

Modélisation d'une serre couplée à un système de stockage thermique : développement d'un modèle et étude de validité

Timothée MAHEUX^{1*}, Stéphane GIBOUT², Danielle MONFET¹, Didier HAILLOT¹

¹ École de Technologie Supérieure, Laboratoire de Thermique et Science du Bâtiment, 1100 Rue Notre Dame Ouest, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

² Univ Pau & Pays Adour/ E2S UPPA, Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés - IPRA, EA1932, Pau 64000, France

* (auteur correspondant : timothee.maheux.1@ens.etsmtl.ca)

Résumé - Dans le cadre du développement de la serriculture au Nunavik, la région nord du Québec, un projet de serre couplée à un système de stockage thermique de l'énergie est mis en œuvre. Un modèle numérique de l'ensemble serre-système de stockage est développé. Il a comme objectif l'optimisation des caractéristiques des futurs dispositifs de stockage et l'étude de faisabilité de l'ajout de systèmes énergétiques additionnels (par exemple solaire thermique). Cet article présente le couplage des sous-modèles ainsi que l'étude de validité du modèle global.

1. Introduction

Les communautés nordiques du Nunavik, le Territoire du Nord du Québec, font face à des contraintes alimentaires fortes liées notamment à l'appauvrissement des ressources halieutiques et terrestres [1]. Afin de développer l'offre alimentaire locale, une serre communautaire est installée à Kuujjuaq (2 668 habitants en 2021, latitude 58°06' nord et longitude 68°23' Ouest) [2]. Cette serre étant conçue pour les climats continentaux, elle n'est pas adaptée thermiquement au climat nordique. Il en découle une saison de culture courte. La serre a été instrumentée en juin 2016 afin d'étudier son comportement et d'identifier les améliorations à apporter [3]. Les mesures ont montré que malgré une ressource solaire riche, les pertes thermiques nocturnes provoquaient une chute de la température importante. Ceci freine le développement des plantes et est engendré par la faible isolation ainsi que le peu d'inertie thermique des matériaux formant la serre : les températures nocturnes intérieures restent proches des températures nocturnes extérieures. Un système de stockage thermique de l'énergie (STE) a donc été conçu, construit et testé avec pour objectif de limiter les variations extrêmes de température et d'allonger la saison de culture. Ce système permet de découpler la température intérieure, de la température extérieure de la serre et d'éviter les variations de température jour/nuit extrêmes [4].

Un modèle numérique de la serre de Kuujjuaq et de son STE a été développé à l'aide de l'outil Modelica, en adaptant et complétant la librairie Greenhouses développée par Queralt Altes-Buch [5]. Ce modèle permettra des études paramétriques, notamment sur les seuils de contrôle du STE, et de permettre des améliorations du système.

L'objectif de ce travail est d'évaluer la pertinence de ce modèle. Pour l'atteindre, l'ensemble des sous-modèles et le couplage seront présentés, puis les résultats de simulations seront discutés : la cohérence physique des simulations sera étudiée, puis la précision de ces simulations sera commentée à une échelle quotidienne puis sur plusieurs semaines typiques de la saison de culture.

2. Méthodologie

2.1. Serre étudiée

La serre modélisée et étudiée dans cet article est une des deux serres communautaires de Kuujjuaq. Elle a été construite en 2013, instrumentée en 2016 et un système de stockage thermique de l'énergie (STE) y a été construit en 2018. Le STE est constitué de quatre lits de pierres hermétiques placés sous la terre de culture et est représenté dans la Figure 1.

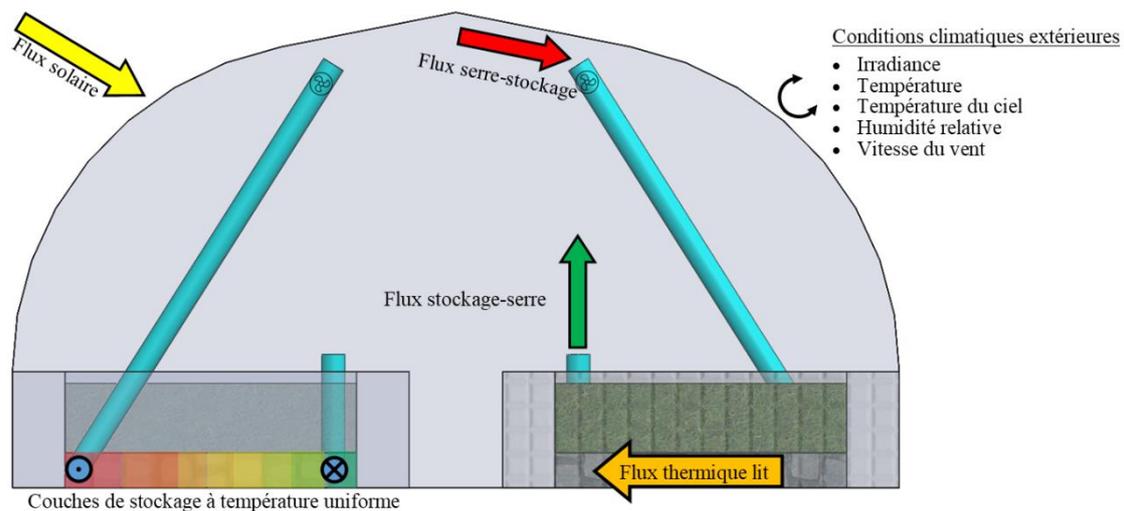


Figure 1 : Schéma de la serre et du système STE

De l'air est ventilé dans le système STE par l'intermédiaire de tuyaux d'entrée et de sortie placés à l'opposé l'un de l'autre. Lorsque de l'air chaud passe dans le lit de pierres, l'air transfère aux pierres une énergie thermique, qu'elles emmagasinent, et ressort donc plus froid. Il s'agit ici d'une période de charge, qui se déroule habituellement le jour. À l'inverse, lorsque de l'air froid passe dans le stock dont les pierres sont chaudes, elles transmettent à l'air une partie de leur énergie thermique sensible. L'air ressort alors plus chaud qu'il n'est entré dans le STE. On a dès lors une période dite de décharge, qui a lieu généralement la nuit.

Le détail de l'étude initiale, de la conception et de la réalisation du système STE a été précédemment présenté [4]. Les paramètres géométriques de la serre et du système STE sont disponibles dans les tableaux Tableau 1 et Tableau 2.

Géométrie	Quonset
Orientation	Nord-Est / Sud-Ouest
Longueur	18,3 m
Largeur	7,6 m
Hauteur	4,1 m
Surface totale	139 m ²
Surface de culture	87 m ²
Volume intérieur	448 m ³

Tableau 1 : Détails de la serre étudiée

Nombre lits	4
Longueur lit	8,7 m
Largeur lit	2,5 m
Hauteur lit	0,3 m
Volume lit	6,525 m ³
Surface emprise au sol	87 m ²
Diamètre équivalent des pierres	10 cm

Tableau 2 : Détails du STE étudié

Les sous-modèles de la serre et du système STE présentés dans ces tableaux sont développés avec l'outil de simulation multiphysique Modelica. Les caractéristiques de ces modèles sont présentées dans les prochaines sections.

2.2. Modèle de la serre

Le modèle de la serre a pour objectif de simuler la température intérieure de la serre, ainsi que la consigne des ventilateurs permettant l'activation du système STE. Dans le cas de la serre de Kuujuaq cette activation ne dépend que de la température dans la serre. Les consignes de ventilation et de stockage sont liées par les mêmes sondes, ce qui implique que lorsque la ventilation est mise en route, le système de charge l'est également, ce qui réduit l'énergie thermique disponible pour le stockage.

Afin de simuler l'état thermique de la serre, le système est divisé en plusieurs sous-systèmes à température uniforme appelés nœuds : l'air intérieur, l'enveloppe, le sol et la canopée. Entre ces nœuds sont définis des flux d'échange thermiques et massiques: échanges convectifs et radiatifs. Un flux conductif unique modélise le comportement thermique du sol : il est divisé en plusieurs couches qui échangent entre elles jusqu'à une profondeur de température réputée constante.

Pour calculer les échanges thermiques avec l'extérieur, les conditions climatiques extérieures sont requises : la température extérieure influençant les pertes convectives depuis l'enveloppe ; la « température du ciel » (permettant de calculer les pertes radiatives vers l'extérieur) ; l'humidité relative extérieure (influçant l'humidité relative intérieure par l'intermédiaire de la ventilation) ; l'irradiance qui est la principale source de réchauffement de la serre par le flux radiatif solaire frappant le sol, la canopée et l'enveloppe ; et enfin la vitesse du vent qui influence l'efficacité de la ventilation et qui augmente les pertes thermiques depuis l'enveloppe vers l'extérieur. Ces bilans nodaux permettent de calculer l'évolution de la température de chaque élément et notamment de l'air intérieur.

2.3. Modèle du système de stockage thermique de l'énergie (STE)

La stratégie de modélisation du système STE consiste à diviser un lit en mailles perpendiculaires au flux d'air dans le lit (approche 1D). Ces mailles sont considérées comme ayant des températures d'air et de roches uniformes. L'hypothèse principale utilisée est l'isolation thermique parfaite du système STE : il n'échange avec l'extérieur que par l'intermédiaire des flux d'entrée et de sortie liés à la serre et commandés par les ventilateurs du système. Autrement dit, aucun échange n'est possible avec la terre et les gabions qui l'entourent. Cette hypothèse est valide, car ce transfert thermique est très faible grâce à la mousse isolante mise en place entre le système de stockage et le sol sous la serre.

2.4. Couplage des modèles

Les modèles de serre et STE sont couplés en définissant deux flux thermiques entre eux : un flux d'air dit « d'entrée », à la température de la serre, vers le STE et un flux dit « de sortie » du STE vers la serre. Ces flux thermiques sont des flux advectifs provoqués par le mouvement d'air entre les deux systèmes. Le flux thermique délivré à la serre par un lit de pierres est défini par l'équation 1 :

$$\dot{Q}_{\text{stockage-serre}} = q_{\text{air}} \cdot c_{p,\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot U_{\text{système}} \cdot (T_{\text{stockage}} - T_{\text{serre}}) \quad (1)$$

Le débit d'air q_{air} est de 750 m³/h et l'état U du système prend la valeur 0 ou 1 en fonction de l'état d'activation du ventilateur du système de stockage thermique.

Le STE formant un système fermé avec la serre, l'humidité spécifique de l'air n'est pas affectée par son fonctionnement, mais l'humidité relative l'est par l'intermédiaire de l'évolution de la température de l'air. La prise en compte de ce comportement est en cours d'intégration au modèle, mais il est complexe à modéliser. D'une part certaines sources sont difficilement

quantifiables dues à l'activité humaine (irrigation), d'autre part d'autres phénomènes nécessiteraient une discrétisation plus fine (points froids sur l'enveloppe).

L'activation du système STE est régie par une commande en hystérésis double : un cycle de charge débute lorsque la température intérieure devient supérieure à 20°C et s'arrête lorsque la température devient inférieure à 18°C. A l'opposé, un cycle de décharge débute lorsque la température intérieure devient inférieure à 12°C et prend fin lorsqu'elle remonte au-dessus de 14°C [3].

3. Résultats et discussion

Cette section s'articule autour de trois parties : d'abord la vérification de la cohérence physique du modèle, ensuite l'analyse de sa précision et enfin l'analyse de ses performances sur trois périodes de culture.

3.1. Cohérence physique du modèle

Le modèle couplé vise à simuler la température intérieure de la serre en renseignant les conditions climatiques extérieures. La Figure 2 représente l'évolution de la température intérieure simulée et de l'état d'activation du système STE, ainsi que les deux conditions climatiques extérieures majeures : l'irradiance et la température extérieure mesurées du 6 au 11 juin 2019.

L'évolution de la température simulée adopte un comportement correct : elle commence à croître lorsque le jour se lève et à décroître lorsque la température extérieure baisse en fin de journée. Elle est également sensible aux passages nuageux, comme visible le 7 juin. Comme définie dans la section 1, la fonction de découplage des températures basses est respectée : les températures nocturnes intérieures restent supérieures à 7°C sur cette période tandis que la température extérieure tombe sous les 3°C. La suite de ce travail de validation s'attachera à évaluer la précision de la simulation de la température intérieure.

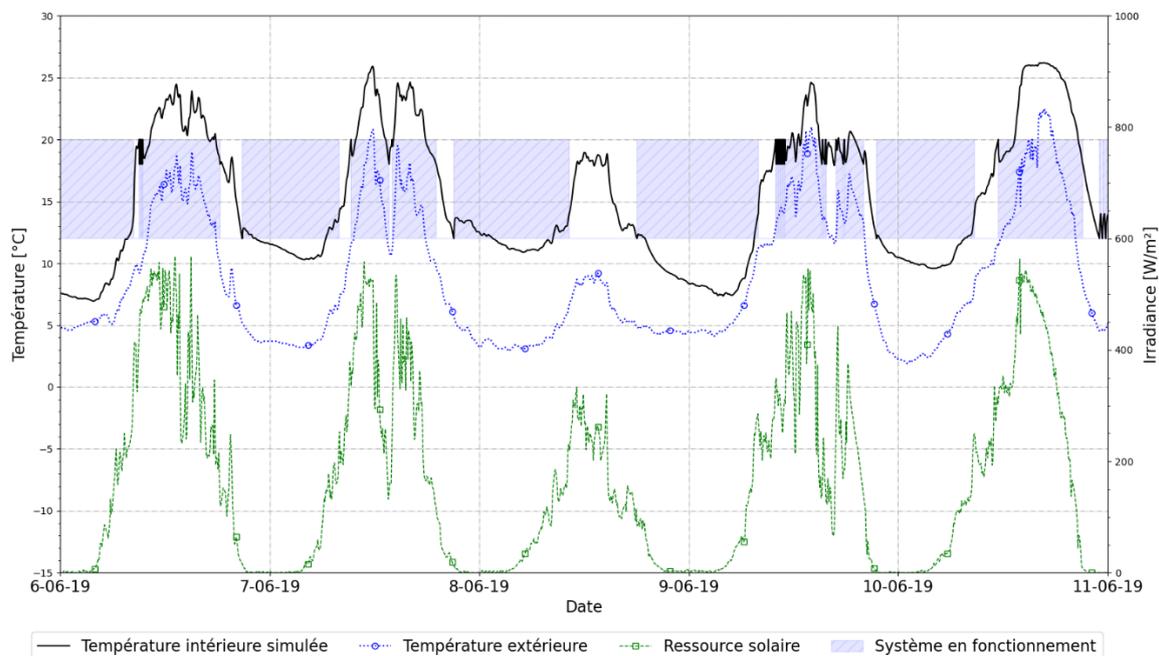


Figure 2 : Température intérieure simulée, température extérieure et ressource solaire du 11 au 16 juillet 2022

3.2. Précision du modèle et impact de la régulation

La Figure 3 représente les températures intérieures simulée et mesurée, la température de sortie de l'air du système STE, ainsi que son état d'activation dans la simulation ainsi que mesuré du 16 au 21 juillet 2022.

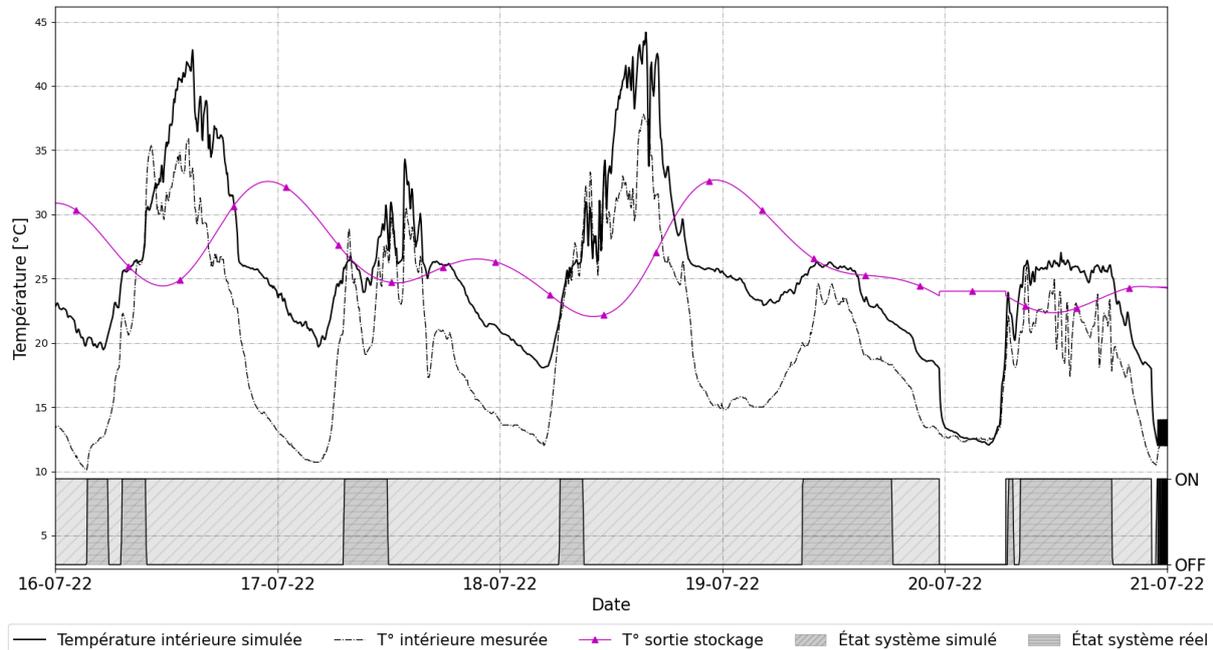


Figure 3 : Température intérieure simulée et mesurée, état du système simulé et réel, température de sortie du stock simulée du 16 au 21 juillet 2022

La Figure 3 montre que le modèle peine à prédire correctement la température à l'intérieur de la serre : pendant les nuits, la température est surestimée d'environ 10°C. Cette surestimation est due au fait que la température en sortie du système STE est très élevée en fin de journée, ce qui compense les pertes thermiques nocturnes et permet à la température intérieure de se maintenir au-dessus de 18°C. La température reste alors élevée toute la nuit sans atteindre des températures en adéquation avec la réalité.

L'impact de cette boucle de surestimation est visible en comparant le comportement du système avec un jour de fonctionnement où les températures sont en adéquation avec le scénario de consigne : le 20 septembre 2022, la température intérieure de la serre chute sous 18°C pendant la nuit (Figure 3). Le système STE s'arrête alors et la température simulée dans la serre est en adéquation avec la température mesurée. Le temps d'activation du système simulé très supérieur à celui du système réel montre que cette problématique de boucle cumulative des erreurs a un impact majeur sur l'adéquation entre les températures intérieures mesurées et simulées.

Afin de découpler le système pour identifier la source d'erreurs, l'analyse du modèle sera désormais réalisée en mettant la consigne réelle du système STE en entrée du modèle : ceci permet d'isoler la serre du système STE tout en permettant d'analyser les dynamiques globales.

3.3. Analyse des performances sur trois périodes types

Les performances du modèle sont à évaluer sur l'ensemble d'une saison de culture, car les conditions climatiques varient beaucoup sur l'ensemble de la période. La serre est généralement utilisée de mi-mai à fin octobre. L'instrumentation de Kuujuaq ayant eu des interruptions, des

problèmes de sonde et problèmes de transmission, il n'est cependant pas possible de réaliser des simulations sur toute la saison. L'étude des performances s'appuie donc sur trois moments clés :

- Le début de saison (11 au 31 mai 2020)
- Le milieu de saison (11 au 31 juillet 2022)
- La fin de saison (10 au 30 septembre 2021)

Comme évoqué précédemment, les simulations ont été réalisées en considérant l'état d'activation du système STE comme une donnée d'entrée : le système est commandé par la consigne mesurée dans la serre de Kuujuaq. Avant de commencer l'analyse, une précision s'impose. Le modèle couplé, soit l'ensemble serre-stockage, est un modèle complexe où les flux et sources d'erreurs sont nombreux et difficilement quantifiables. Puisque la serre est en exploitation, son comportement thermique peut être influencé par les activités des occupants (ils peuvent par exemple laisser une porte ouverte). Dans ces conditions, calculer avec précision l'évolution temporelle de la température de la serre est difficilement réalisable. D'autres indicateurs peuvent être définis pour pouvoir appréhender les performances du système. Les végétaux étant sensibles aux variations de température, les valeurs minimale, moyenne et maximale par période de 24 heures apportent des informations agrégées qui permettent d'estimer les conditions de croissance des cultures.

Les graphiques en Figure 4 représentent les températures types quotidiennes pour trois périodes types d'une saison de culture : le début, le milieu et la fin de la saison.

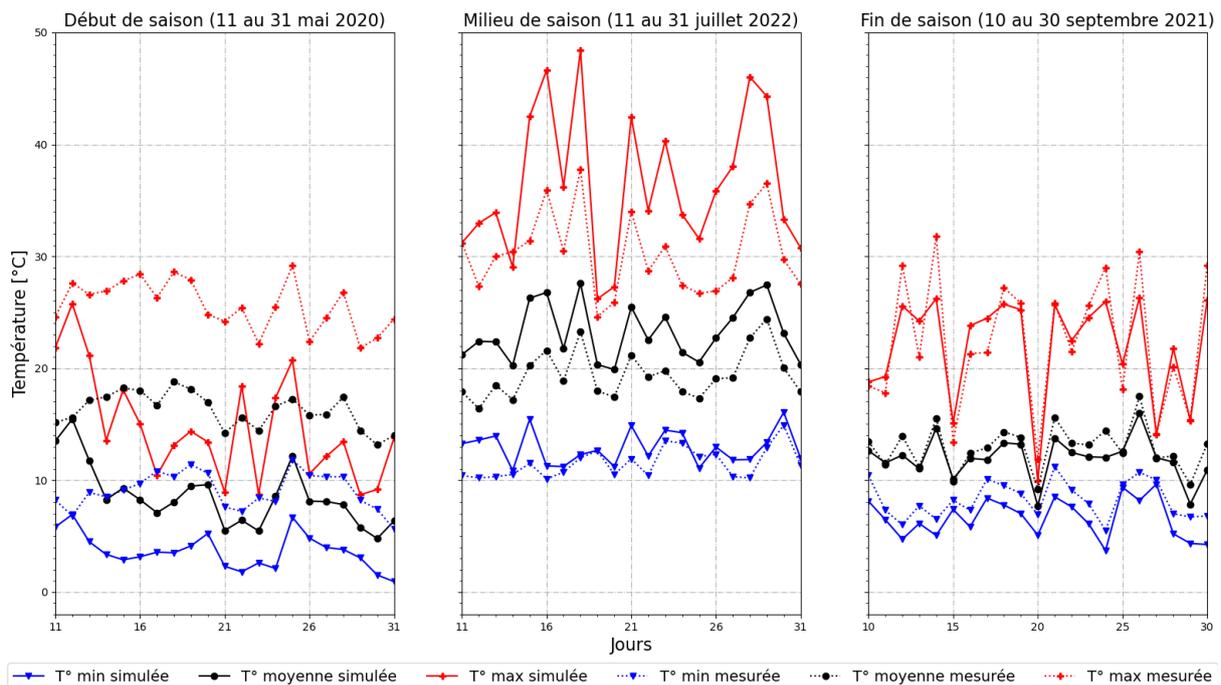


Figure 4 : Températures types quotidiennes pour les trois périodes types

En début de saison, malgré des dynamiques d'évolution correctes les températures types sont très sous-estimées: les écarts quadratiques moyens (2) entre la mesure m_i et la simulation s_i sont respectivement de 6°C, 8,4°C et 15,4°C pour les températures minimales, moyennes et maximales.

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

Cette sous-estimation importante de la température peut être expliquée par un contrôle manuel du toit ouvrant : dans le modèle, le toit s'ouvre automatiquement à partir de 26°C. Dans la serre de Kuujuaq, en début de saison, l'opérateur maintient le système d'ouverture du toit en mode manuel. En effet, il le contraint à rester fermé afin d'augmenter l'énergie chargeable disponible pour stocker le maximum d'énergie thermique en début de saison. Or les périodes manuelles vs automatique sont difficilement vérifiables – et donc implémentables dans le modèle –, car l'instrumentation locale ne donne pas d'information sur l'état du toit.

En milieu de saison, le modèle prédit assez fidèlement la température minimale (le RMSE de T_{\min} est de 2,6°C), mais surestime encore la température maximale (RMSE de 6,3°C), et par conséquent la température moyenne. On observe cependant que le modèle reproduit la dynamique de l'évolution de T_{\max} : cela nous incite à penser que le décalage pourrait provenir non pas de la structure du modèle couplé, mais plutôt d'un (ou plusieurs) paramètre mal ajusté, auquel s'ajouterait l'effet de l'état initial du STE comme mentionné précédemment. En fin de saison, les résultats de simulation sont plus précis (les trois RMSE types sont inférieurs à 3,4°C).

Les graphiques sur la Figure 5 représentent la température mesurée et simulée de l'air au centre du système STE ainsi que la ressource solaire, sur les mêmes trois périodes.

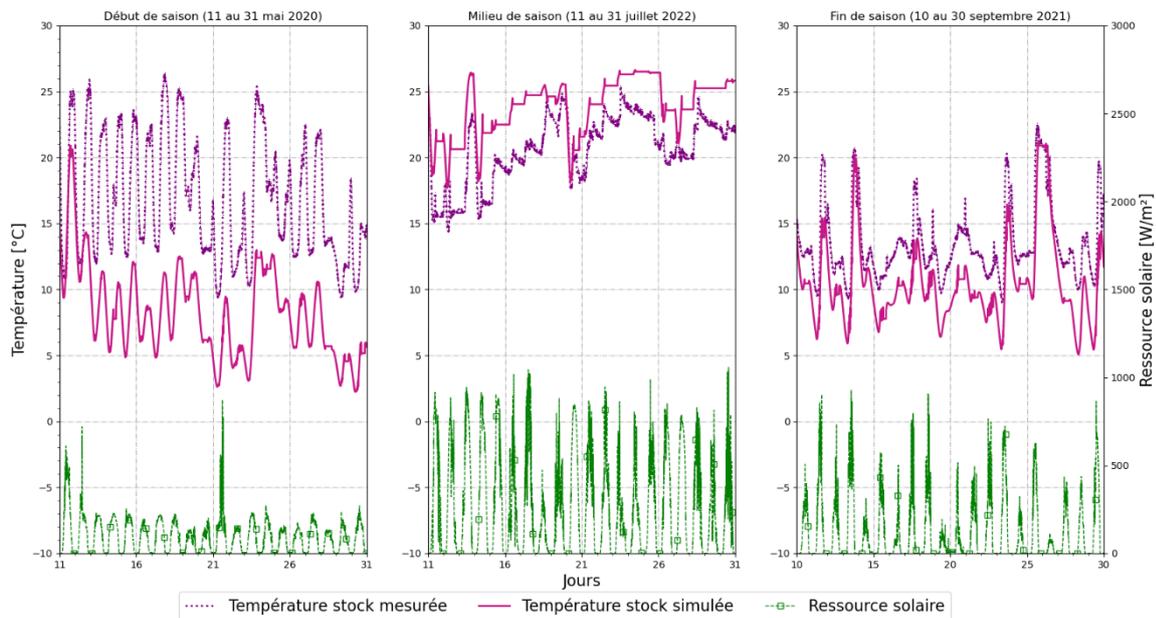


Figure 5 Température du stock simulée et mesurée

La Figure 5 montre qu'une mauvaise estimation de la température dans la serre est corrélée avec une mauvaise estimation de la température dans le système STE : en début de saison, la température dans le STE est sous-estimée d'environ 10°, alors qu'elle est surestimée d'environ 4°C en milieu de saison et sous-estimée de 0 à 4° en fin de saison. Les mauvaises estimations sont corrélées avec la ressource solaire : une ressource solaire faible comme en début de saison est liée à une sous-estimation des températures et inversement. Notons qu'une surestimation de la température du STE implique une surestimation de la température de la serre, qui elle-même impliquera une surestimation de la température du STE - ceci reste vrai dans le cas des sous-estimations.

4. Conclusion et perspectives

Cet article présente les premiers résultats d'un modèle de serre nordique communautaire couplé avec un système de stockage thermique de l'énergie.

Le modèle couplé obtenu présente un comportement physique correct et cohérent, mais n'est pas assez précis pour pouvoir être exploitable en l'état. Plusieurs perspectives de recherche sont en cours : le comportement de contrôle du STE dépendant de la température intérieure de la serre, il est nécessaire de calibrer le modèle selon cette variable. De plus, l'étude du système sera réalisée avec des indicateurs macroscopiques : énergétiques (rendement énergétique, coefficient de performance) et agronomiques (périodes de culture, découplage du climat extérieur).

Une étude de calibration à l'aide d'un algorithme génétique [6] réalisée sur l'ensemble d'une saison de culture permettra de définir des paramètres thermiques optimaux pour valider le modèle couplé. La construction en 2022 d'un deuxième système de stockage d'énergie à Radisson (latitude 54°48' Nord et longitude 77°37' Ouest) va également permettre d'avoir accès à des données plus nombreuses et plus fiables grâce à une instrumentation plus robuste. L'automate de contrôle présent dans cette serre tolérera la mise en place de consignes de stockage plus complètes, ce qui réduira les périodes de scénarios contre-productifs.

Enfin l'objectif final du modèle global sera la réalisation d'études de faisabilité pour de nouvelles serres intégrant des systèmes énergétiques additionnels tels que du solaire thermique.

Références

- [1] A. Lamalice et al., Building food security in the Canadian Arctic through the development of sustainable community greenhouses and gardening, *Écoscience* 25 (2018), 325-341
- [2] E. Avard, An Alternative Local Food Provisioning Strategy for Nunavik, Thèse de doctorat, Université Laval, 2015.
- [3] P. Piché, Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire, Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour, 2021
- [4] P. Piché et al., Design, construction and analysis of a thermal energy storage system adapted to greenhouse cultivation in isolated northern communities, *Solar Energy* 204 (2020), 90-105
- [5] Q. Altes-Buch, S. Quoilin, V. Lemort, Greenhouses: A Modelica Library for the Simulation of Greenhouse Climate and Energy Systems, *The 13th International Modelica Conference* (Regensburg, Germany, 4–6 mars 2019), 533-542
- [6] F.M. Baba et al., Calibration of building model based on indoor temperature for overheating assessment using genetic algorithm: Methodology, evaluation criteria, and case study, *Building and Environment* 207 (2022), 108518

Remerciements

Ce travail a été soutenu par la subvention de recherche ALLRP 561361 – 21 du CRSNG et par le Laboratoire d'Excellence "Dispositif de Recherche Interdisciplinaire sur les Interactions Hommes-Milieus" (LabEX DRIHM) et l'Observatoire Hommes-Milieus International du Nunavik (OHMI-Nunavik).

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au Centre d'Étude Nordique et au Centre d'Innovation Sociale en Agriculture pour leur implication dans le projet de serre nordique avec stockage thermique.

Enfin les auteurs veulent remercier les jardiniers de la serre communautaire de Kuujuaq.