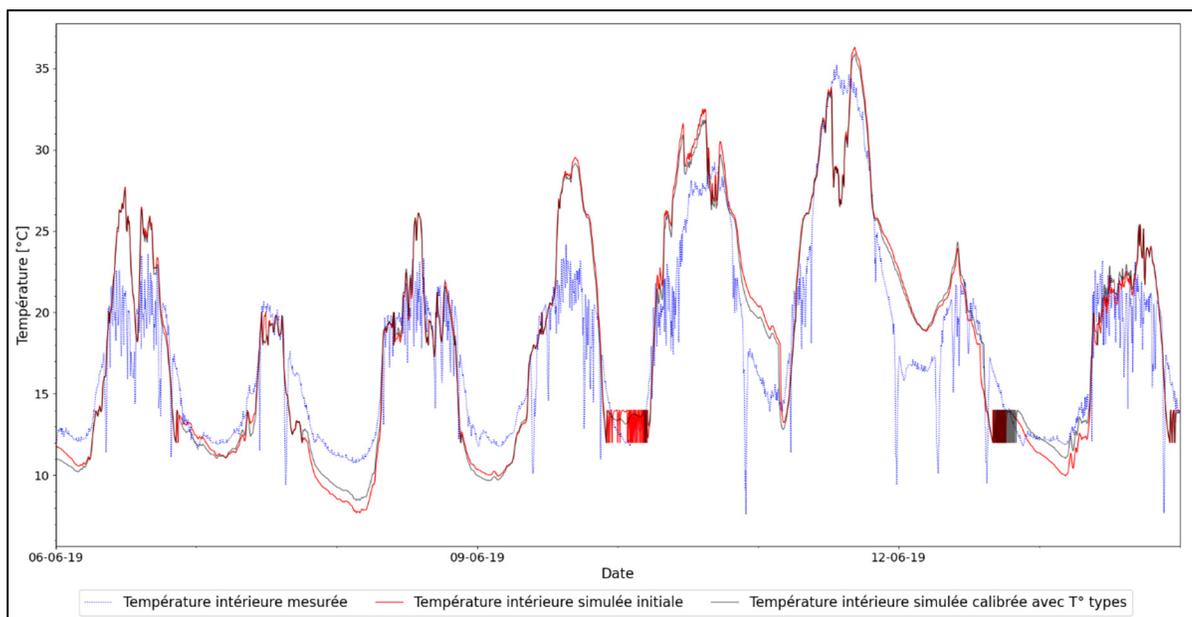


Figure 4.6 Température intérieure du système SLR mesurée, simulée avant et après recalibration du 6 juin au 14 juin 2019

Pour le cas des RMSE types, la précision sur la température minimale est de $2,46^{\circ}\text{C}$, de $2,23^{\circ}\text{C}$ sur la température moyenne et $4,10^{\circ}\text{C}$ sur la température maximale. Après pondération des indicateurs, le RMSE mixte est de $2,79^{\circ}\text{C}$.

Le RMSE sur la température intérieure de la serre atteint par le modèle SLR initial (en rouge sur la Figure 4.6) était de $3,72^{\circ}\text{C}$ sur la période étudiée, contre $3,65^{\circ}\text{C}$ après calibration des paramètres du STE (en noir sur la Figure 4.6).

La Figure 4.6 montre que les dynamiques thermiques suivies par le modèle calibré suivent de près les dynamiques suivies avant calibration, notamment les problématiques de sous-estimations lors des périodes froides et de surestimation lors des périodes chaudes.

Comme discuté plus tôt, toutes les stratégies de calibration du sous-modèle de serre ont tendu à fixer la majorité des paramètres à une de leur borne. Ce comportement avait été présent lors de tentatives de calibration du modèle SLR sur les périodes représentatives de la saison de culture. Elle avait alors fixé les paramètres de manière à maximiser la captation solaire et

minimiser les pertes thermiques en début et fin de saison, au moment où le modèle sous-estime les températures, et à tendre vers le comportement inverse en milieu de saison. Un tel comportement dans le cas d'une calibration du sous-modèle de serre sur une saison complète peut être symptomatique d'un sous-modèle pas assez finement modélisé, avec des comportements thermiques non pris en compte.

Une explication envisagée aux mauvaises estimations pour la saison 2019 est une mauvaise simulation du comportement thermique du système de stockage. La Figure 4.7 représente la température dans le système de mesure aux points de mesure définis dans la section 3.1.2 et visibles sur la Figure 3.4 (la sonde PT4 étant située au premier tiers du lit, la PT3 étant au milieu et la PT2 au deuxième tiers).

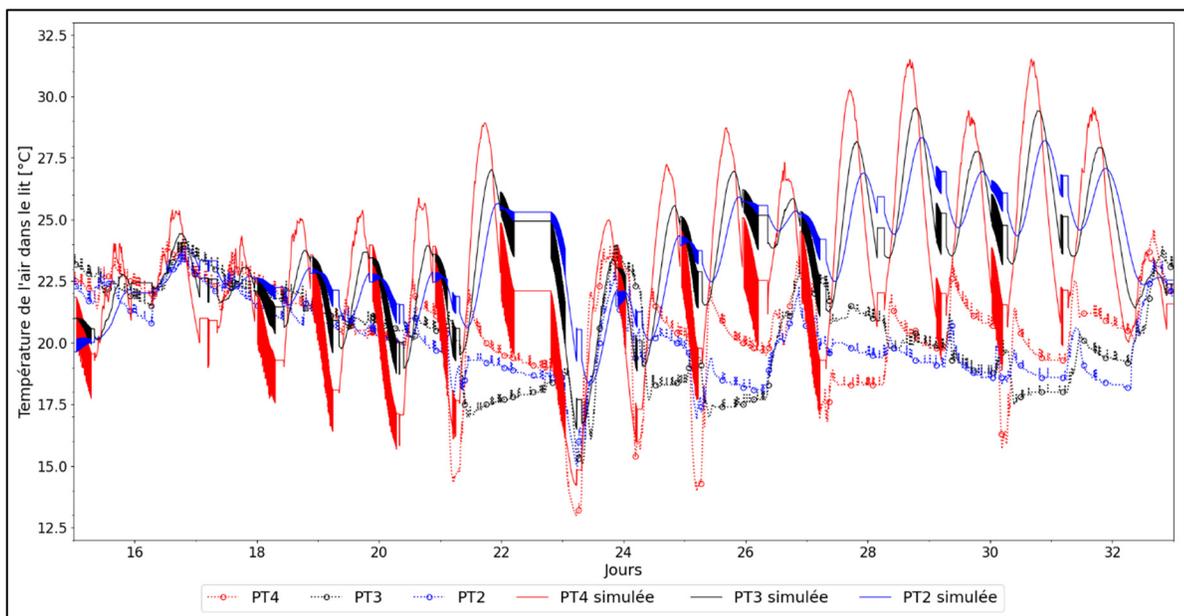


Figure 4.7 Température de l'air dans le lit du 16 juin au 3 juillet 2019

Le comportement thermique du système de stockage simulé semble être très éloigné du comportement réel. Les températures simulées, en traits pleins sur la Figure 4.7 présentent une variation quotidienne bien plus importante que les températures mesurées, en pointillés sur la

Figure 4.7. De plus, les températures moyennes dans le lit sont également très surestimées pendant la deuxième partie de la période représentée.

Afin de comparer les résultats du modèle SLR calibré avec le modèle SLR initial, la phase d'analyse des températures simulées et des énergies échangées entre la serre et le STE est complétée dans les sections 4.3 et 4.4. Cette étude permettra de trancher sur la nécessité d'approfondir les ajustements des deux sous-modèles.

4.3 Comparaison des températures obtenues

Les températures types sur les périodes représentatives d'une saison de culture sont visibles sur la Figure 4.8. Cette figure reprend les données de la Figure 3.16 en y ajoutant les températures types obtenues après calibration des modèles (en traits discontinus sur la Figure 4.8).

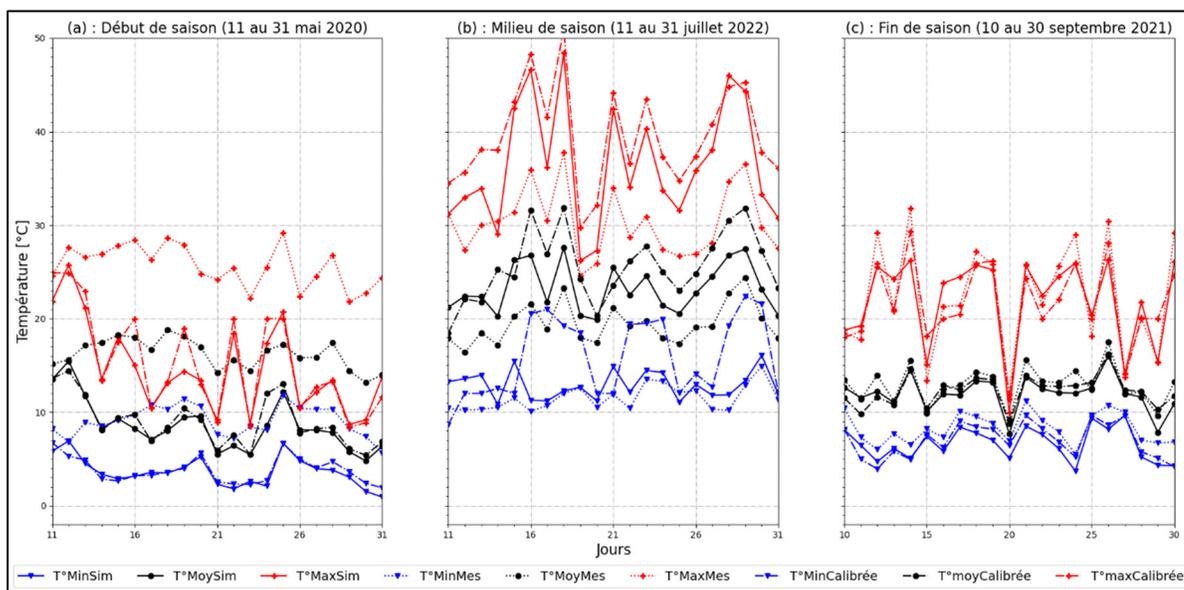


Figure 4.8 Températures types mesurées et simulées avant et après calibration

La Figure 4.8 montre un très faible impact de la recalibration dans le cas du début de saison, période (a) de la Figure 4.8. Pour le cas de la période (c), les estimations gagnent légèrement en précision. À l'inverse, en milieu de saison, les estimations sont moins bonnes qu'avant recalibration des modèles. En plus d'être moins précises, les simulations ne suivent plus les mêmes dynamiques thermiques, en particulier pour le cas des températures minimales.

4.4 Étude énergétique du modèle SLR calibré

Comme discuté précédemment, une étude énergétique d'un système de stockage permet une meilleure compréhension de ses performances et une meilleure capacité de comparaison entre différents systèmes. Ainsi, les sections suivantes traitent de l'évaluation des énergies échangées entre la serre et le système de stockage en exploitant les indicateurs de performance introduits par Piché (2021) dans l'objectif de comparer les performances mesurées et simulées.

4.4.1 Énergies chargées et déchargées

La Figure 4.9 représente les données d'énergies chargées et déchargées par le système de stockage pendant la saison de culture 2019, du 31 mai au 25 octobre, dans le cas des mesures et des simulations après calibration du modèle SLR .

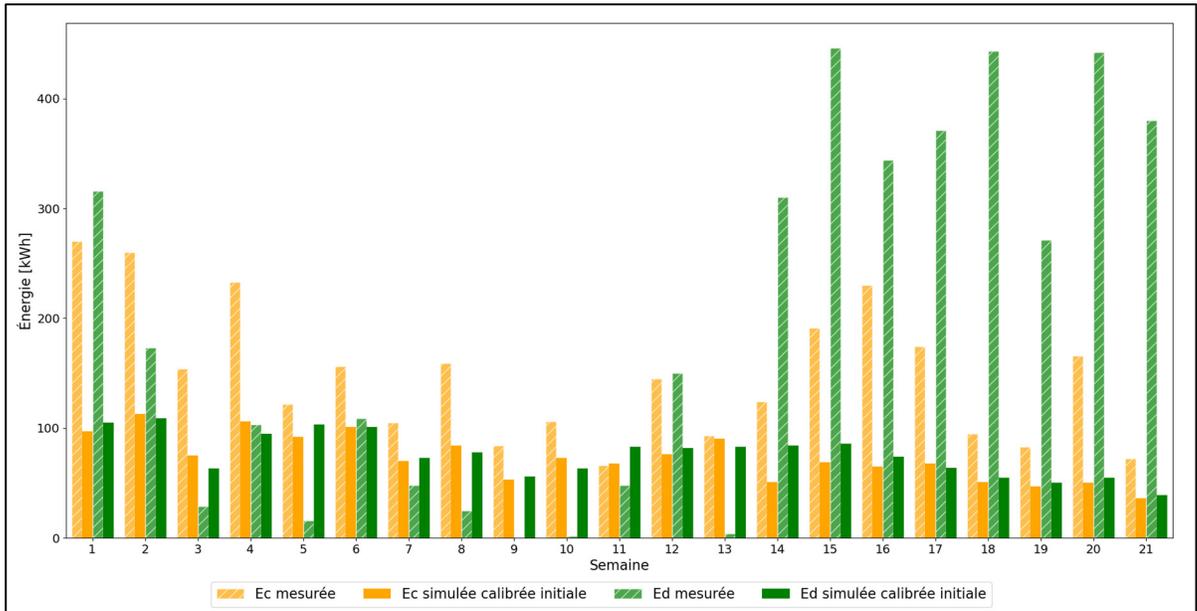


Figure 4.9 Énergies chargées et déchargées mesurées et calibrées par semaine sur la saison 2019

La Figure 4.9 montre une grande disparité entre les énergies échangées qui ont été mesurées et celles simulées. En particulier, les mesures mettent en évidence une dynamique de charge globale du système de stockage en début de saison ainsi qu'une dynamique semblable, mais en décharge, lors de la fin de saison. Ces dynamiques ne sont pas présentes dans le cas des simulations : pour une semaine données, l'énergie chargée est très proche de l'énergie déchargée.

Un deuxième problème, mis au jour par la Figure 4.9, est que le total de l'énergie déchargée par le système de stockage n'est pas égal au total de l'énergie chargée dans le cas des mesures : le système de stockage a chargé 3088 kWh et déchargé 4030 kWh sur cette période, soit environ 1000 kWh d'écart. Une explication à cette inégalité pourrait être une charge initiale du STE: le système aurait pu être chargé avant le début de la saison de culture et déchargé totalement à la fin de la saison. Une étude d'ordre de grandeur peut évaluer cette hypothèse : le lit de roches est passé d'une température moyenne de 20°C en début de saison à 6°C en fin de saison. Sachant que la masse thermique approximative des roches est de 18 MJ.K⁻¹, soit 5

kWh.K^{-1} , une baisse de 14°C correspond donc à une décharge de 70 kWh. Ceci est loin des 1000 kWh d'écart mentionné précédemment et n'explique donc pas cette différence.

4.4.2 Exploitation des indicateurs de performances

Afin d'évaluer les performances du système de stockage, les indicateurs de performances définis et exploités par Piché (2021) sont calculés dans le cas des simulations. Ils sont présentés dans le Tableau 4.6 avant et après calibration, avec les résultats des mesures. Pour faciliter la compréhension de ces indicateurs, ils ont été tracés sur la Figure 4.10. Les équations définissant les différents indicateurs sont disponibles dans la section 1.1.2 mais on rappelle que le coefficient de performance (COP) est le rapport entre l'énergie déchargée et l'énergie électrique utilisée, l'efficacité de charge (η_c) est le rapport entre l'énergie chargée et l'énergie disponible et l'efficacité de décharge (η_d) est le rapport entre l'énergie déchargée et l'énergie chargée.

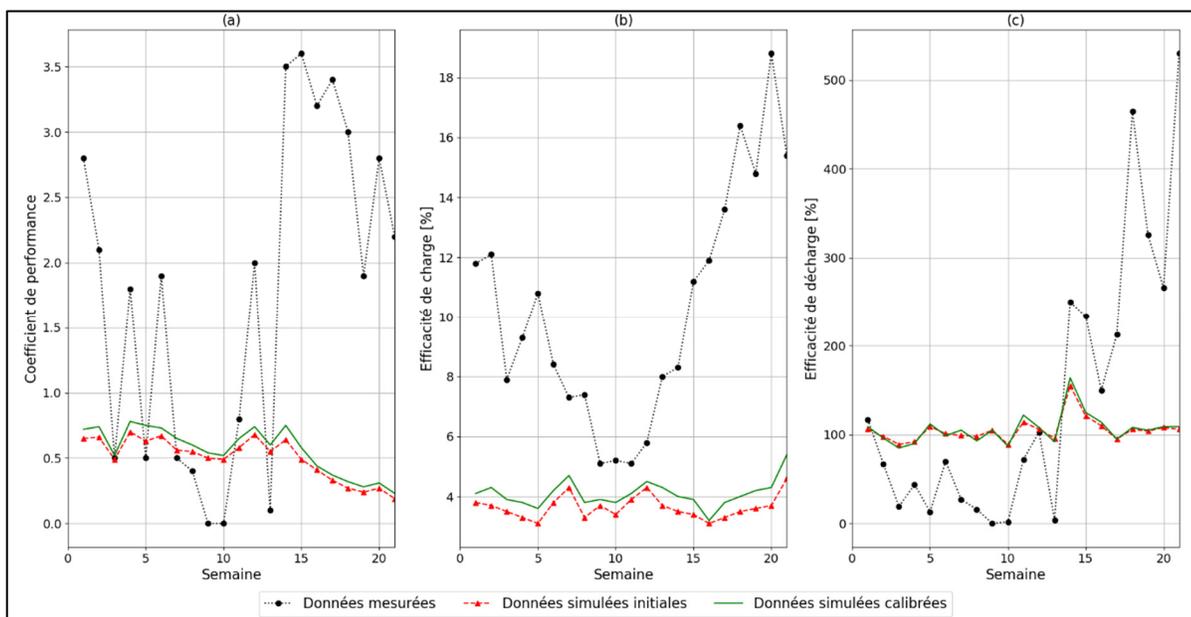


Figure 4.10 Coefficients de performance pour la saison 2019

Tableau 4.6 Indicateurs de performance mesurés, simulés avant et après calibration sur la saison 2019

Semaine	COP mesuré	COP simulé	COP calibré	η_c mesuré [%]	η_c simulé [%]	η_c calibré [%]	η_d mesuré [%]	η_d simulé [%]	η_d calibré [%]
1	2,8	0,65	0,72	11,8	3,8	4,1	117	106	109
2	2,1	0,66	0,74	12,1	3,7	4,3	67	98	96
3	0,5	0,49	0,52	7,9	3,5	3,9	19	89	85
4	1,8	0,7	0,78	9,3	3,3	3,8	44	92	90
5	0,5	0,63	0,75	10,8	3,1	3,6	13	109	112
6	1,9	0,67	0,73	8,4	3,8	4,2	70	101	99
7	0,5	0,56	0,65	7,3	4,3	4,7	27	99	105
8	0,4	0,55	0,6	7,4	3,3	3,8	16	98	93
9	0	0,5	0,54	5,1	3,7	3,9	0	105	105
10	0	0,49	0,52	5,2	3,4	3,8	2	89	87
11	0,8	0,58	0,65	5,1	3,9	4,1	72	114	122
12	2	0,68	0,74	5,8	4,3	4,5	103	106	108
13	0,1	0,55	0,6	8	3,7	4,3	4	96	92
14	3,5	0,64	0,75	8,3	3,5	4,0	250	155	164
15	3,6	0,49	0,58	11,2	3,4	3,9	234	121	125
16	3,2	0,41	0,44	11,9	3,1	3,2	150	110	114
17	3,4	0,33	0,37	13,6	3,3	3,8	213	95	95
18	3	0,27	0,32	16,4	3,5	4,0	465	106	108
19	1,9	0,24	0,28	14,8	3,6	4,2	326	104	105
20	2,8	0,27	0,31	18,8	3,7	4,3	266	108	109
21	2,2	0,19	0,23	15,4	4,6	5,4	530	106	109

La dynamique visible sur les trois indicateurs de performances représentés sur la Figure 4.10 est la constance des indicateurs simulés : ils varient peu pendant la saison. Cette dynamique est retrouvable sur les énergies chargées et déchargées de la Figure 4.9. Ces observations montrent que le modèle numérique ne permet pas de simuler les dynamiques temporelles à l'échelle de la saison. L'évolution du coefficient de performance simulé, représenté sur la Figure 4.10a), ne suit pas les mêmes dynamiques que le coefficient de performance mesuré. Cette disparité est due notamment à une simulation du temps d'activation du système de stockage (estimé en intégrant l'état d'activation du STE sur l'ensemble de la saison) très surestimée dans le cas des simulations : l'observation du temps d'activation montre que le système est activé pendant 83% du temps dans le cas des simulations contre 53% du temps en réalité. Cette surestimation du temps d'activation engendre une surestimation des dépenses électriques simulées, donc une sous-estimation du coefficient de performance.

Comme discuté dans la section 4.4.1, l'évolution de l'efficacité de décharge représentée sur la droite de la Figure 4.10 montre que la dynamique de charge et décharge saisonnière du STE n'est pas suivie par les simulations : le coefficient de récupération est toute la saison proche de 100%, ce qui signifie que l'énergie chargée pendant une semaine est déchargée la même semaine.

Il semblerait que le sous-modèle de stockage soit incomplet et ne permette pas de simuler correctement son comportement thermique. Il a été vu dans la revue de littérature que les modèles de lits de roches sont en majorité considérés adiabatiques. En revanche, certains modèles visent à inclure l'incidence des transferts thermique à travers les murs entourant le lit (Esence et al., 2017). Cette hypothèse pourrait permettre de mieux simuler le comportement énergétique du STE.

Le travail réalisé dans ce chapitre a consisté en une analyse finale de trois systèmes de stockage de l'énergie: le système réel instrumenté à Kuujuaq, le système modélisé avant recalibration et le système modélisé après recalibration. Cette analyse a été réalisée en étudiant les températures types puis les énergies échangées entre la serre et le système de stockage, en exploitant notamment les indicateurs de performances définis par Piché (2021). L'étude sur les températures types a montré un faible impact de la recalibration sur ces dernières. Malgré une légère amélioration de la précision, le modèle SLR présente encore une sous-estimation des températures en début et en fin de saison et une surestimation des températures en milieu de saison. L'étude énergétique du modèle a démontré de grandes disparités avec la réalité concernant notamment les dynamiques thermiques saisonnières (charge globale du STE pendant le milieu de saison puis décharge globale en fin de saison absentes) ainsi que sur les durées de fonctionnement du STE. Le prochain chapitre détaillera une nouvelle stratégie : l'étude des résultats obtenus par le sous-modèle de stockage d'un point de vue énergétique.

CHAPITRE 5

SECONDE PHASE D'AJUSTEMENT : ÉTUDE ET ADAPTATION DU SOUS-MODÈLE DE STOCKAGE

L'étude initiale du modèle SLR réalisée dans la section 3.4 a révélé des anomalies de simulation en relation avec le système de stockage de l'énergie : mauvaises estimations de la température en sortie de stockage.

Initialement, le sous-modèle de stockage a été calibré par Piché (2021) en comparant simulations et mesures pour les températures des roches situées dans le STE ainsi que pour la température de l'air en sortie de STE. En revanche, il a été remarqué à la section 3.1.2 que l'instrumentation utilisée pour colliger les données mesurées du lit de roches de Kuujuaq n'était pas suffisamment précise pour permettre la calibration du sous-modèle. Il est alors nécessaire de choisir une autre manière d'étudier le sous-modèle de stockage que par l'étude des températures des roches s'y trouvant. Alors, une étude énergétique du sous-modèle de stockage est menée dans ce chapitre en calculant l'énergie thermique chargée et déchargée par le STE pendant la saison de culture. De plus, plusieurs hypothèses de simulation concernant les échanges avec la terre entourant le STE seront envisagées. Ce chapitre sert alors de phase d'essais-erreurs permettant de définir les modifications qui seront apportées au modèle SLR.

La section 5.1 vise à réaliser l'étude énergétique du sous-modèle avec les hypothèses initiales : le STE est isolé thermiquement, donc seuls les flux thermiques en entrée et en sortie de lit font évoluer son énergie interne. La section 5.2 vise à évaluer une nouvelle hypothèse de simulation : le système de stockage simulé perd une puissance thermique constante, permettant d'explorer la piste d'une perte d'énergie du STE vers l'extérieur. Enfin, la section 5.3 permet de tester une troisième hypothèse de simulation : le STE échange avec la terre de culture située au-dessus de lui (voir Figure 5.5), et cette dernière est considérée comme une masse thermique pouvant échanger de manière convective avec l'air situé dans le lit de roches.

5.1 Modélisation adiabatique du système de stockage de l'énergie

La revue de la littérature menée dans le CHAPITRE 1 a montré que les systèmes de lits de roches sont modélisés en posant l'hypothèse d'un comportement adiabatique du système : il est supposé parfaitement isolé de l'environnement extérieur à l'exception des flux advectifs forcés d'entrée et de sortie du système de stockage. Ainsi, le modèle développé par Piché (2021) et présenté dans la section 3.2.2 reprend lui aussi cette hypothèse. Dans ce cas, l'équation de l'énergie interne du STE E_{STE} ne dépend que du terme PANA dans l'équation (5.1) représentant le bilan énergétique du système de stockage.

$$\frac{dE_{STE}}{dt} = PANA \quad (5.1)$$

Afin d'étudier le comportement du sous-modèle de stockage, l'étude de l'Énergie Advective Nette Absorbée (ÉANA) définie dans la section 3.3 par le STE est réalisée. L'ÉANA est définie par l'équation (équation (3.26)) comme l'intégrale de la Puissance Advective Nette Absorbée (PANA) (équation (3.25)) qui est la différence entre la puissance advective entrant dans le lit (équation (3.23)) et la puissance advective sortant du lit (équation (3.24)), dans les phases d'activation du système. Ainsi, une ÉANA croissante correspond à une phase de charge et une ÉANA décroissante correspond à une phase de décharge. Une ÉANA positive signifie alors que le système a chargé plus d'énergie thermique qu'il n'en a déchargé depuis le début de la simulation.

La Figure 5.1 représente l'Énergie Advective Nette Absorbée définie ci-dessus, en faisant apparaître celle simulée en bleue et celle mesurée en rouge sur une période de 85 jours, du 30 mai 2019 au 23 août 2019 dans le cas d'un seul lit de roches. Le système de stockage étant considéré adiabatique dans cette sous-partie, l'ÉANA correspond alors à l'énergie chargée nette depuis le début de la simulation, car seuls les flux advectifs d'entrée et de sortie du STE font varier l'énergie interne du système.

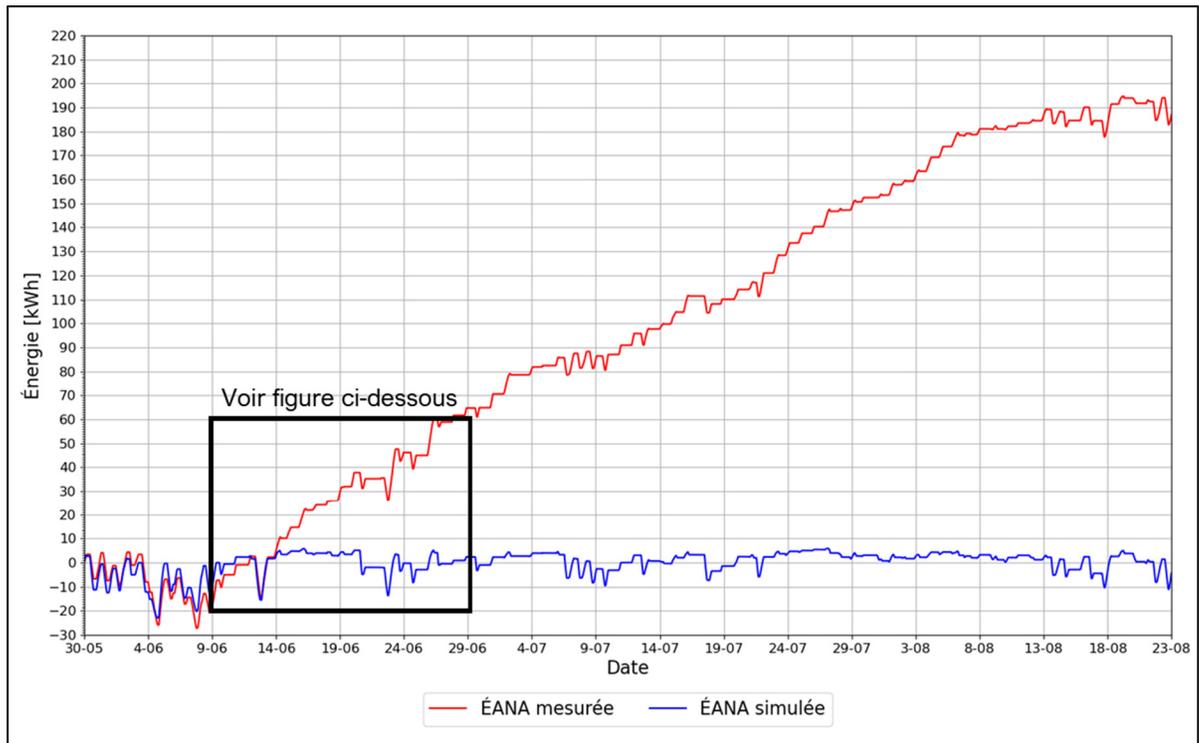


Figure 5.1 Énergie advective nette absorbée mesurée et simulée du 30 mai 2019 au 23 août 2019

La Figure 5.1 montre une différence significative de comportement entre les simulations et les mesures. En effet, l'ÉANA reste comprise entre -20 et 5 kWh et seules les variations quotidiennes de son état (dues aux phases de charge et de décharge) sont visibles. À l'inverse, les mesures montrent, en plus de ces variations quotidiennes, une variation globale de l'ÉANA : cette dernière croît linéairement pour atteindre environ 200 kWh d'énergie absorbée en fin de la période étudiée. La Figure 5.2 est un zoom de la Figure 5.1 entre le 9 et le 29 juin 2019 et permet de représenter les différentes phases discutées ci-dessus.

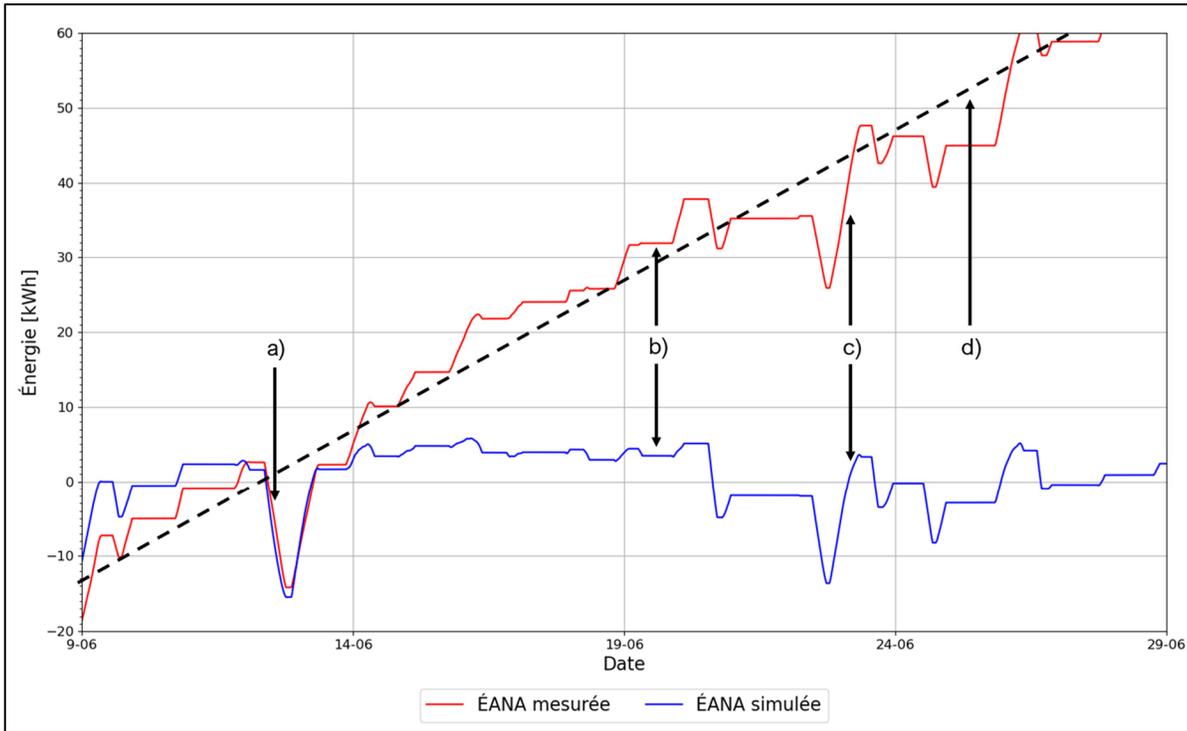


Figure 5.2 Zoom sur la Figure 5.1

La Figure 5.2 permet de voir avec précision les différentes phases de fonctionnement du STE : la flèche a désigne une phase de décharge : l'énergie advective nette absorbée par le STE est décroissante. À l'inverse, une phase d'ÉANA croissante désignée par la flèche c traduit une phase de charge. Lorsque le système est à l'arrêt, aucune puissance advective n'est échangée, l'ÉANA reste alors constante (flèche b). Enfin, une dynamique de croissance globale de l'ÉANA pour les mesures, discutée à la fin de cette section, est représentée par les pointillés d.

Concernant l'analyse de la simulation, le système étant supposé adiabatique dans cette section, les seuls flux énergétiques faisant varier l'énergie interne du système sont les flux advectifs d'entrée et de sortie lorsque le système est en marche. De même, la seule manière pour le système de faire varier son énergie interne est de faire varier la température de l'air et des roches. Ainsi, l'énergie chargée varie autour de l'énergie initiale avec une variation quotidienne correspondant aux phases de charge et de décharge (a et b de la Figure 5.2). Ainsi,

une variation de 25 kWh correspond à une variation approximative de la température des roches de 13°C.

Pour le cas des mesures, les données semblent indiquer une perte thermique, ce qui invaliderait l'hypothèse d'adiabaticité du STE. En effet, en 85 jours, l'ÉANA atteint environ 200kWh, ce qui correspondrait à une variation de la température des roches de 104°C, ce qui est une température inatteignable dans la serre (et donc dans le STE). L'hypothèse d'adiabaticité du lit est alors infirmée par ce résultat. Ainsi, pour la suite, la présence d'une perte thermique sera considérée : le système charge plus d'énergie thermique qu'il n'en décharge, car il n'est pas parfaitement isolé. La prochaine section visera donc à simuler le système de stockage en ajoutant un terme de perte à l'équation bilan de l'air présent dans le STE.

5.2 Modélisation d'une perte thermique constante

Dans cette section, un flux de perte thermique est intégré à l'équation bilan du STE (5.2) par l'intermédiaire du bilan énergétique de l'air.

$$\frac{dE_{STE}}{dt} = P_{ANA} - \dot{Q}_{pertes} \quad (5.2)$$

Afin de simuler une perte thermique du STE, un flux \dot{Q}_{perte} constant est ajouté à l'équation bilan de l'air, comme décrit par l'équation (5.3) :

$$\frac{\varepsilon_{lit} \cdot \rho_{air} \cdot V_{lit} \cdot c_{p,air}}{N_{lit}} \cdot \frac{dT_{air(i)}}{dt} = \dot{Q}_{RocAir(i)} + \dot{Q}_{Air(i-1)} - \dot{Q}_{Air(i)} - \dot{Q}_{perte} \quad (5.3)$$

Ce flux de perte a été calculé en considérant 200kWh de perte en 85 jours soit 100W (200kWh / (85 jours*24h/jour) \approx 100 W) de perte totale répartis également entre les dix mailles du sous-modèle de stockage, ce qui correspond à un \dot{Q}_{perte} de 10W par maille. La Figure 5.3 représente l'ÉANA simulée ainsi que mesurée du 30 mai 2019 au 23 août 2019.

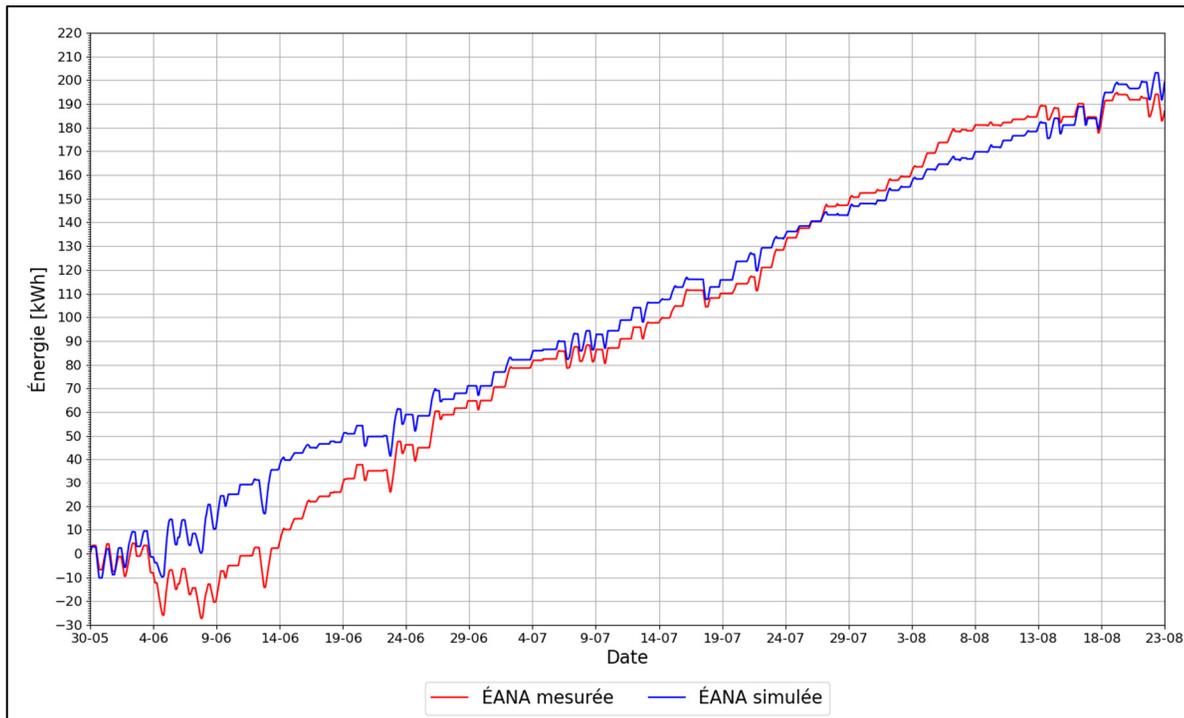


Figure 5.3 Énergie advective nette absorbée avec hypothèse de perte thermique du 30 mai 2019 au 23 août 2019

Cette modification, illustrée à la Figure 5.3, présente une dynamique de simulation proche des mesures, avec des phases de charge et de décharge quotidiennes et une composante linéaire de croissance de l'ÉANA. Cette croissance est due au fait que le système n'est plus adiabatique, donc l'ÉANA n'est plus équivalente à l'énergie chargée : les pertes thermiques ajoutées au sous-modèle rentrent en compte. L'ÉANA a un comportement de croissance globale, car le système étant soumis à une perte thermique, une partie de l'énergie advective d'entrée devient soit une énergie advective de sortie, soit une énergie de perte.

Afin de valider ou d'infirmer cette hypothèse de perte thermique, il est proposé d'étudier les résultats sur une fenêtre temporelle plus large : la Figure 5.4 représente les mêmes données sur une période allant jusqu'au 25 octobre 2019.

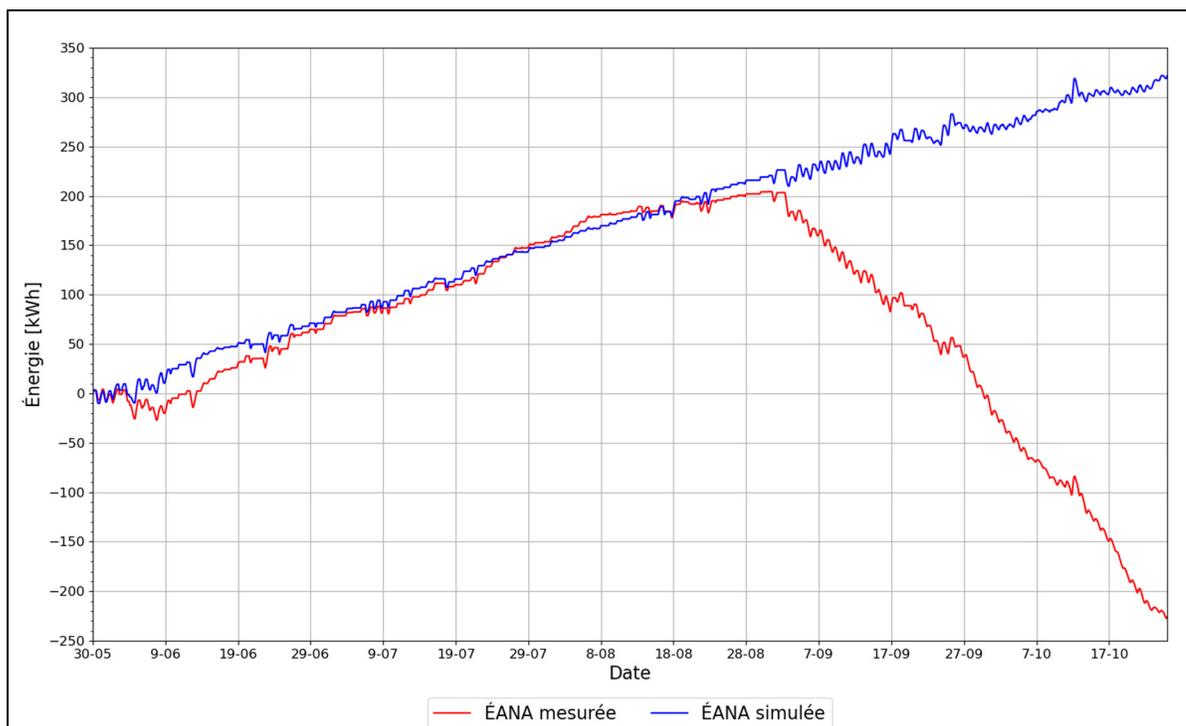


Figure 5.4 Énergie advective nette absorbée avec hypothèse de perte thermique du 30 mai 2019 au 25 octobre 2019

La Figure 5.4 met en évidence un inversement de la tendance pour les mesures à partir du 2 septembre 2019 : à partir de cette date, le système de stockage décharge plus d'énergie que ce qu'il charge, ce qui invalide l'hypothèse d'une perte thermique expliquant ces variations. En revanche, cette date de basculement correspond également à un changement de climat à Kuujuaq et dans la serre : les températures moyennes commencent à baisser, ce qui fait croître les écarts de température dans la serre entre le jour et la nuit. Ainsi, les températures dans la serre et dans le lit de roches sont moins proches, ce qui augmente les échanges énergétiques entre les deux systèmes. Ceci est observable sur la Figure 5.4 avec l'augmentation de l'amplitude des variations quotidiennes d'énergie chargée.

Une nouvelle hypothèse pour expliquer ce comportement thermique est un couplage thermique entre le STE et une masse thermique (ici la terre de culture située au-dessus) dont le temps caractéristique est de l'ordre de la saison. En d'autres termes, le STE transmet une partie de son énergie thermique à la terre pendant les jours les plus chauds de la saison, ce qui implique

une énergie déchargée inférieure à l'énergie chargée. Lorsque les moyennes de température baissent en fin de saison, le flux thermique s'inverse et la terre de culture chauffée pendant la saison transfère son énergie thermique au STE : l'énergie déchargée devient supérieure à l'énergie chargée pendant ces journées.

La prochaine section abordera la mise en place d'une stratégie de simulation d'un échange thermique entre le STE et la terre de culture jouant supposément le rôle de masse thermique dont le temps de cycle de charge-décharge est la saison de culture.

5.3 Modélisation d'un échange avec masse thermique

Dans l'objectif de simuler un lien thermique avec une masse thermique, un nœud thermique modélisant la terre de culture est ajouté au sous-modèle de stockage et est représenté sur la Figure 5.5 au-dessus du lit de roches. Un terme de flux thermique avec la terre de culture est alors ajouté à l'équation bilan du STE (5.4).

$$\frac{dE_{STE}}{dt} = PANA + \dot{Q}_{TerreSTE} - \dot{Q}_{pertes} \quad (5.4)$$

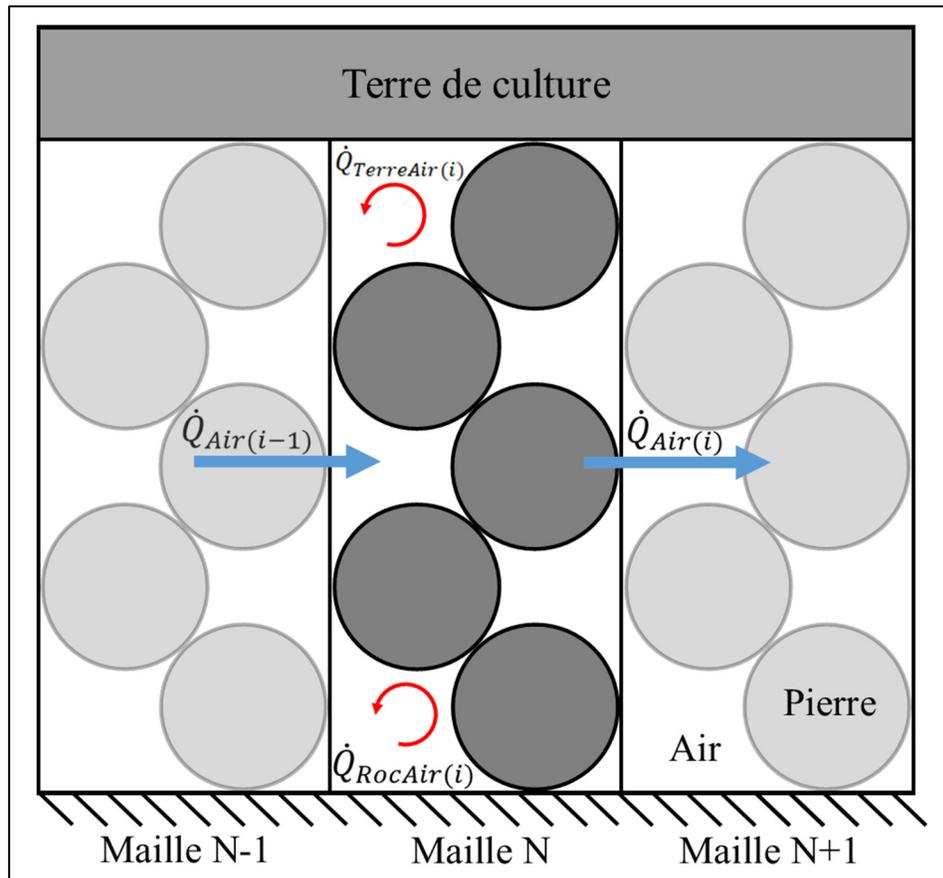


Figure 5.5 Modélisation d'une maille de stockage présentant un lien thermique avec un nœud Terre

Dans cette nouvelle stratégie de simulation, les mailles du STE sont en lien thermique avec les mailles précédant et suivant la maille étudiée, ainsi qu'un nœud Terre, comme visible sur la Figure 5.5. Ce nœud Terre est lié aux mailles du STE par l'intermédiaire d'un flux thermique convectif, et le calcul de sa température est réalisé avec l'équation (5.5).

$$m_{Terre} \cdot c_{p,Terre} \cdot \frac{dT_{Terre}}{dt} = \sum_i -\dot{Q}_{TerreAir(i)} \quad (5.5)$$

Dans cette équation, la température de la terre de culture T_{Terre} est calculée à l'aide de sa masse et de sa capacité thermique massique m_{Sol} et $c_{p,Sol}$ ainsi que des flux convectifs avec l'air des mailles i de stockage $\dot{Q}_{SolAir(i)}$ calculés par l'équation (5.6). Ces flux convectifs dépendent du

coefficient d'échange H_{SolAir} , de la surface d'échange $A_{Sol(i)}$ dans la maille ainsi que de la température de l'air dans la maille $T_{Air(i)}$:

$$\dot{Q}_{TerreAir(i)} = H_{TerreAir} \cdot A_{Terre(i)} \cdot (T_{Terre} - T_{Air(i)}) \quad (5.6)$$

Ainsi, le bilan sur l'air des mailles exprimé par l'équation (5.7).

$$\frac{\varepsilon_{lit} \cdot \rho_{air} \cdot V_{lit} \cdot c_{p,air}}{N_{lit}} \cdot \frac{dT_{air(i)}}{dt} = \dot{Q}_{RocAir(i)} + \dot{Q}_{Air(i-1)} - \dot{Q}_{Air(i)} + \dot{Q}_{TerreAir(i)} \quad (5.7)$$

La Figure 5.6 représente les résultats de cette stratégie de simulation du 30 mai 2019 au 25 octobre 2019.

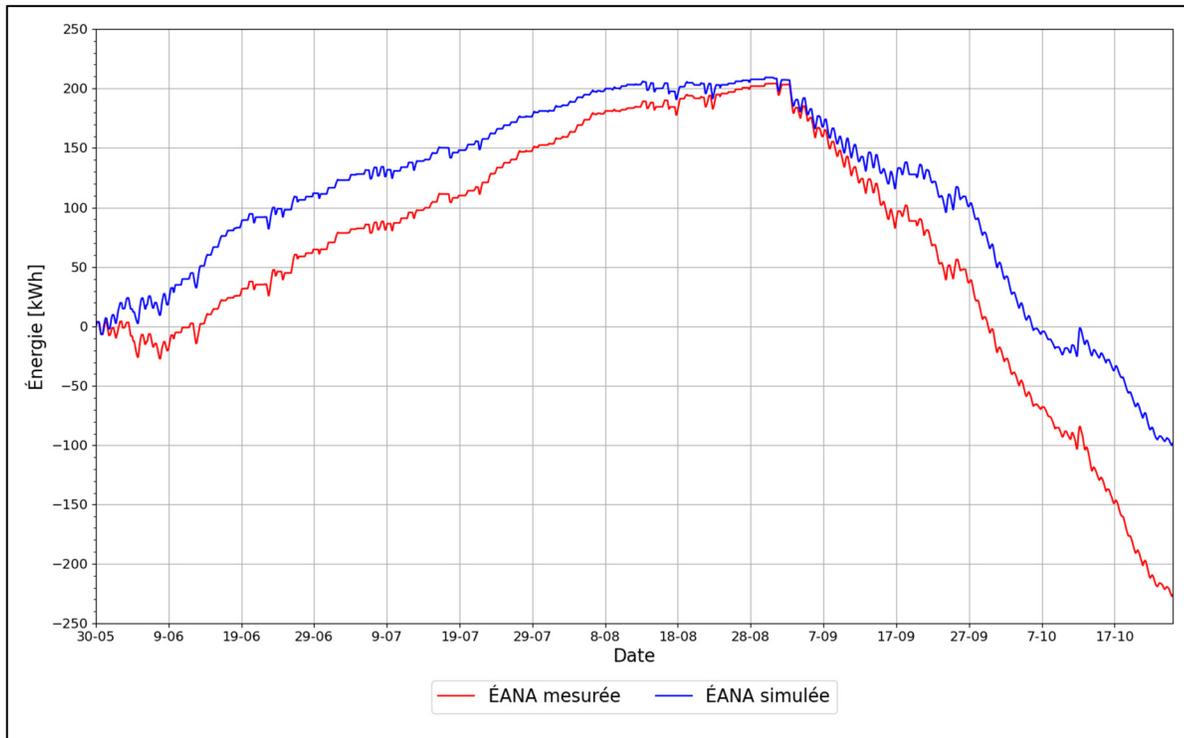


Figure 5.6 Énergie absorbée avec hypothèse de masse thermique du 30 mai au 25 octobre 2019

La Figure 5.6 illustre une simulation présentant un comportement équivalent au système réel : les phases de charge/décharge quotidiennes sont doublées d'un principe de charge/décharge saisonnier rendu possible par un lien avec la terre ayant une masse thermique estimée à 90,4 MJ.K⁻¹. Cette masse thermique importante en comparaison avec les 6,7 MJ.K⁻¹ des roches du lit doublée d'une capacité moindre de la terre à échanger de l'énergie thermique avec l'air du STE (130 W.K⁻¹ contre 1035 W.K⁻¹ pour les roches d'un lit) permet d'avoir de présenter ce comportement de stockage saisonnier.

Les résultats de l'étude du sous-modèle de stockage ont permis de montrer que l'hypothèse d'adiabaticité du STE était infirmée et qu'un échange thermique avec une capacitance thermique permet de simuler un comportement de stockage saisonnier adopté par le système réel.

Ce chapitre ayant permis de tester l'hypothèse de la masse thermique grâce à un nœud capacitif, le prochain chapitre servira à intégrer cette hypothèse au modèle SLR en la modélisant grâce à un lien entre la terre de culture du sous-modèle de serre et le STE.

CHAPITRE 6

SECONDE PHASE D'AJUSTEMENT : ADAPTATION ET ANALYSE FINALE DU MODÈLE SLR

Les sous-modèles ayant été étudiés dans les chapitres précédents, le couplage de ces sous-modèles peut être réalisé afin d'obtenir le modèle final. En revanche, quelques ajustements doivent être réalisés une fois le couplage réalisé. Dans un premier temps, l'installation d'un STE dans une serre provoque une modification du comportement thermique de la serre, même lorsque le système de stockage n'est pas en fonctionnement. La prise en compte de ces modifications dans le modèle SLR sera abordée dans la première partie de ce travail. Dans un second temps, la calibration des paramètres thermiques liés à ces ajouts sera présentée. Enfin, l'étude des simulations obtenues à l'aide du modèle SLR sera réalisée.

6.1 Ajustements du modèle SLR

Comme présenté précédemment, le modèle thermique de l'ensemble formé par la serre et le STE est le couplage entre le sous-modèle de serre et le sous-modèle de stockage. Ce couplage se matérialise par un échange thermique entre l'air de la serre et l'entrée du STE, ainsi qu'un échange thermique entre la sortie du STE et l'air, lorsque le STE est en fonctionnement. En revanche, d'autres échanges thermiques sont à considérer pour obtenir un modèle SLR complet. Premièrement, la terre de culture de la serre échange de l'énergie thermique à la fois avec l'air de la serre et avec le STE. Ce phénomène sera traité dans la section 6.1.2. Deuxièmement, les gabions installés dans la serre pour héberger les lits de roches et la terre de culture créent une masse thermique passive importante dont la modélisation est abordée dans la section 6.1.3. Enfin, le matériel de petite dimension ajouté à la serre lors de l'installation du STE impacte également les échanges thermiques dans la serre. La modélisation de ce comportement sera abordée dans la section 6.1.4. La section 6.1.5 abordera l'ajout d'un lien thermique avec le sol situé sous la serre.

6.1.1 Adaptation de la modélisation de la ventilation

Pour rappel, la modélisation de la ventilation est réalisée par l'intégration d'une fonction calculant l'ouverture de l'ouvrant du toit de la serre. Cette hauteur est calculée par l'équation (5.3) :

$$h_{venti} = \frac{h_{venti,max}}{1 + \exp(-5 * (T_{air} - \bar{T}_{OuvFer}))} \quad (6.1)$$

La hauteur d'ouverture du toit h_{venti} est calculée grâce à une hauteur d'ouverture maximale $h_{venti,max}$, à la température intérieure T_{air} et à une température d'ouverture moyenne \bar{T}_{OuvFer} . La problématique de mauvaise estimation de la température de la serre avec le sous-modèle de serre lorsque la température était élevée a été commentée dans la section 4.1. Alors l'équation (5.3) a été retravaillée en ajustant la température d'ouverture moyenne à 22,5°C contre 25,6°C initialement.

6.1.2 Terre de culture liée aux deux sous-modèles

Plusieurs raisons vont dans le sens d'une modélisation commune pour la terre de culture de la serre et celle située au-dessus des lits de roches. Pour rappel, l'installation d'un STE dans une serre implique une modification de la configuration de culture : dans le cas de Kuujjuaq, des gabions forment deux volumes (un par moitié de serre) hauts d'environ un mètre. Les lits de roches sont placés dans ces volumes jusqu'à environ mi-hauteur. La terre de culture est ensuite placée au-dessus des lits de roches. Ces volumes sont représentés sur la Figure 6.1.

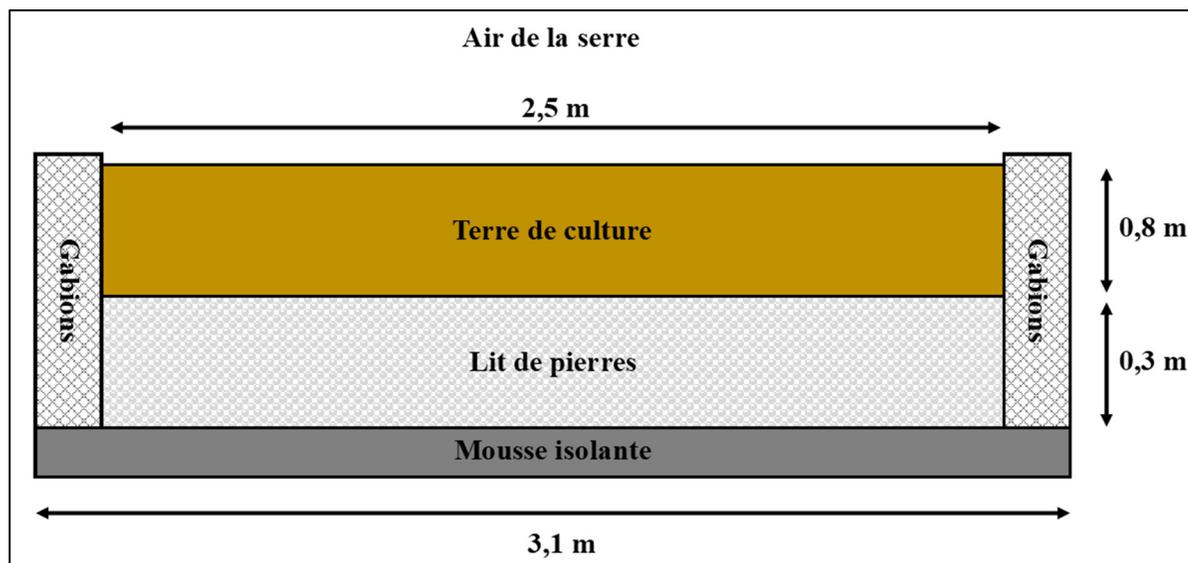


Figure 6.1 Vue en coupe des gabions, des lits de roches et de la terre de culture

Comme visible sur la Figure 6.1, les lits de roches et la terre de culture ne sont pas séparés par un matériau isolant outre la bâche en plastique rendant le lit de roches hermétique. Comme vu dans le CHAPITRE 5, les mesures réalisées à Kuujuaq montrent que le système de stockage échange avec une masse thermique provoquant une phase de charge et de décharge saisonnière. Le STE étant isolé par le bas par une couche de mousse isolante, il est envisagé que la terre de culture joue le rôle de masse thermique de stockage saisonnier.

Deuxièmement, le modèle initial de serre considère une terre de culture maillée en plusieurs couches horizontales échangeant entre elles par l'intermédiaire de flux thermiques conductifs. La maille inférieure de la serre est considérée à température constante. Or, il est difficile de défendre l'hypothèse d'une température constante à 50cm de profondeur, encore plus dans le cas où le STE est situé sous ces 50 cm et où il semble échanger avec cette même terre.

Ces indications semblent mener vers une situation où la terre de culture échange à la fois avec l'air de la serre par sa surface supérieure, et avec le lit de roches par sa surface inférieure, par l'intermédiaire d'un flux convectif entre l'air et la bâche entourant le STE sur laquelle est posée la terre de culture, tout en faisant l'objet d'un flux conductif interne. Il est alors nécessaire de

modéliser ces échanges en ajoutant un lien thermique entre les deux sous-modèles, présentés dans la Figure 6.2.

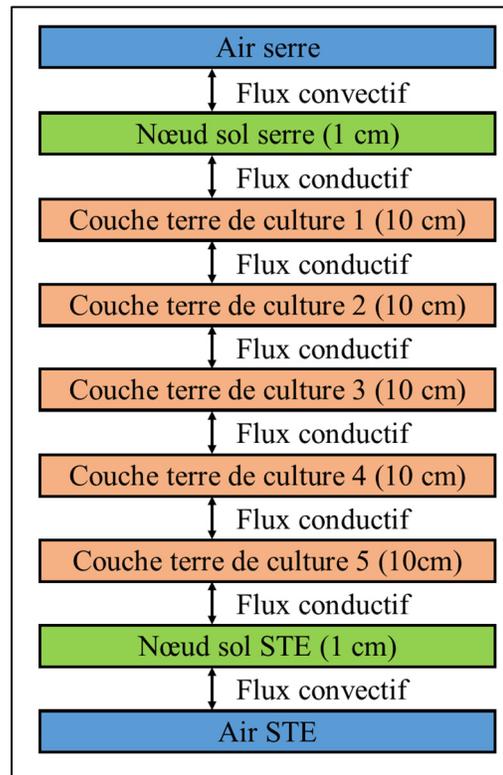


Figure 6.2 Modélisation de la terre de culture

La Figure 6.2 représente le maillage de la terre de culture en cinq couches de 10 cm de haut, et dont les couches supérieures et inférieures échangent respectivement avec les nœuds Sol de la serre et du STE (ces derniers étant uniquement des interfaces permettant de simuler les échanges convectifs avec l'air de la serre et du lit de roches, les nœuds Sol serre et Sol STE faisant chacun 1 mm d'épaisseur, ils n'influencent pas sur le modèle).

6.1.3 Modélisation des gabions

Les gabions hébergeant les lits de roches et la terre de culture sont formés de murs de grillage de 30 cm de largeur remplis de roches et sont visibles sur la Figure 6.3.



Figure 6.3 Serre de Radisson avec gabions et STE apparents

Comme visible sur la Figure 6.3, le volume de roches dans les gabions est du même ordre de grandeur que le volume de roches contenues dans le STE. En effet, le volume des gabions est d'environ 23 m^3 , contre 26 m^3 pour les 4 lits de roches. L'impact des gabions sur le comportement thermique de la serre est alors à prendre en compte en tant que stockage thermique passif.

Afin de modéliser les échanges thermiques entre les gabions et l'air de la serre, un nœud thermique « Gabions » est ajouté au modèle SLR, et dont l'équation bilan ne dépend que d'un flux thermique convectif avec l'air intérieur $\dot{Q}_{\text{GabionsAir}}$ défini par l'équation (6.2), ainsi que de la capacité thermique des gabions $C_{p,\text{gabions}}$.

$$\dot{Q}_{\text{GabionsAir}} = H_{\text{GabionsAir}} \cdot A_{\text{Gabions}} \cdot (T_{\text{Gabions}} - T_{\text{Air}}) \quad (6.2)$$

Dans cette équation, la capacité thermique des gabions $C_{p,gabions}$, le coefficient de transfert convectif $H_{GabionsAir}$ et la surface offerte par les roches à l'air $A_{Gabions}$ sont inconnus et devront faire l'objet d'une calibration afin d'estimer leur valeur.

6.1.4 Capacité thermique massique équivalente de l'air

En plus des roches contenues dans les gabions, l'installation d'un STE dans la serre implique l'installation de plusieurs éléments physiques : grilles des gabions, ventilateurs, tuyaux...

Ils ont une surface de contact avec l'air importante comparée à leur volume. Il est donc possible de supposer que leur inertie thermique est assez faible pour que leur température soit supposée être égale à celle de l'air. Leur équation bilan peut alors être mise en commun :

$$(m_{Air} \cdot c_{p,Air} + m_{Matériel} \cdot c_{p,Matériel}) \cdot \frac{dT_{Air}}{dt} = \sum_{j \neq Air} \dot{Q}_{jAir} \quad (6.3)$$

Afin de prendre en compte l'impact de ces éléments, aucun nœud n'est créé, mais une masse d'air équivalente est intégrée au modèle, afin de considérer l'énergie thermique nécessaire pour chauffer l'ensemble des éléments énoncés. Cette masse d'air équivalente permet d'intégrer la masse thermique du matériel à l'équation de l'air en supposant que le matériel a la même capacité thermique massique que l'air. Dans cette situation, la masse d'air équivalente est calculée par l'équation (6.4) et l'équation du bilan de l'air est définie par l'équation (6.5) :

$$m_{Air,eq} = m_{Air} + m_{Matériel} \cdot \frac{c_{p,Matériel}}{c_{p,Air}} \quad (6.4)$$

$$m_{Air,eq} \cdot c_{p,Air} \cdot \frac{dT_{Air}}{dt} = \sum_{j \neq Air} \dot{Q}_{jAir} \quad (6.5)$$

6.1.5 Flux thermique avec le sol sous le STE

Ayant été vu que le lien avec la terre de culture située au-dessus du STE avait un impact non négligeable sur le comportement du système, il a été décidé de tester la possibilité d'un flux thermique avec le sol situé sous le STE, malgré la couche d'isolant située entre les deux. Une campagne d'essais-erreurs étudiant l'effet sur le STE simulé de la variation des paramètres H_{SolSTE} et T_{Sol} été menée en introduisant l'équation (6.6). Cette étude a conclu en la pertinence d'un flux thermique considérant une température constante du sol situé sous la serre, ce qui correspond à un flux thermique entre le STE et le sol régi par l'équation (6.6) :

$$\dot{Q}_{SolSTE} = H_{SolSTE} \cdot A_{SolSTE} \cdot (T_{Sol} - T_{Air}) \quad (6.6)$$

Ce flux thermique dépend du coefficient de transfert H_{SolSTE} fixé à $0,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (la mousse isolante est supposée avoir une valeur de résistance thermique de $10 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$), de la surface de contact entre le STE et le sol A_{SolSTE} , de la température de l'air du STE T_{Air} et de la température T_{Sol} supposée être de 5°C . Ce flux est intégré à l'équation bilan de l'air du STE.

6.2 Calibration du modèle SLR

Afin de fixer la valeur des paramètres ajoutés au modèle SLR, un processus de calibration a été mené. Cette calibration a été réalisée en considérant l'énergie absorbée par le STE comme la variable de calibration. Elle a été menée de front entre une calibration manuelle et automatisée, en choisissant les paramètres à calibrer ainsi que les bornes de calibration heuristiquement et en utilisant le même algorithme de calibration que celui explicité au préalable. En plus des paramètres liés aux ajouts du modèle (terre de culture, gabions et capacité thermique équivalente de l'air), il a été compris lors des essais-erreurs de calibration que la température initiale de la terre de culture a un impact sur les simulations, car elle est liée à une masse thermique importante. Il a alors été décidé de l'inclure au processus de calibration. Les paramètres du modèle SLR calibrés ainsi que les bornes de calibration et leur valeur sont compilés dans le Tableau 6.1.

Tableau 6.1 Paramètres du modèle final calibrés

Paramètre	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur calibrée
Masse d'air équivalente	kg	0	500000	500000
Température initiale du sol	K	278	287	284,8
Capacité thermique massique de la terre de culture	$\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$	500	5000	5000
Conductivité thermique du sol	$\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$	0,5	1	0,5
Coefficient transfert thermique STE-sol	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	1	20	6

Plusieurs de ces paramètres obtiennent une valeur calibrée égale à une des bornes de calibration. Ces problématiques s'expliquent dans le cas des paramètres liés à la terre de culture à une difficulté à caractériser la terre : ce matériau organique peut difficilement être caractérisé par des valeurs thermiques « types », d'autant plus dans le cas d'une terre utilisée pour la culture dont le comportement thermique variera en fonction de la quantité de racines, des intrants et de l'apport en eau.

Dans le cas du matériel, la valeur de la masse d'air équivalente de 500 tonnes est très grande comparée à la valeur réelle de sa masse (537 kg) : un facteur de 930 les sépare, mais s'explique par la faible masse thermique de l'air : l'air ayant une masse volumique faible, la masse thermique équivalente au 500 tonnes d'air est équivalente à un volume de $0,14 \text{ m}^3$ de fer.

Les paramètres du modèle SLR atteignant en majorité une de leur borne pourraient traduire une mauvaise modélisation des flux physiques, mais la précision atteinte par le modèle SLR final sera suffisante pour le valider.

6.3 Analyse du modèle SLR

Le modèle SLR ayant été calibré, l'analyse des résultats fournis par ce modèle est maintenant à réaliser. Les mêmes stratégies d'analyse qu'ultérieurement vont être utilisées, à savoir une

analyse énergétique hebdomadaire et saisonnière des résultats concernant les énergies échangées entre la serre et le système de stockage dans la section 6.3.1, puis l'analyse des simulations sur des quinzaines représentatives de la saison 2019 dans la section. 6.3.2

6.3.1 Analyse énergétique du STE

L'analyse énergétique du STE vise à quantifier et à observer la capacité du modèle SLR à simuler avec précision les énergies échangées entre la serre et le système de stockage. Pour ce faire, l'observation saisonnière de l'Énergie Advective Nette Absorbée (ÉANA) définie dans la section 3.3 ainsi qu'une observation hebdomadaire des énergies chargées et déchargées seront réalisées. Premièrement, la Figure 6.4 représente l'énergie advective nette absorbée sur la saison 2019.

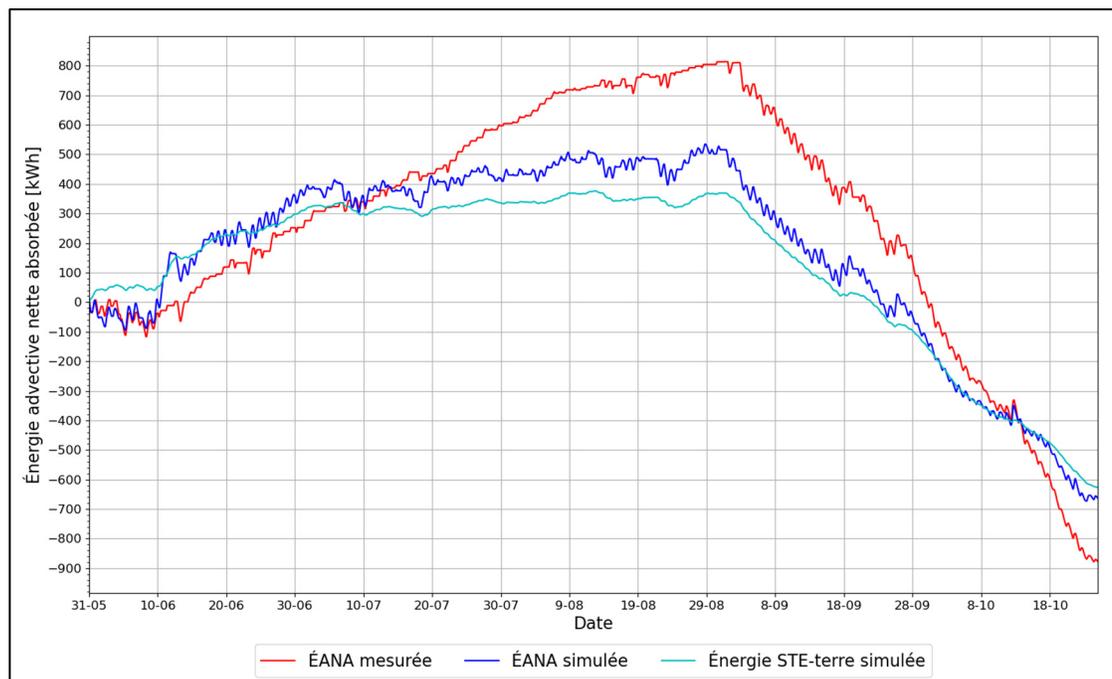


Figure 6.4 Énergie advective nette absorbée et transmise à la terre en 2019

La Figure 6.4 montre que le comportement de stockage saisonnier abordé dans l'étude du sous-modèle de stockage dans le CHAPITRE 5 a été correctement modélisé par la mise en place du lien thermique entre la terre de culture et le STE. En effet, la période entre le 31 mai et le 8

juillet voit une croissance de l'ÉANA, ce qui correspond à une augmentation de l'énergie thermique absorbée par la terre de culture. Cette énergie transmise à la terre de culture est également représentée sur la Figure 6.4 et correspond à l'intégration du flux thermique du STE vers la terre sur chaque intervalle de simulation. Entre le 8 juillet et le 30 août, l'ÉANA reste globalement constante hormis les phases de charge et de décharge quotidiennes représentant une variation d'environ 50kWh par phase. Ce plateau est également visible sur la courbe représentant l'énergie transmise à la terre de culture : peu d'échanges thermiques ont lieu entre ces deux systèmes sur cette période, donc les seules variations de l'ÉANA sont une variation de l'énergie du STE. Après le 30 août, il voit une décroissance de son ÉANA et de l'énergie transmise du STE vers la terre : cette situation correspond à la phase de décharge saisonnière et dure jusqu'à la fin de la saison.

Deuxièmement, la Figure 6.5 représente les données mesurées et obtenues à l'aide du modèle final sous forme d'histogramme représentant les énergies chargées et déchargées par le STE par semaine sur la saison 2019 (les énergies sont définies dans la section 3.3). L'histogramme permet de comparer les mesures et les simulations du modèle développé dans le CHAPITRE 6 et appelé modèle final par la suite.

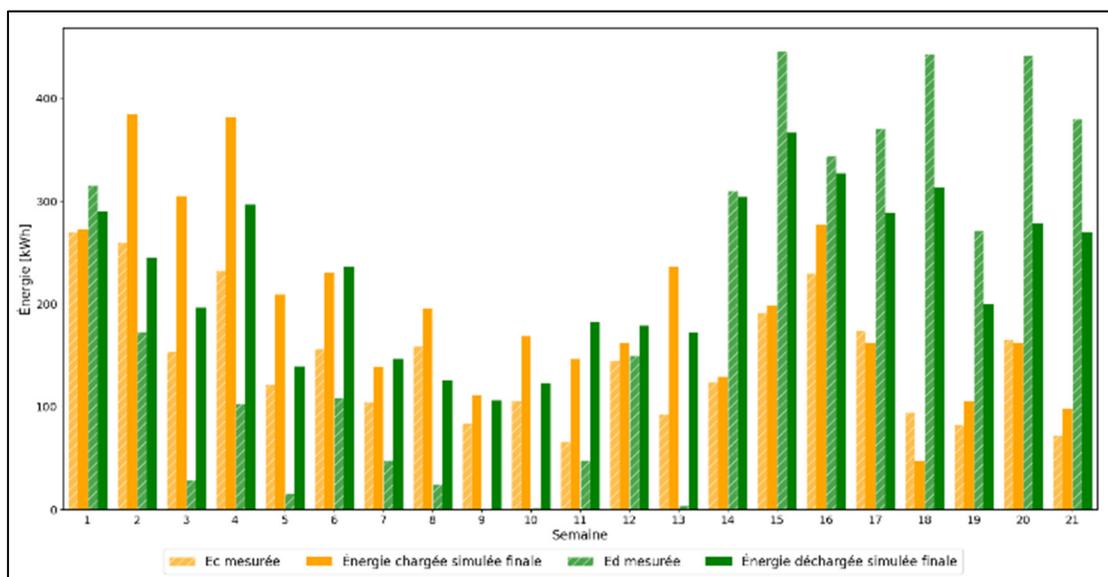


Figure 6.5 Énergies chargées et déchargées mesurées et simulées avec le modèle SLR final pour la saison 2019

La Figure 6.5 illustre une bonne gestion de la dynamique de charge/décharge saisonnière, ainsi qu'une bonne estimation des énergies chargées et déchargées hebdomadaires, hormis lorsque les énergies déchargées sont faibles comme en milieu de saison.

En plus de la connaissance des énergies chargées et déchargées par le STE, l'estimation de l'énergie solaire disponible ainsi que de l'énergie électrique consommée par les ventilateurs du STE permettent de calculer les indicateurs de performances du système de stockage : le coefficient de performance, l'efficacité de charge et l'efficacité de décharge définis dans le CHAPITRE 1. Le Tableau 6.2 compile les ces indicateurs par semaine sur la saison 2019. La Figure 6.6 représente ces indicateurs graphiquement, ainsi que les indicateurs du modèle SLR initial.

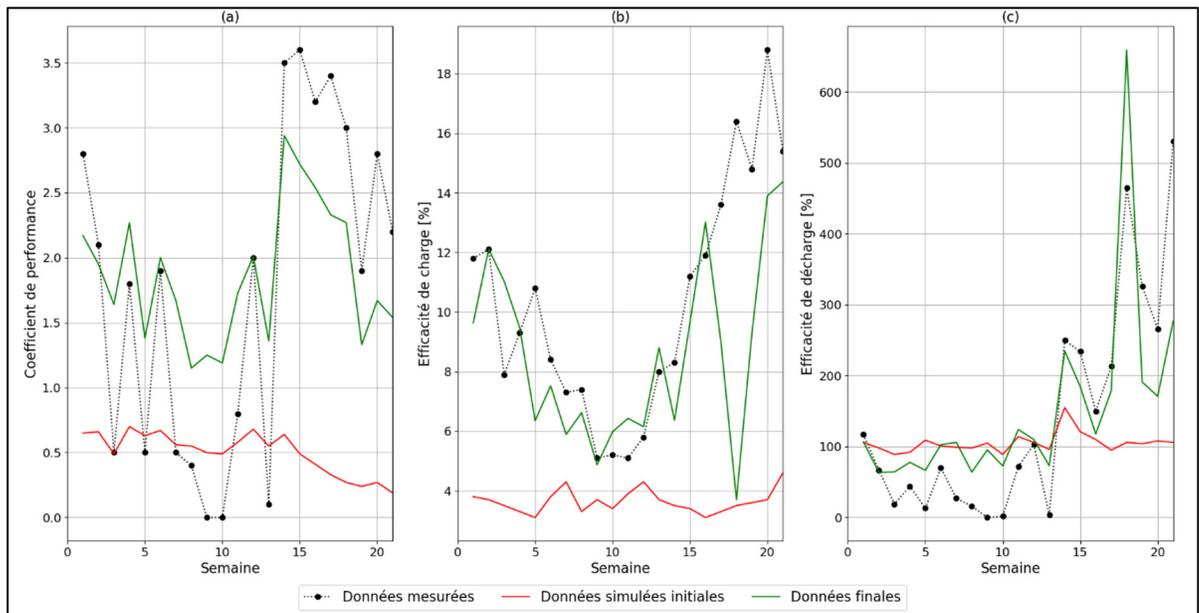


Figure 6.6 Coefficients de performance de la saison 2019

Tableau 6.2 Indicateurs de performance du modèle final pour la saison 2019

Semaine	COP mesuré	COP simulé initial	COP simulé final	η_c mesuré [%]	η_c simulé initial [%]	η_c simulé final [%]	η_d mesuré [%]	η_d simulé initial [%]	η_d simulé final [%]
1	2,8	0,65	2,17	11,8	3,8	9,63	117	106	106,59
2	2,1	0,66	1,95	12,1	3,7	12,11	67	98	63,55
3	0,5	0,49	1,64	7,9	3,5	11,03	19	89	64,3
4	1,8	0,7	2,27	9,3	3,3	9,48	44	92	77,81
5	0,5	0,63	1,38	10,8	3,1	6,35	13	109	66,58
6	1,9	0,67	2	8,4	3,8	7,52	70	101	102,72
7	0,5	0,56	1,67	7,3	4,3	5,89	27	99	105,9
8	0,4	0,55	1,15	7,4	3,3	6,62	16	98	64,12
9	0	0,5	1,25	5,1	3,7	4,87	0	105	95,44
10	0	0,49	1,19	5,2	3,4	5,98	2	89	72,71
11	0,8	0,58	1,73	5,1	3,9	6,43	72	114	124,11
12	2	0,68	2,01	5,8	4,3	6,15	103	106	110,03
13	0,1	0,55	1,36	8	3,7	8,8	4	96	73,09
14	3,5	0,64	2,94	8,3	3,5	6,37	250	155	234,75
15	3,6	0,49	2,72	11,2	3,4	9,65	234	121	184,56
16	3,2	0,41	2,54	11,9	3,1	13,02	150	110	117,83
17	3,4	0,33	2,33	13,6	3,3	8,98	213	95	178,65
18	3	0,27	2,27	16,4	3,5	3,7	465	106	659,43
19	1,9	0,24	1,33	14,8	3,6	9,29	326	104	191,01
20	2,8	0,27	1,67	18,8	3,7	13,9	266	108	170,95
21	2,2	0,19	1,54	15,4	4,6	14,37	530	106	276,74

La Figure 6.6 montre une bonne estimation des efficacités de stockage représentées dans la zone (b) et de déstockage dans la zone (c) malgré une légère sous-estimation de cette dernière en début de saison. En revanche, le coefficient de performance du système est moins bien

estimé, à cause de la modélisation du contrôle du STE qui sera abordée dans la prochaine section. Or, une mauvaise modélisation du contrôle mène à une mauvaise estimation du temps d'activation du STE, ce qui provoque une divergence d'estimation de l'énergie électrique consommée par le système de stockage. L'efficacité de charge est en adéquation avec la valeur de 8% donnée par Bouhdjar (1996). Kurklu (2003) avait obtenu une valeur exceptionnellement haute de 34% sur 4 mois, mais une valeur moyenne d'efficacité de décharge de 80% sur 4 mois cohérente avec les résultats obtenus ici.

Cette section ayant montré une bonne modélisation des dynamiques hebdomadaires et saisonnières du système de stockage, la prochaine section s'attachera à étudier et commenter la capacité du modèle numérique à simuler la température intérieure de la serre.

6.3.2 Analyse sur des quinzaines représentatives de la saison 2019

Cette section s'attache à analyser les simulations du modèle SLR en observant les différentes dynamiques thermiques liées à l'évolution de la température intérieure de la serre : conditions extérieures mesurées, température intérieure simulée et mesurée, puissance advective nette absorbée par le STE, flux thermique entre la terre de culture et STE afin d'analyser la capacité du modèle à suivre ces dynamiques. Dans un second temps, l'analyse des températures types mesurées et simulées sera menée.

Afin d'analyser le comportement du modèle à l'échelle quotidienne, le modèle est observé sur trois périodes de 15 jours réparties dans la saison 2019 : une quinzaine de début de saison du 2 au 15 juin, une en milieu de saison du 4 au 17 août et une enfin une quinzaine en fin de saison, du 26 septembre au 11 octobre. La Figure 6.7 permet de réaliser l'analyse de la première période.

La période du 2 au 15 juin 2019 représentée sur la Figure 6.7 est propice à de forts écarts de température dans la serre. En effet, comme le montre la Figure 6.7a), la température extérieure varie entre 0 et 30°C et la ressource solaire est importante : la plupart des journées voient l'irradiance solaire atteindre 500W.m⁻². Ces conditions mènent à une température minimale de 8°C et maximale de 29°C dans la serre.

La Figure 6.7b) qui permet de comparer les mesures et les simulations de la température intérieure, montre une sous-estimation de la température entre 2°C et 5°C dans la serre la nuit, mais une estimation correcte en journée. En revanche, lors d'une journée particulièrement chaude et ensoleillée, comme le 10 et le 11 juin, la température mesurée dans la serre diffère largement de la température simulée. Cette différence s'explique par une spécificité du comportement du contrôle du STE non incluse au modèle numérique et visible par la représentation de l'état du STE sur la Figure 6.7 b), c) et d), mais mal documentée lors de l'installation du STE. Lorsque la température dans la serre dépasse une température donnée, qui semble être d'environ 28°C, le volet au toit de la serre s'ouvre afin de maximiser la ventilation naturelle. À ce moment, les mesures montrent un arrêt du STE. Ces comportements étant mal documentés et liés à des temporisations et pas uniquement à la température intérieure, cette subtilité concernant une dizaine de jours dans la saison n'a pas pu être ajoutée au modèle numérique. Cette différence de comportement peut expliquer la mauvaise estimation du temps d'activation du STE pendant la saison : le modèle permet d'estimer une activation du STE pendant 69% du temps lors de la saison 2019, contre une activation du système réel pendant 52% du temps.

Sur la Figure 6.7c) est représentée la Puissance Advective Nette Absorbée (PANA) par le STE, ce qui permet de valider le bon comportement du modèle hormis le problème lié à la ventilation abordé plus tôt qui mène à une surestimation de l'énergie chargée à ces moments.

La Figure 6.7 permet également de visualiser l'implication de la terre de culture dans le système thermique : la Figure 6.7d) représente la puissance thermique transmise du STE vers la terre de culture, dont la valeur absolue est de l'ordre de grandeur de la dizaine de watts.

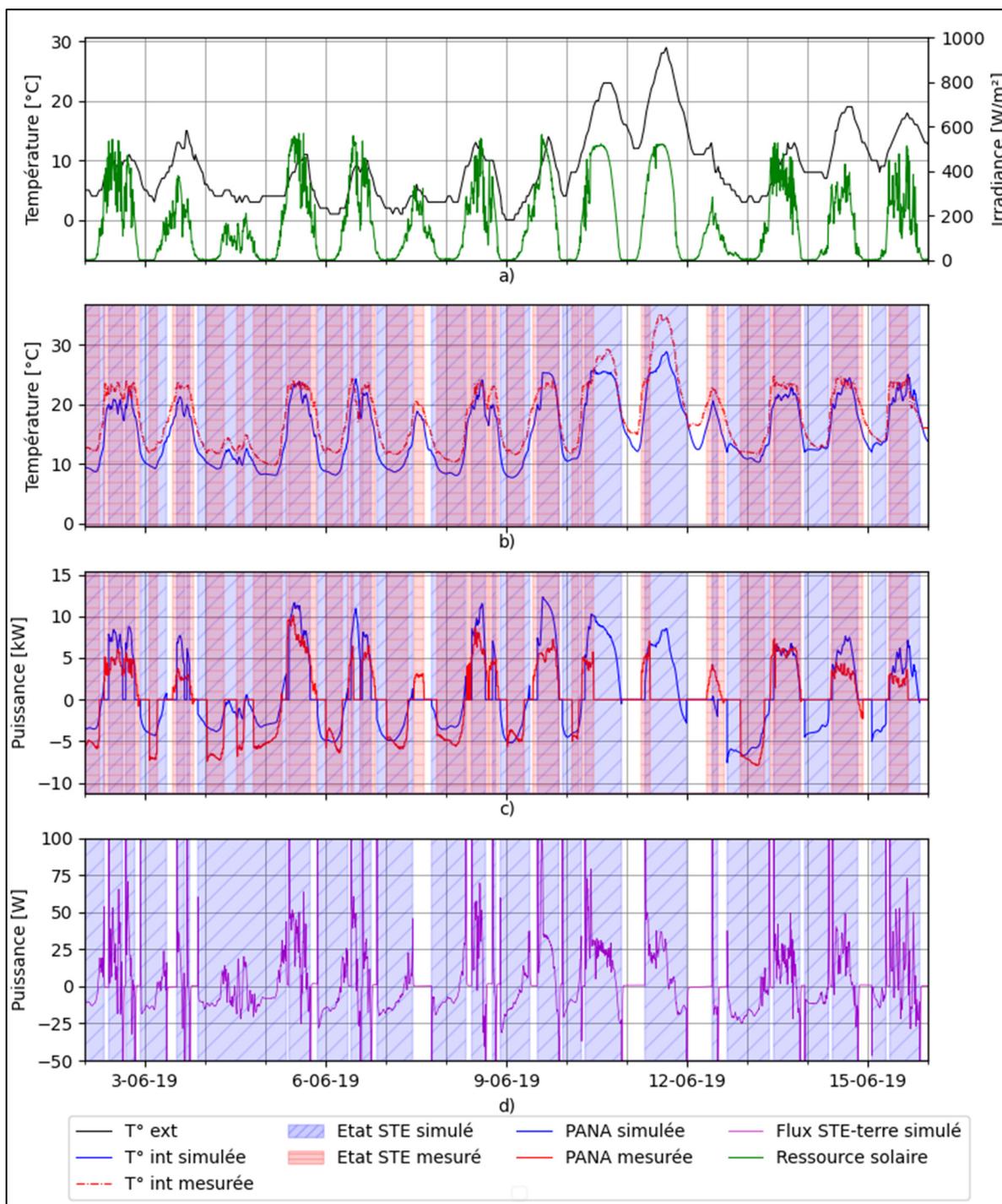


Figure 6.7 Analyse des simulations du modèle SLR du 02/06/2019 au 15/06/2019

La Figure 6.8 représentant la période du 4 au 17 août 2019 permet d'observer le phénomène d'hystérésis spécifique au modèle, car la temporisation présente dans le contrôleur réel n'a pas été incluse au modèle numérique. Ce phénomène mène à une activation et désactivation rapide du STE faisant osciller la température entre 12 et 14°C quand les conditions sont réunies (une température nocturne d'environ 8°C).

De plus, un phénomène déjà observé précédemment est encore présent dans la nuit du 10 au 11 août : la température était élevée en fin de journée donc la phase de charge débutée en début de journée (PANA positive sur la Figure 6.8 c) se transforme en phase de décharge (PANA négative) sans que la température décroisse sous les 12°C.

En dehors de ces exceptions, le modèle réussit à estimer correctement la température intérieure de la serre comme visible dans la Figure 6.8 b), en particulier en début et en milieu de journée, la température nocturne étant estimée avec une erreur d'environ 2°C.

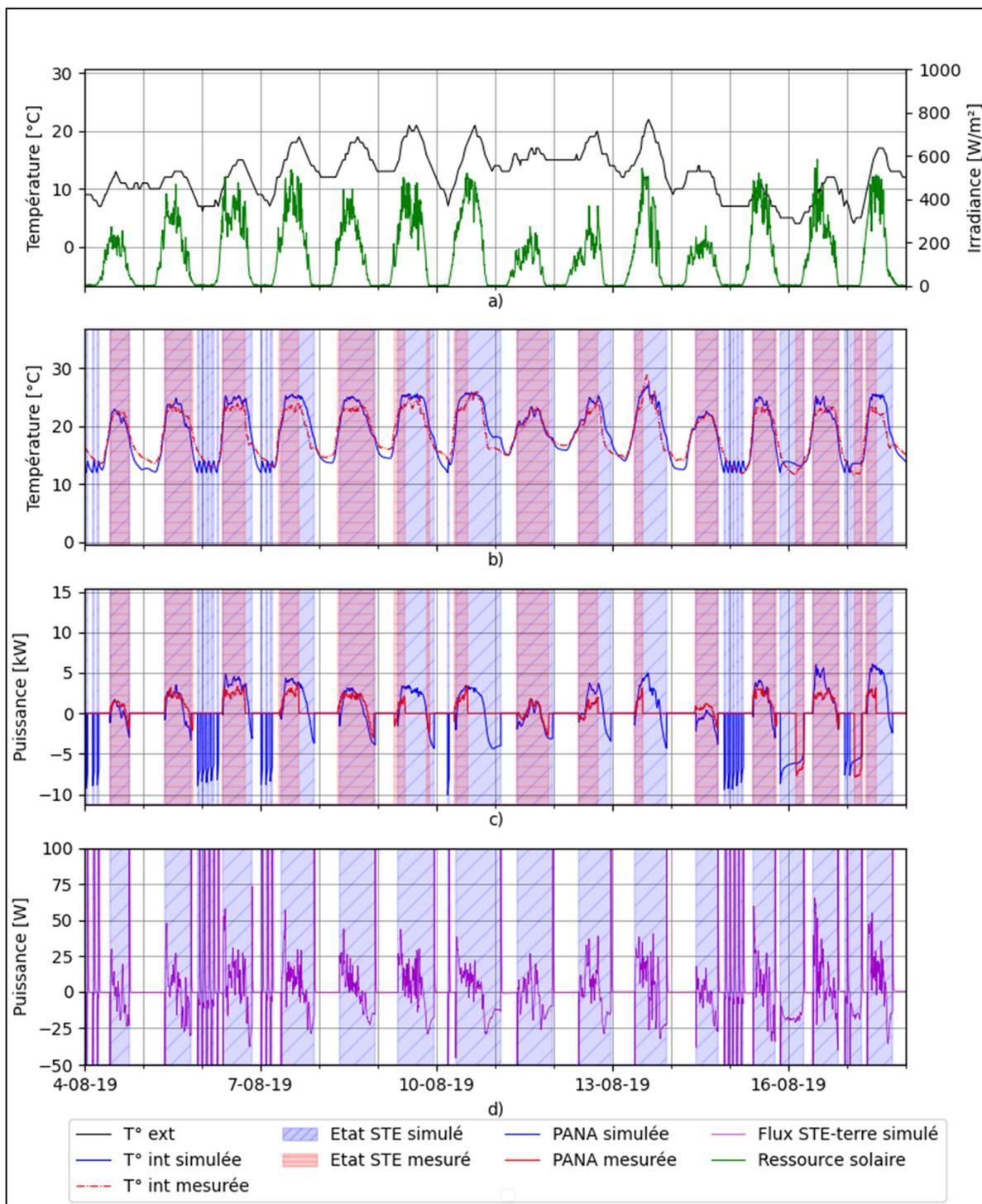


Figure 6.8 Analyse des simulations du modèle SLR du 04/08/2019 au 17/08/2019

La Figure 6.9 représente les données d'analyse sur la période du 26 septembre au 11 octobre 2019, une période plus froide que les précédentes : la température extérieure moyenne sur cette période est de 6,3°C. Cette chute des températures mène à un phénomène visible tant sur les simulations que sur les mesures : le STE est en phase de décharge pendant parfois plusieurs jours d'affilée, comme entre le 7 et le 10 octobre où il va rester activé 60 heures de suite, la température intérieure ne montant jamais au-dessus de 14°C, la température d'arrêt de la phase de décharge.

Ce phénomène pourrait être vu comme négatif dans le cas d'un STE supposé parfaitement isolé, mais il a été vu qu'il échange thermiquement avec la terre de culture qui lui transmet à la fin de la saison une partie de l'énergie thermique accumulée pendant la saison. Ainsi, la terre de culture transmet environ 20 watts au STE pendant ces phases, ce qui aide à maintenir la température de la serre au-dessus de 6°C sur cette période. La saison de culture peut alors être allongée.

L'analyse du comportement du modèle ayant été réalisée pour trois périodes représentatives de la saison 2019, la Figure 6.10 permettra de commenter les simulations du modèle à l'échelle de la saison.

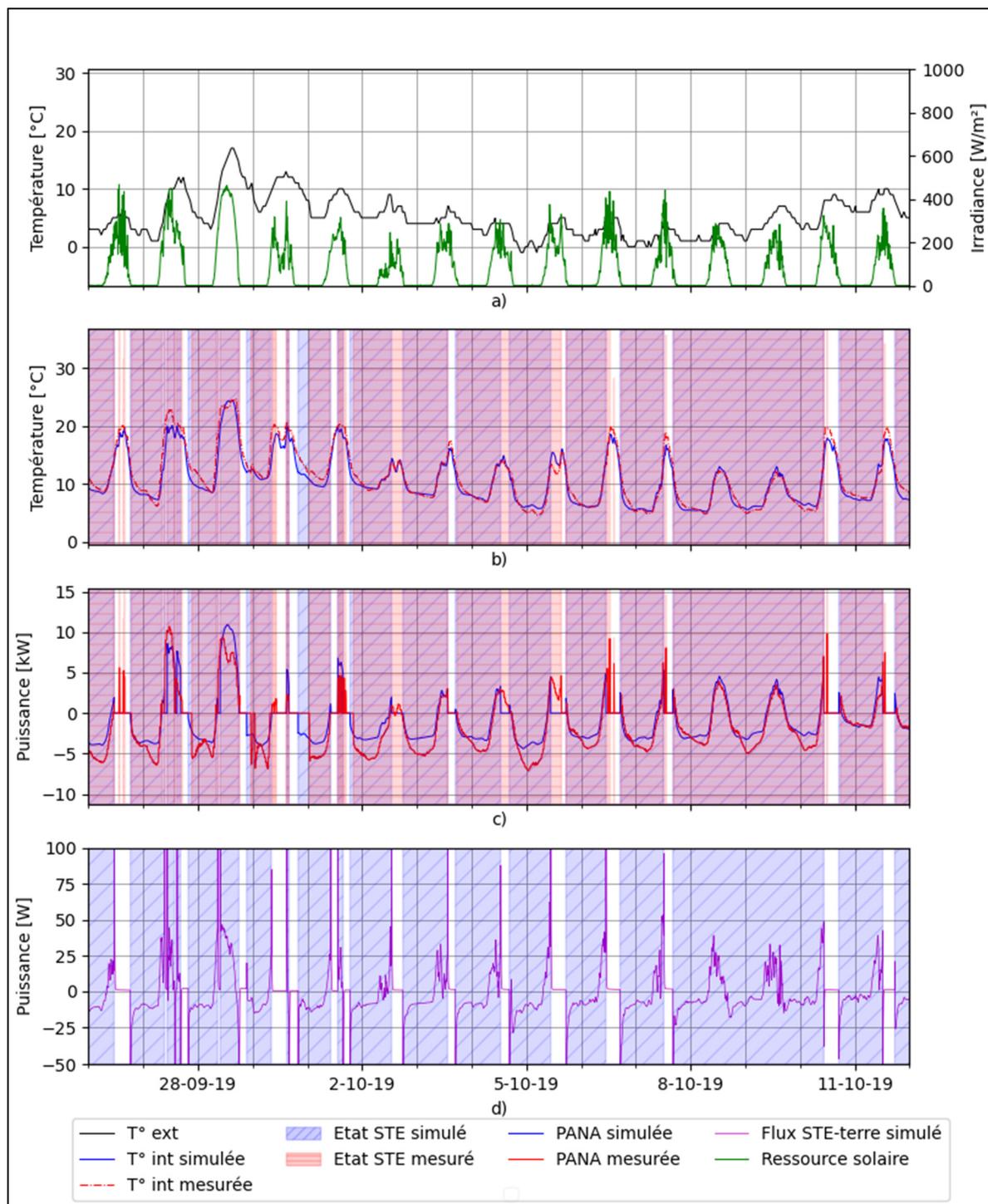


Figure 6.9 Analyse des simulations du modèle SLR du 26/09/2019 au 11/10/2019

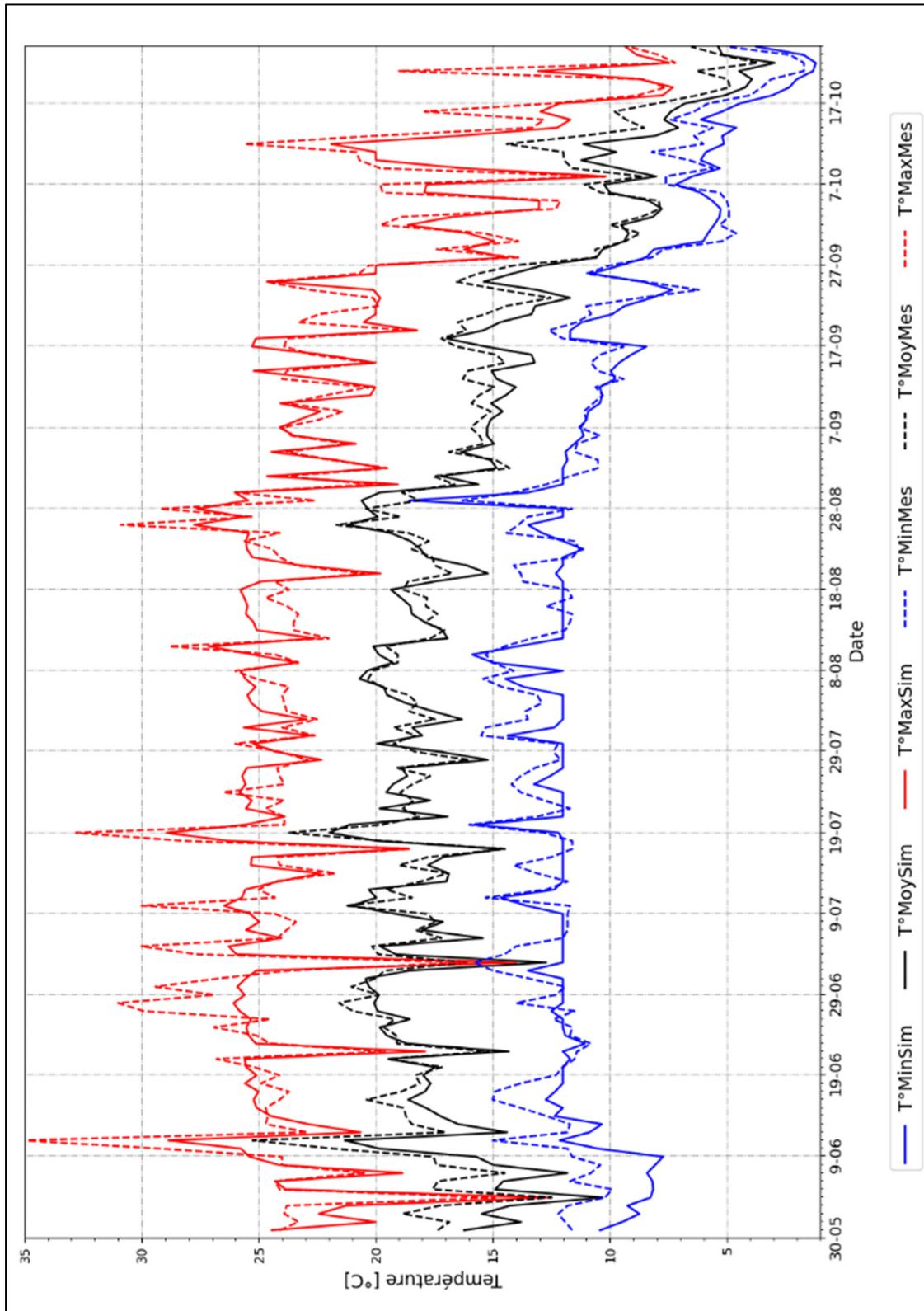


Figure 6.10 Températures types en 2019

La Figure 6.10 représente les températures types quotidiennes définies dans la section 2.1. Elle montre une bonne capacité du modèle à prendre en compte les variations saisonnières de température, comme leur baisse à partir de début septembre, ainsi qu'à s'adapter à des jours « exceptionnels ». Toutefois, le modèle présente des difficultés à estimer les températures hautes lorsqu'un jour est particulièrement chaud (du 27/06/2019 au 01/07/2019) par exemple. Cette difficulté a été abordée précédemment et est liée aux difficultés à inclure la ventilation au modèle. En revanche, les indicateurs de précision rassemblés dans le Tableau 6.3 des simulations traduisent un modèle précis malgré une légère sous-estimation de la température intérieure.

Comme présenté dans le Tableau 6.3, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sur la température intérieure de la serre est de $1,92^{\circ}\text{C}$ et l'erreur absolue moyenne (MAE) est de $1,51^{\circ}\text{C}$. L'erreur moyenne (ME) de $0,68^{\circ}\text{C}$ traduit une légère sous-estimation de la température intérieure. Les erreurs quadratiques sur les températures types de $1,52^{\circ}\text{C}$, $1,42^{\circ}\text{C}$ et $1,83^{\circ}\text{C}$ signifient que le modèle est équilibré et qu'il n'est pas particulièrement faible sur les températures basses ou hautes. En revanche, l'utilisation de l'erreur absolue maximale (MAD) sur base horaire introduite par Baba (2022) met en lumière les problématiques de sous-estimation lorsque la température est exceptionnellement haute ($\text{MAD} = 4,98^{\circ}\text{C}$).

Tableau 6.3 Indicateurs de précision du modèle appliqués à la température intérieure de la serre

Indicateur	Équation	Valeur
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2}$	1,91°C
Mean Absolute Error (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i - s_i $	1,51°C
Mean Error (ME)	$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - s_i)$	0,68°C
Maximum Absolute Difference (MAD)	$MAD = \max (m_{h,i} - s_{h,i})$	4,98°C
RMSE (T_{min})	$RMSE(T_{min}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^J (T_{min,m,j} - T_{min,s,j})^2}$	1,52°C
RMSE (T_{moy})	$RMSE(T_{moy}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^J (T_{moy,m,j} - T_{moy,s,j})^2}$	1,40°C
RMSE (T_{max})	$RMSE(T_{max}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^J (T_{max,m,j} - T_{max,s,j})^2}$	1,83°C

Ce chapitre a permis de présenter les ajustements réalisés sur le modèle SLR ainsi que les résultats obtenus par ce modèle en analysant les énergies échangées entre le STE et la serre ainsi que la simulation de la température intérieure de la serre. Ces analyses montrent que l'intégration d'un lien thermique entre la terre de culture et la serre permettent de modéliser le rôle de stockage thermique saisonnier que joue la terre de culture et modéliser avec précision la température de la serre ainsi que les énergies chargées et déchargées. Les analyses menées dans ce chapitre ont également permis de mettre au jour des points d'attention permettant d'améliorer encore les simulations du modèle, en particulier les délais temporels inclus dans le contrôleur de la serre et les règles logiques forçant le STE à s'arrêter en cas de fortes chaleurs.

Le chapitre suivant s'attachera à faire l'état des lieux des perspectives s'ouvrant pour obtenir des systèmes de stockages adaptés à différentes conditions, différentes serres et efficaces énergétiquement.

CHAPITRE 7

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Ce travail a apporté de nouveaux éléments à la modélisation d'un système de stockage de l'énergie thermique à lit de roches couplé à une serre. Le modèle numérique est considéré comme validé pour le cas d'étude de Kuujjuaq. Afin de continuer à développer un modèle numérique robuste, plusieurs perspectives de recherche pourront être explorées par la suite, que ce soit sur le modèle numérique ou sur la recherche expérimentale.

7.1 Discussion

Ce travail de recherche a permis d'obtenir un modèle de l'ensemble formé par une serre et un STE-LR validé à Kuujjuaq sur la saison 2019 avec une précision de $1,91^{\circ}\text{C}$ sur la température intérieure de la serre. Il n'existait pour l'instant pas de modèle équivalent dans la littérature. Les études menées sur les modèles numériques utilisés ont également démontré que l'hypothèse d'adiabaticité d'un lit de roche dans le cas d'une utilisation en sericulture est non valable. L'étude de calibration a également été menée sur une saison complète, permettant l'exploitation du modèle SLR sur une fenêtre temporelle large.

7.2 Améliorations du modèle

La littérature ne propose pas de critère concernant la validité d'un modèle de serre. Malgré ce manque, le comportement correct du système de stockage simulé, la bonne simulation des dynamiques thermiques saisonnières et le RMSE de $1,91^{\circ}\text{C}$ sur l'air intérieur de la serre permettent de considérer le modèle numérique comme validé pour la serre de Kuujjuaq. Malgré tout, plusieurs solutions peuvent permettre de renforcer le modèle et de tenter de le valider pour plusieurs cas d'étude.

7.2.1 Modélisation de l'instrumentation

L'étude menée dans la section sur la période du 1^{er} juin au 15 juin 2019 a montré une disparité du contrôle du STE réel et simulé : lorsque la température intérieure de la serre devient trop élevée, il arrive que le STE s'arrête et qu'il y ait plutôt une ouverture du volet du toit. Ce comportement pourrait alors être inclus au modèle à condition de pouvoir vérifier à Kuujjuaq les réglages du contrôle.

De même, la présence de temporisations d'attente entre deux phases de charge ou de décharge manquent au modèle. Elles pourraient éviter les oscillations d'hystérésis présentes dans les simulations.

7.2.2 Transfert thermique STE – terre de culture

Dans le modèle SLR final, le coefficient de transfert entre l'air du STE et la terre de culture est considéré comme constant. En réalité, l'air de la serre étant en mouvement forcé lorsque le STE est en fonctionnement et en mouvement naturel lorsqu'il est éteint, la distinction de comportement thermique pourrait être intégrée au modèle par l'intermédiaire de l'équation (7.1):

$$H_{TerreAir} = H_{TerreAirFor} \cdot U_{STE} + H_{TerreAirNat} \cdot (1 - U_{STE}) \quad (7.1)$$

Le coefficient de transfert convectif entre l'air et le STE $H_{TerreAir}$ est alors égal à un coefficient dans le cas d'un transfert forcé $H_{TerreAirFor}$ ou naturel $H_{TerreAirNat}$ en fonction de l'état du STE U_{STE} .

7.2.3 Étude de validité pour le cas d'étude de Radisson

Le sous-modèle de serre étant basé sur le modèle de serre de Vanthoor (2011) l'ayant validé pour plusieurs cas d'étude, il est tout de même nécessaire de vérifier la validité du modèle SLR dans d'autres cas que Kuujjuaq. En 2022, un nouveau STE a été construit dans une serre

québécoise à Radisson. La serre et le STE sont présentés dans la section 7.3. Les systèmes ayant été instrumentés lors de l'installation du STE, une étude équivalente à celle menée dans le CHAPITRE 6 pourra être menée afin de comparer les mesures de Radisson aux simulations du modèle ayant été mis à jour pour ce cas d'étude.

7.3 Construction d'un nouveau STE à Radisson

Plusieurs raisons justifient la construction d'un nouveau système de stockage de l'énergie instrumenté. Premièrement, il a été vu précédemment que l'instrumentation de Kuujjuaq présente des lacunes : incertitudes sur la température des roches du lit de stockage, envoi des données parfois non fonctionnel. Deuxièmement, il est nécessaire pour le modèle numérique développé de pouvoir être utilisé pour des serres de tailles, d'architecture et de localisation différentes. Pour ces raisons, un nouveau système de stockage thermique de l'énergie a été construit en juillet 2022 dans la serre communautaire de Radisson, gérée par l'association Les Jardins du 53^{ème} Taïga. Le stockage thermique est formé de 4 lits de roches identiques (deux par bac de culture) représentés sur la Figure 7.1.

Les caractéristiques de la serre et du système de stockage sont renseignées dans le Tableau 7.1. Chaque lit de roches est lié à un système aéraulique : un ventilateur, un tuyau d'entrée d'air ainsi qu'un tuyau de sortie représentés en bleu et rouge sur la Figure 7.1.

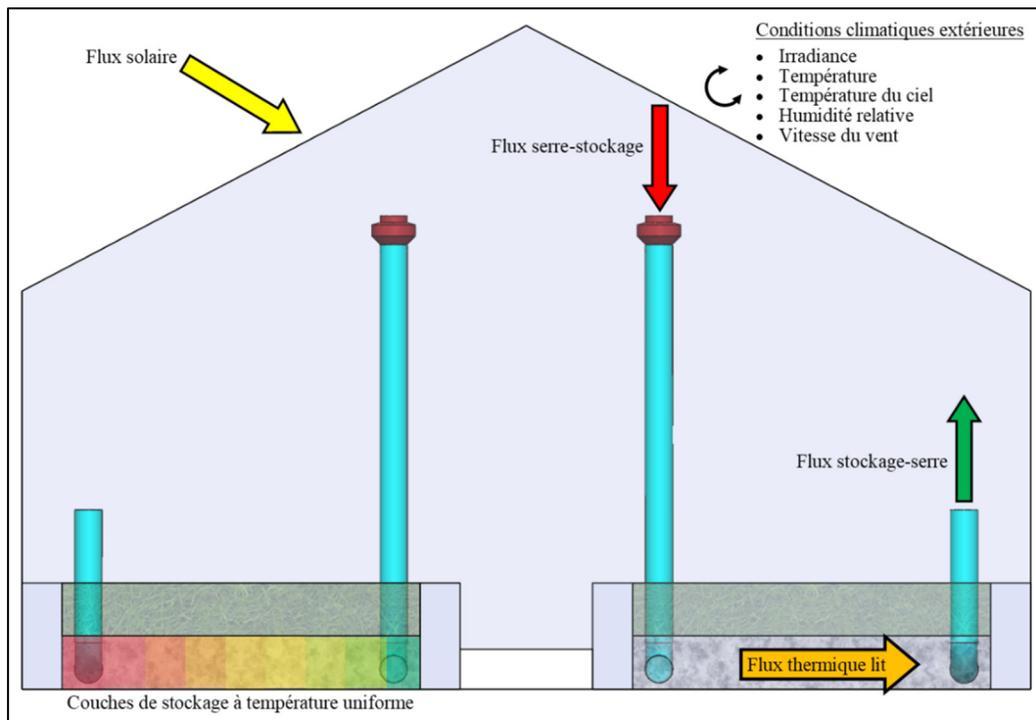


Figure 7.1 Schéma de la serre de Radisson

Tableau 7.1 Dimensions de la serre et du système de stockage de Radisson

Géométrie	Even-span
Orientation	Nord-Ouest / Sud-Est
Longueur	15,2 m
Largeur	7,6 m
Hauteur	5 m
Surface totale	115,52 m ²
Surface de culture	68,12 m ²
Volume intérieur	462 m ³
Nombre lits	4
Longueur lit	2,6 m
Largeur lit	6,55 m
Hauteur lit	0,5 m
Longueur caractéristique roches	10 cm

7.3.1 Instrumentation

Afin entre autres de fournir des données nécessaires à la calibration du modèle numérique, la serre et le STE ont été instrumentés. Une station météo de la compagnie Maximus a été installée à l'extérieur de la serre afin d'avoir accès aux conditions extérieures suivantes :

- Température extérieure
- Direction du vent
- Vitesse du vent
- Pluie
- Irradiation solaire extérieure

Des sondes de température et d'humidité relative sont également placées dans la serre.

L'expérience à Kuujuaq ayant montré que la température ne peut pas être considérée comme uniforme dans la direction du déplacement de l'air, mais peut l'être dans la direction transverse, il a été choisi de placer plusieurs sondes de température dans la direction du flux d'air, comme représenté dans la Figure 7.2.

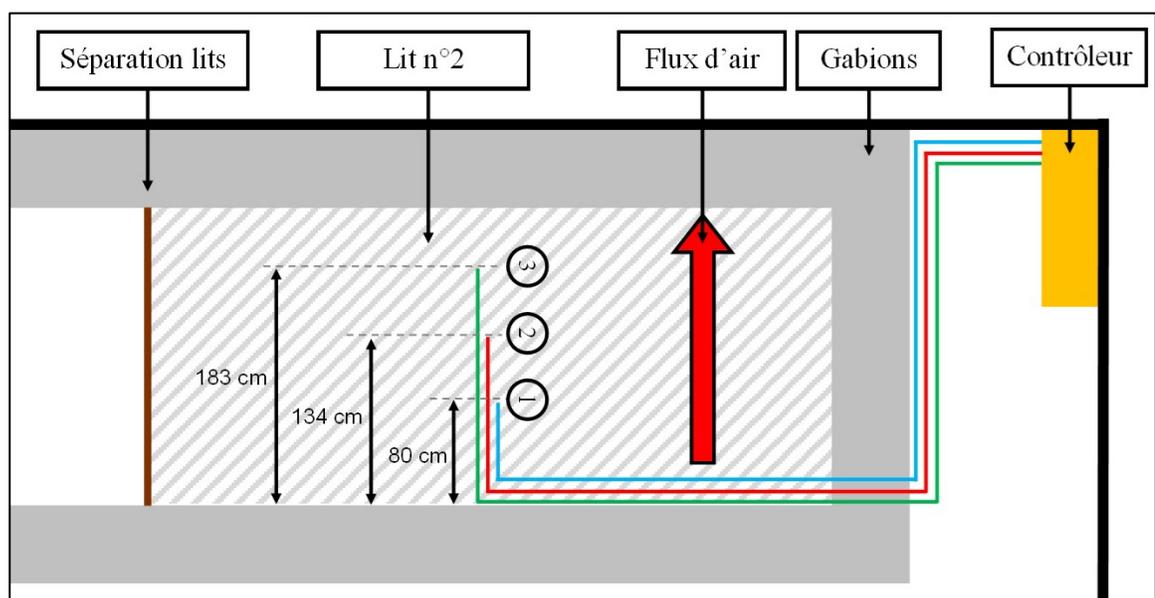


Figure 7.2 Emplacement des sondes de température dans le lit de roches instrumenté

L'hypothèse d'uniformité des températures entre les lits de roches a été posée, donc un seul lit a été instrumenté et on considérera les trois autres identiques. Trois sondes de température sont posées à mi-largeur et mi-hauteur du lit instrumenté. Elles sont placées à respectivement 80 cm, 134 cm et 183 cm de la bordure du lit où est placé le tuyau d'entrée d'air.

Plusieurs autres sondes ont été placées, premièrement, afin de contrôler les actuators de la serre et du STE, deuxièmement afin de mener les études de performances du système SLR. Les caractéristiques des capteurs intérieurs sont renseignées dans le Tableau 7.2.

Tableau 7.2 Détails des capteurs intérieurs installés à Radisson

Capteur	Fournisseur	Référence	Plage de mesure	Précision
Température intérieure	DOL	114 4-20 mA	-40°C / 60°C	1,5°C
Humidité relative intérieure	DOL	114 4-20 mA	0 / 100 % RH	3%

7.3.2 Instrumentation complémentaire

Une instrumentation complète et robuste est essentielle à l'étude des performances d'un système énergétique. Deux capteurs complémentaires pourraient être installés afin d'avoir une meilleure visibilité des conditions intérieures de la serre.

Pour l'étude énergétique du STE à Kuujuaq, la présence d'un Data Logger dans un tuyau de sortie du STE a permis de connaître la température de l'air en sortie de STE, et ainsi d'en déduire la puissance advective de sortie. Avoir cette information est indispensable dans le cadre d'une étude énergétique basée sur l'Énergie Advective Nette Absorbée.

Deuxièmement, des informations sur le rayonnement solaire à l'intérieur de la serre pourraient donner des indications sur les propriétés optiques de l'enveloppe de la serre et évaluer avec précision la ressource solaire disponible pour les plantes, dans le cadre de leur utilisation pour le processus de photosynthèse. Un pyranomètre permettrait d'avoir accès à la ressource solaire

brute, et un capteur de Photosynthesis Active Radiation (PAR) permettrait d'avoir accès à la partie du spectre solaire exploitable par les plantes pour la photosynthèse. À noter que des modèles permettent de faire des équivalences entre les deux données.

7.3.3 Amélioration du contrôle

Les actuateurs et capteurs installés dans la serre de Radisson sont connectés à un contrôleur de la compagnie Maximus. Le contrôleur permet un paramétrage des actuateurs par rapport aux données mesurées et à ce que l'utilisateur souhaite en termes de températures de consigne. La Figure 7.3 montre une capture d'écran de la plateforme de paramétrage du contrôleur.

L'expérience a montré à Kuujuaq un certain nombre de problèmes causés par le contrôle du STE basé sur deux boucles d'hystérésis orientées autour de la température de la serre. Dans certaines situations extrêmes, le système de stockage peut se comporter de manière opposée à ce qui est attendu. Par exemple, si la température de la serre atteint 25°C en raison de températures élevées dans les jours précédents, la phase de charge suivante commencera lorsque la température de la serre atteindra 20°C, ce qui entraînera l'entrée d'air plus froid dans le système de stockage qui captera ainsi la chaleur des roches pour la transférer à la serre. Cette situation, qui était censée être une phase de charge, équivaut en réalité à une phase de décharge. Le scénario inverse est également possible.

Pour éviter cette situation contre-productive, il est possible d'ajouter un test logique à la règle d'hystérésis de charge et de décharge afin de comparer les températures de la serre et du système de stockage. Dans les paramètres des ventilateurs, une option existe pour vérifier si la température de la serre est plus élevée que celle du système de stockage (groupe 1 et groupe 2 respectivement). Cette option ne peut être activée que dans certains cas. Il serait possible d'adapter cette option en deux règles activables :

- Activer la ventilation en cas de température basse (décharge) uniquement si la température de la serre (groupe 1) est inférieure à celle du système de stockage (groupe 2);

- Activer la ventilation en cas de température élevée (charge) uniquement si la température de la serre (groupe 1) est supérieure à celle du système de stockage (groupe 2).

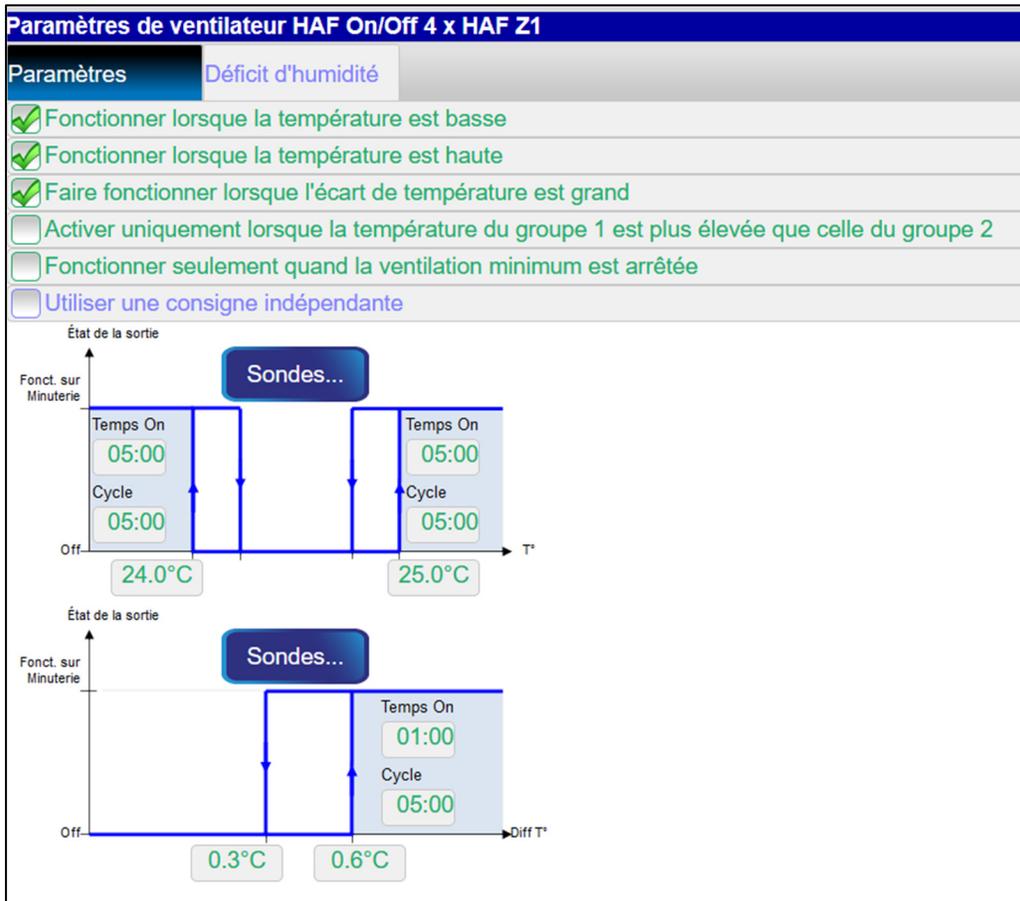


Figure 7.3 Paramétrage du STE sur la plateforme Maximus

L'étude énergétique a montré que les phases de charge et de décharge quotidiennes étaient doublées d'une dynamique de stockage saisonnier, et que la décharge saisonnière était facilitée par un problème de contrôle sur les phases de décharge quotidienne lorsque la température intérieure reste inférieure à 14°C. Ce comportement saisonnier dont l'impact est non négligeable sur la serre gagnerait alors à être inclus à la stratégie de contrôle.

7.3.4 Solaire thermique

La ressource solaire disponible dans le Nunavik est importante (Piché, 2021). L'irradiation globale horizontale est d'environ 1000 kWh.m^{-2} , une valeur proche de l'Allemagne où l'installation de systèmes solaires est courante (Solargis, 2023). Exploiter cette ressource pour la transformer en énergie thermique, ressource rare dans le Nunavik, semble être cohérent. Cette conversion d'énergie solaire thermique se fait notamment via des panneaux solaires thermiques. Opter pour des solutions aérauliques, c'est-à-dire dont le fluide caloporteur est de l'air, permettrait de réaliser un couplage simple entre la serre, le système de stockage et les panneaux solaires thermiques comme représentés sur la Figure 7.4.

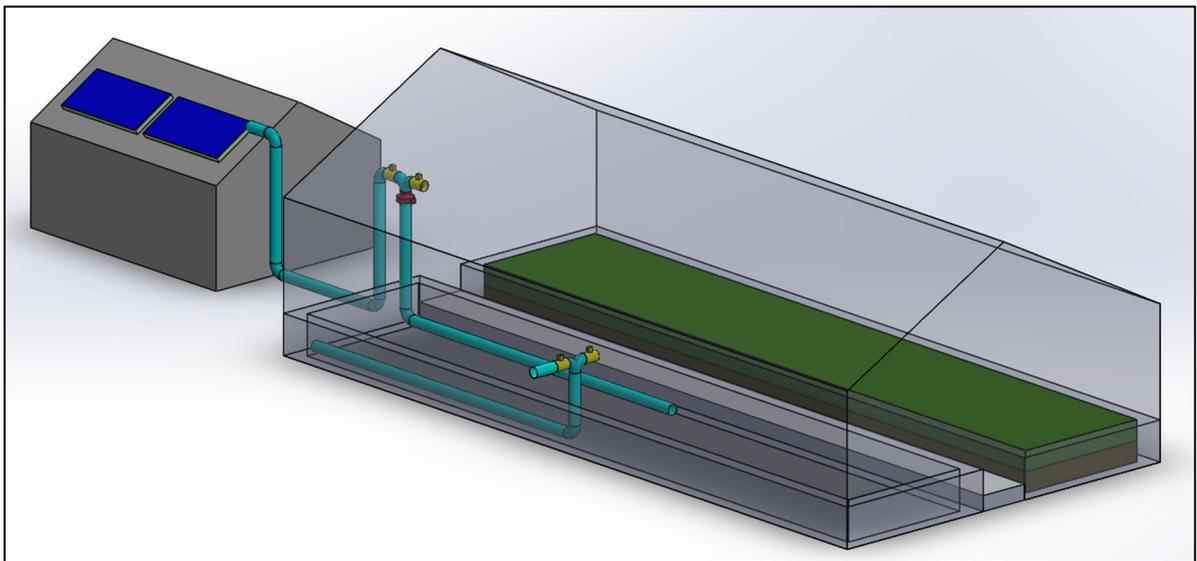


Figure 7.4 Schéma d'intention d'un système solaire thermique à Radisson

L'ajout de vannes bistables (ouvert / fermé) représentées en jaune sur la Figure 7.4 au système existant ainsi qu'un élément de circulation d'air entre les panneaux solaires et l'entrée du STE permettrait une exploitation optimisée de la ressource solaire : l'énergie captée pourrait être orientée vers la serre en cas de besoin ou vers le système de stockage dans le cas où la température intérieure de la serre est déjà assez haute.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail était d'obtenir un modèle numérique de l'ensemble formé par une serre et un système de Stockage Thermique de l'Energie à Lit de Roches (STE-LR). Ce travail s'inscrit dans une volonté de développement d'une serriculture performante dans le Nord-du-Québec, afin de permettre à la population locale de faire pousser sur place une nourriture peu chère et de qualité.

Après avoir détaillé et couplé les sous-modèles numériques de serre et de stockage, une étude initiale du modèle de la serre couplée au système de stockage a été réalisée et discutée dans le CHAPITRE 3. Cette analyse a montré une cohérence physique du modèle numérique, mais un manque de précision de la simulation. Afin d'améliorer cette précision, un processus de calibration a été mené sur les sous-modèles et est détaillé dans le CHAPITRE 4 et concerne la recalibration du sous-modèle de serre, la recalibration du modèle Serre-Lit de Roches (SLR) et la comparaison des simulations avec les mesures avant et après recalibration. Cette étude a montré que la recalibration des modèles n'a pas été suffisante pour améliorer les simulations. Il a donc été décidé d'étudier le sous-modèle de stockage dans le CHAPITRE 5 afin de l'ajuster. Une fois les modifications à apporter au sous-modèle de stockage définies, le modèle SLR a été modifié dans le CHAPITRE 6. Ce chapitre a également permis d'étudier les performances du modèle SLR final. Enfin, les perspectives de travail sur le plan numérique et expérimental sont données dans le CHAPITRE 7.

L'étude initiale du modèle SLR a montré une problématique d'imprécision des simulations du modèle numérique qui suit le profil de température de la saison de culture. En début de saison, les températures sont encore basses et le modèle sous-estime les températures de 8,4°C pour les températures moyennes quotidiennes. À l'inverse, au milieu de la saison, les températures moyennes quotidiennes sont surestimées d'environ 3,5°C. La problématique de sous-estimation revient en fin de saison avec une erreur moyenne de 1,4°C. Ces tendances sont suivies par la simulation de la température du système de stockage.

La calibration des sous-modèles réalisée dans le CHAPITRE 4 en utilisant un algorithme d'évolution différentielle a permis de faire passer la précision du sous-modèle de serre de 4,73°C à 4,31°C pour la température de la serre et la calibration du sous-modèle de stockage a fait passer la précision du modèle SLR pour la température de la serre de 3,72°C à 3,65°C. Ces études de calibration ont été réalisées en utilisant une stratégie de calibration innovante basée sur les températures quotidiennes minimales, moyennes et maximales et permettant de se focaliser sur les besoins réels d'utilisation du modèle. De plus, la comparaison des performances énergétiques entre mesure et simulation montre une grande disparité des énergies échangées entre la serre et le système de stockage. Premièrement, le modèle ne simule pas la variation saisonnière de l'état du système de stockage, avec une charge globale en milieu de saison et une décharge équivalente en fin de saison. L'énergie chargée une semaine est toujours proche de l'énergie chargée cette même semaine. Deuxièmement, le coefficient de performance hebdomadaire moyen du système simulé est de 0,58 contre un coefficient mesuré de 1,76. Cette différence est notamment due à une forte surestimation du temps d'activation du système de stockage.

Dans le CHAPITRE 5, le sous-modèle de stockage a été étudié dans l'objectif de lui apporter des ajustements. L'étude de l'Énergie Advective Nette Absorbée (ÉANA) a montré une disparité de comportement du STE pendant la saison entre les simulations et les mesures. L'ÉANA mesurée présente une variation saisonnière correspondant à une charge en début de saison et à une décharge en fin de saison. L'hypothèse du rôle de masse thermique joué par la terre de culture située au-dessus du STE a alors été posée. Dans le CHAPITRE 7, cette hypothèse a été incluse au modèle SLR en ajoutant un lien thermique entre le système de stockage et la terre de culture. L'impact thermique des gabions et du matériel ajouté pour le fonctionnement du STE ont également fait l'objet d'ajout au modèle SLR.

L'étude du modèle SLR final confirme la validité du modèle dans le cadre de l'étude de cas de Kuujuaq. La performance principale du modèle est une erreur quadratique moyenne de 1,91°C sur la température intérieure de la serre pour la saison 2019. L'erreur quadratique moyenne est de 1,52°C sur les températures minimales quotidiennes, de 1,40°C sur les températures

moyennes et $1,83^{\circ}\text{C}$ sur les températures maximales. Ce modèle est le premier à simuler l'interaction entre une serre et un STE-LR et à avoir été calibré sur une saison complète. Il a également permis de réfuter l'hypothèse d'adiabaticité du lit dans ce cas d'utilisation.

Le CHAPITRE 7 fait l'état des lieux des actions possibles afin de réaliser des systèmes de stockage efficaces et adaptés à différentes serres. Cet objectif passe premièrement par des possibilités d'amélioration du modèle SLR : meilleure simulation de l'interaction entre la serre et le STE et meilleure modélisation du contrôle du STE. Deuxièmement, il est nécessaire d'étudier la validité du modèle pour un autre cas d'étude. Cette étude peut être menée grâce aux données récoltées à Radisson où se trouve un nouveau STE instrumenté. Une fois validé pour d'autres cas d'étude, le modèle numérique pourra être exploité à des fins d'amélioration de la stratégie de contrôle, d'optimisation des dimensions des futurs systèmes de stockage de l'énergie à lits de roches et d'étude de faisabilité de couplage avec des systèmes énergétiques additionnels.

BIBLIOGRAPHIE

- Altes-Buch, Q., Quoilin, S., & Lemort, V. (2019). Greenhouses: A Modelica Library for the Simulation of Greenhouse Climate and Energy Systems (pp. 533-542). Communication présentée au The 13th International Modelica Conference, Regensburg, Germany, March 4–6, 2019. <https://doi.org/10.3384/ecp19157533>
- Asa'd, O., Ugursal, V. I., & Ben-Abdallah, N. (2019). Investigation of the energetic performance of an attached solar greenhouse through monitoring and simulation. *Energy for Sustainable Development*, 53, 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.09.001>
- Avard, E. (2015). *An Alternative Local Food Provisioning Strategy for Nunavik*. Thèse de doctorat. Université Laval. Repéré à https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjT_uPy2Kj6AhULhYkEHacoDAQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.chaireconditionautochtone.fss.ulaval.ca%2Fdoc%2FMemor%2FThese-Ellen-Avard-01-01-01.pdf&usg=AOvVaw3L-dSfLsU70HUu3YOmt9CP
- Aydin, D., Casey, S. P., & Riffat, S. (2015). The latest advancements on thermochemical heat storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 356-367. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.054>
- Baba, F. M., Ge, H., Zmeureanu, R., & Wang, L. (Leon). (2022). Calibration of building model based on indoor temperature for overheating assessment using genetic algorithm: Methodology, evaluation criteria, and case study. *Building and Environment*, 207, 108518. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108518>
- Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., & Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133753>
- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Meneses, J. F., & Navas, L. M. (2010). Greenhouses climate modelling. Tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(2), 285-298. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010082-1629>

- Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouharroud, R., Elame, F., Ezzaeri, K., Gourdo, L., ... Bouirden, L. (2020). Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse. *Solar Energy*, *198*, 8-24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.041>
- Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouhroud, R., Gourdo, L., Ezzaeri, K., Tiskatine, R., ... Bouirden, L. (2018). 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. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.027>
- Beasley, D. E., & Clark, J. A. (1984). Transient response of a packed bed for thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *27*(9), 1659-1669. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90278-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90278-3)
- Bezari, S., Lalmi, D., & Babou, A. (s.d.). Chauffage des Serres avec Stockage Thermique : étude & investigation (p. 6).
- Blasco, X., Martínez, M., Herrero, J. M., Ramos, C., & Sanchis, J. (2007). Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and Electronics in Agriculture*, *55*(1), 49-70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.001>
- Bot, G. P. A. (1983). *Greenhouse climate : from physical processes to a dynamic model*. phd. Bot, Wageningen. Repéré à <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/77514>
- Bouhdjar, A., Belhamel, M., Belkhiri, F. E., & Boulbina, A. (1996). Performance of sensible heat storage in a rockbed used in a tunnel greenhouse. *Renewable Energy*, *9*(1), 724-728. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88386-8](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88386-8)
- Boulard, T., & Baille, A. (1995). Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *61*(1), 37-47. <https://doi.org/10.1006/jaer.1995.1028>
- Chen, J., Yang, J., Zhao, J., Xu, F., Shen, Z., & Zhang, L. (2016). Energy demand forecasting of the greenhouses using nonlinear models based on model optimized prediction method. *Neurocomputing*, *174*, 1087-1100. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.105>
- Chong, A., Gu, Y., & Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. *Energy and Buildings*, *253*, 111533. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>

- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Coutier, J. P., & Farber, E. A. (1982). Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds. *Solar Energy*, 29(6), 451-462. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90053-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90053-6)
- de Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414-419. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.007>
- de Zwart, H. F. (1996). *Analyzing Energy-Saving Options in Greenhouse Cultivation Using a Simulation Model*. Ph.D. Wageningen University and Research, Netherlands. Repéré à <https://www.proquest.com/docview/2465452813/abstract/D631870214E04A27PQ/1>
- Dhiman, M., Sethi, V. P., Singh, B., & Sharma, A. (2019). CFD analysis of greenhouse heating using flue gas and hot water heat sink pipe networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104853. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104853>
- Du, H., Bian, X., & Xiong, W. (2022). Design and energy characteristic analysis of a flexible isobaric strain-energy compressed-air storage device. *Journal of Energy Storage*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104312>
- Esence, T., Bruch, A., Molina, S., Stutz, B., & Fourmigué, J.-F. (2017). A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 153, 628-654. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.032>
- Garzoli, K. V. (1989). DESIGN OF ROCK PILES FOR GREENHOUSE ENERGY STORAGE. *Acta Horticulturae*, (257), 21-28. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.257.3>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Reading, Mass : Addison-Wesley Pub. Co.
- Gorjian, S., Ebadi, H., Najafi, G., Singh Chandel, S., & Yildizhan, H. (2021). Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100940>

- Gourdo, L., Fatnassi, H., Tiskatine, R., Wifaya, A., Demrati, H., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2019). Solar energy storing rock-bed to heat an agricultural greenhouse. *Energy*, *169*, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.036>
- Guzmán-Cruz, R., Castañeda-Miranda, R., García-Escalante, J. J., López-Cruz, I. L., Lara-Herrera, A., & de la Rosa, J. I. (2009). Calibration of a greenhouse climate model using evolutionary algorithms. *Biosystems Engineering*, *104*(1), 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.006>
- Ismail, K. A. R., & Stuginsky Jr, R. (1999). A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage. *Applied Thermal Engineering*, *19*(7), 757-788. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00081-7)
- Khatod, K. J., Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (2022). An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, *50*, 104622. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104622>
- Kim, M.-H., Kim, D.-W., Lee, D.-W., & Heo, J. (2022). Energy Conservation Performance of a Solar Thermal and Seasonal Thermal Energy Storage Based Renewable Energy Convergence System for Greenhouses.
- Klein, P., Roos, T. H., & Sheer, T. J. (2014). Experimental Investigation into a Packed Bed Thermal Storage Solution for Solar Gas Turbine Systems. *Energy Procedia*, *49*, 840-849. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.091>
- Kurata, K., Quan, Z., & Nunomura, O. (1991). Optimal shapes of parallel East-West oriented single-span tunnels with respect to direct light transmissivity. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *48*, 89-100. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(91\)80006-Z](https://doi.org/10.1016/0021-8634(91)80006-Z)
- Kurklu, A., Bilgin, S., & Ozkan, B. (2003). A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renewable Energy*, *28*(5), 683-697. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00109-X)
- Lam, J. C., & Hui, S. C. M. (1996). Sensitivity analysis of energy performance of office buildings. *Building and Environment*, *31*(1), 27-39. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00031-3](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00031-3)
- Lamalice, A., Haillet, D., Lamontagne, M.-A., Herrmann, T. M., Gibout, S., Blangy, S., ... Courchesne, F. (2018). Building food security in the Canadian Arctic through the development of sustainable community greenhouses and gardening. *Écoscience*, *25*(4), 325-341. <https://doi.org/10.1080/11956860.2018.1493260>

- Lamrani, B., Belcaid, A., Lebrouhi, B. E., Khodadadi, J. M., & El Rhafiki, T. (2023). Dynamic thermal analysis of a coupled solar water heaters-thermal storage tank for solar powered district heating networks. *Journal of Energy Storage*, *61*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106793>
- Li, X., Yang, W., Zhao, Z., Wang, R., & Yin, X. (2023). Advantage of priority regulation of pumped storage for carbon-emission-oriented co-scheduling of hybrid energy system. *Journal of Energy Storage*, *58*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106400>
- López-Cruz, I. L., Fitz-Rodríguez, E., Graduate Agricultural Engineering Program, University of Chapingo, Chapingo, Mexico, Salazar-Moreno, R., Graduate Agricultural Engineering Program, University of Chapingo, Chapingo, Mexico, Rojano-Aguilar, A., ... Agricultural and Biosystems Engineering Dept., University of Arizona, Tucson, USA. (2018). Development and analysis of dynamical mathematical models of greenhouse climate: A review. *European Journal of Horticultural Science*, *83*(5), 269-279. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.1>
- Lu, W., Zhang, Y., Fang, H., Ke, X., & Yang, Q. (2017). Modelling and experimental verification of the thermal performance of an active solar heat storage-release system in a Chinese solar greenhouse. *Biosystems Engineering*, *160*, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.006>
- Luo, W., Feije de Zwart, H., Dai, J., Wang, X., Stanghellini, C., & Bu, C. (2005). Simulation of Greenhouse Management in the Subtropics, Part I: Model Validation and Scenario Study for the Winter Season. *Biosystems Engineering*, *90*(3), 307-318. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.008>
- MAMH. (2023). Cartes régionales et réseau municipal. Repéré à <https://www.mamh.gouv.qc.ca/organisation-municipale/cartotheque/cartes-regionales/>
- Niemelä, S., Räisänen, P., & Savijärvi, H. (2001). Comparison of surface radiative flux parameterizations: Part I: Longwave radiation. *Atmospheric Research*, *58*(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(01\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(01)00084-9)
- Piché, P. (2021). *Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire*. Thèse de doctorat. Université de Pau et des Pays de l'Adour, France. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03368948/>

- Piché, P., Haillot, D., Gibout, S., Arrabie, C., Lamontagne, M.-A., Gilbert, V., & Bédécarrats, J.-P. (2020). Design, construction and analysis of a thermal energy storage system adapted to greenhouse cultivation in isolated northern communities. *Solar Energy*, 204, 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.008>
- Rechenberg, I. (1994). *Evolutionsstrategie '94*. Stuttgart : Frommann-Holzboog.
- Santamouris, M., Balaras, C. A., Dascalaki, E., & Vallindras, M. (1994). Passive solar agricultural greenhouses: A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, 53(5), 411-426. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90056-6)
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 10(1), 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>
- Schumann, T. E. W. (1929). Heat transfer: A liquid flowing through a porous prism. *Journal of the Franklin Institute*, 208(3), 405-416. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(29\)91186-8](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(29)91186-8)
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 82(9), 832-859. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.010>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Shukla, A., Sharma, A., & Kant, K. (2016). Solar Greenhouse With Thermal Energy Storage: a Review. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 3(3), 58-66. <https://doi.org/10.1007/s40518-016-0056-y>
- Société du Plan Nord. (2020). *PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT DE SERRES COMMUNAUTAIRES*.
- Solargis. (2023). Solar resource maps of World. Repéré à <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>

- Syndicat des producteurs en serre du Québec. (2008). *Projet d'initiatives structurantes en technologies efficaces*. Hydro-Québec Distribution. Repéré à https://www.serres.quebec/download/publications/Energie/efficacite_energetique/rapport-efficacite-energetique-par-audits-psq-2008-min.pdf
- Tap, R. F. (2000). Economic-based optimal control of greenhouse tomato crop production. *Wageningen. Promotor: Prof.dr.ir. G. van Straten, co-promotor(en): Dr.ir. L.G. van Willigenburg. - Wageningen : R.F. Tap, 2000. - ISBN 90-5808-236-9.*
- Tiwari, G. N. (2003). *Greenhouse technology for controlled environment*. Pangbourne, GB : Alpha Science International.
- Vanthoor, B. H. E. (2011). *A Model-Based Greenhouse Design Method*. ProQuest LLC.
- Vortmeyer, D., & Schaefer, R. J. (1974). Equivalence of one- and two-phase models for heat transfer processes in packed beds: one dimensional theory. *Chemical Engineering Science*, 29(2), 485-491. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(74\)80059-X](https://doi.org/10.1016/0009-2509(74)80059-X)
- Votyakov, E. V., & Bonanos, A. M. (2014). A perturbation model for stratified thermal energy storage tanks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.071>
- Xu, J., Li, Y., Wang, R. Z., & Liu, W. (2014). Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. *Energy*, 67, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.049>
- Zhang, L., Xu, P., Mao, J., Tang, X., Li, Z., & Shi, J. (2015). A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. *Applied Energy*, 156, 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.036>
- Zhang, M., Yan, T., Wang, W., Jia, X., Wang, J., & Klemeš, J. J. (2022). Energy-saving design and control strategy towards modern sustainable greenhouse: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 164, 112602. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112602>