

Modélisation thermique d'une serre en milieu circumpolaire

Paul PICHE¹, Didier HAILLOT^{1,2*}, Stéphane GIBOUT¹, Cédric ARRABIE¹, Annie LAMALICE^{3,4}, Daniel ROUSSE², Xavier PY⁵

¹ Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés, Avenue Jules Ferry - Pau

² École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada

³ Département de géographie, Université de Montréal, 520 chemin de la Côte-Sainte-Catherine - Montréal, Canada

⁴ Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive - CNRS, 1919 route de Mende - Montpellier

⁵ Laboratoire Procédés, Matériaux et Énergie Solaire, Rambla de la thermodynamique - Perpignan

*(auteur correspondant : didier.haillot@univ-pau.fr)

Résumé - Cet article présente le travail préliminaire à la modélisation d'une serre en milieu nordique. Un exemple d'instrumentation de serre est donné avec l'exemple de la serre coopérative de Kuujuaq (nord du Canada), et une analyse des données récoltées durant un an est présentée. Les équations du modèle sont exposés, incluant les sous-modèles de ventilation et d'évapotranspiration des plantes.

Nomenclature

Q flux de chaleur, $W.m^{-2}$
 E flux de matière (eau), $kg.m^{-2}.s^{-1}$
 MC flux de matière (CO_2), $mg.m^{-2}.s^{-1}$
 T température, $^{\circ}C$
 $\overline{T}_{ij}$ température moyenne de i et j , $^{\circ}C$
 P_{H_2O} pression partielle de l'eau, Pa
 c_p capacité thermique massique, $J.K^{-1}.m^{-2}$
 v_{Vent} vitesse du vent, $m^2.s^{-1}$
 A aire, m^2
 h hauteur, m

Symboles grecs

σ constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$

Indices

Sys système énergétique

Vent ventilation

Ext extérieur

Exposants

ray rayonnement

sens sensible

1. Introduction

Les communautés inuites du nord canadien vivent sur des territoires isolés, inaccessibles par voie terrestre. Elles font faces à des problématiques d'insécurité alimentaire et énergétique. En effet, l'impact du changement climatique, couplé aux bouleversements dans le mode de vie des populations autochtones du grand nord, ont fortement affecté leur capacité à couvrir leurs besoins alimentaires. La nourriture traditionnelle, collectée grâce à la pêche, la chasse, ou la cueillette est de plus en plus rare tandis que la nourriture importée du sud par avion ou bateau est chère, essentiellement à cause des coûts de transport. Ainsi l'insécurité alimentaire touche 62% des foyers inuits [1]. Par ailleurs, ces territoires ne sont pas raccordés au réseau électrique, ce qui implique une forte dépendance aux produits pétroliers à la fois pour la production électrique par des génératrices diesels mais aussi pour la production thermique par combustion du mazout.

Afin de répondre à la problématique de l'insécurité alimentaire, l'implantation de serre pourrait constituer une solution innovante pour la production locale de nourriture dans un contexte de développement d'une agriculture nordique durable [2, 3]. En ce qui concerne l'insécurité énergétique, l'implantation de production d'énergie renouvelable constitue une alternative à

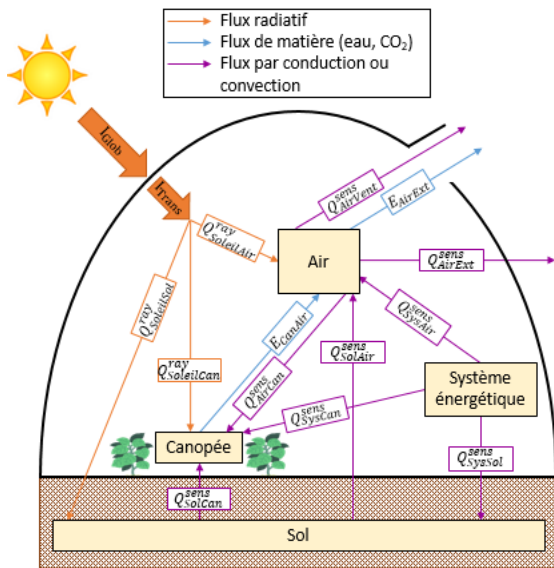
l'utilisation du diesel. Ainsi, développer des serres nordiques adaptées au climat extrême circumpolaire et utilisant l'énergie solaire, éolienne ou la biomasse pourrait être un bon moyen de répondre simultanément aux deux problématiques. Cependant, le dimensionnement de ce type de serre ne peut se faire sans la mise en place d'un modèle thermique. Ce dernier est en effet nécessaire afin, d'une part d'optimiser la consommation énergétique de ces serres, et d'autre part de sélectionner et dimensionner les systèmes énergétiques, que ce soit les systèmes d'éclairage, de chauffage ou encore de stockage thermique.

2. Modélisation d'une serre horticole

2.1. Principe général

Les serres sont des systèmes énergétiques complexes à modéliser à cause de la forte interaction entre les plantes et le climat intérieur. Le fonctionnement simplifié de la serre est schématisée sur la figure 1. Deux grandes classes de modèles existent : les modèles CFD (computational fluid dynamics) et les modèles de "l'enceinte parfaitement brassée". Les modèles CFD permettent de spatialiser le climat à l'aide d'équations différentielles aux dérivées partielles mais sont coûteux en ressources et temps de calcul. Les modèles considérant "l'enceinte parfaitement brassée" considèrent une uniformité des variables climatiques (température, humidité relative) et se basent sur des bilans d'énergie grâce à des équations différentielles ordinaires.

Une approche couramment utilisée est de diviser la serre en plusieurs compartiment (air, canopée, sol, toit) en considérant une température uniforme au sein de chaque subdivision [5, 6, 7, 8, 9]. Des bilans de masse et d'énergie sont ensuite réalisés entre chaque compartiment (système d'équations 1), où h_j est la hauteur du compartiment considéré, $C_{P_{H_2O}}$ et C_{CO_2} sont les capacités du compartiment à stocker la vapeur d'eau et le CO_2 respectivement [6]. Ainsi, les données d'entrée sont l'irradiance, la température et l'humidité extérieure, le taux de CO_2 extérieur, la vitesse du vent extérieure, la géométrie et les propriétés thermiques de la serre, et les espèces végétales présentes à l'intérieur de la serre. Les données de sorties sont la température et l'humidité de l'air intérieur, de la canopée et du sol et le taux de CO_2 intérieur.



$$\begin{cases} \rho_j h_j c_{p,j} \frac{dT_j}{dt} = \sum_i Q_i \\ C_{P_{H_2O}} \frac{dP_{H_2O}}{dt} = \sum_i E_i \\ C_{CO_2} \frac{d[CO_2]}{dt} = \sum_i MC_i \end{cases} \quad (1)$$

Figure 1 : Fonctionnement énergétique simplifié d'une serre

Les flux de chaleur sensibles (conductif ou convectif) entre deux éléments i et j sont classiquement donnés par :

$$Q_{ij}^{Sens} = H_{ij}(T_i - T_j) \quad (2)$$

Où H_{ij} (W.m²) est le coefficient d'échange de chaleur entre i et j .

Le flux de chaleur radiatif de l'élément i vers l'élément j est donné par [6] :

$$Q_{ij}^{FIR} = A_i \varepsilon_i \varepsilon_j F_{ij} \sigma ((T_i + 273.15)^4 - (T_j + 273.15)^4) \quad (3)$$

Avec A_i (m².m⁻²) la surface de l'objet i par unité de surface de la serre, ε_i et ε_j les coefficients d'émission des objets i et j respectivement et F_{ij} le facteur de forme depuis l'objet i vers l'objet j .

2.2. Sous-modèle de ventilation

La ventilation de la serre peut-être naturelle (ouverture du toit seulement) ou forcée (mise en fonctionnement du système d'aération). Ce sous-modèle est important dans la mesure où il influence fortement le taux de CO₂ et l'humidité relative de la serre. L'expression de la ventilation naturelle est donnée par Boulard et Baille [10] :

$$f_{VentToit} = \frac{U_{Toit} A_{Toit} C_d}{2 A_{Sol}} \sqrt{\frac{g h_{vent}}{2} \frac{T_{air} - T_{Ext}}{\bar{T}_{AirExt} + 273.15} + C_w v_{Vent}^2} \quad (4)$$

Où U_{Toit} représente le contrôle de l'ouverture des battants (1 pour ouvert, 0 sinon), C_d le coefficient de décharge et C_w le coefficient d'effet du vent qui dépendent tous les deux de la forme de la serre.

La ventilation forcée est simplement décrite par :

$$f_{VentFor} = \frac{U_{VentFor} \phi_{VentFor}}{A_{Sol}} \quad (5)$$

Où $U_{VentFor}$ représente le contrôle de la ventilation forcée et $\phi_{VentFor}$ (m³.s⁻¹) la capacité de soufflage du système de ventilation forcée.

2.3. Sous-modèle de transpiration

Au cours de la journée, les plantes vont transpirer de l'eau qui va s'évaporer, faisant office de régulation thermique : c'est le phénomène d'évapotranspiration. Celui-ci est pris en compte dans les bilans de masse sous la forme du terme suivant [4] :

$$E_{CanAir} = K_{CanAir} (P_{H_2O,Can}^{Sat} - P_{H_2O,Air}) \quad (6)$$

Avec $P_{H_2O,Can}^{Sat}$ la pression de vapeur saturante prise à la température de la canopée. K_{CanAir} est le coefficient d'évapotranspiration et est donnée par [4] :

$$K_{CanAir} = \frac{2 \rho_{Air} c_{p,Air} L A I}{\Delta H \gamma (r_a + r_s)} \quad (7)$$

Avec LAI (Leaf Area Index) qui représente la surface de feuille par unité de surface du sol ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$), ΔH ($\text{J}.\text{kg}^{-1}$) la chaleur latente de l'eau, γ ($\text{Pa}.\text{K}^{-1}$) la constante psychrométrique, r_a ($\text{s}.\text{m}^{-1}$) la résistance aérodynamique des feuilles de la canopée et r_b ($\text{s}.\text{m}^{-1}$) la résistance stomatale des feuilles.

3. Instrumentation de la serre de Kuujjuaq-Nunavik-Canada

3.1. Dispositif expérimental

Kuujjuaq est une ville du Nunavik, qui est le territoire le plus au nord de la province du Québec. Une serre coopérative a été construite en 2012 afin de répondre à la demande de légumes frais et de tester la serriculture en climat nordique. Il s'agit d'une serre à arche modifiée (figure 2), faite en polycarbonate et ayant une surface de 140 m^2 . De plus, c'est une serre passive qui n'est pas chauffée et qui ne contient pas de système de stockage de chaleur. Cependant, un système automatique d'ouverture de battants sur le toit (ventilation naturelle) et de ventilateur (ventilation forcée) s'active quand la température devient trop élevée dans la serre. La saison de culture dure environ 4 mois (de juin à fin septembre).

La collecte de données est un processus essentiel puisqu'elle permet d'analyser le comportement thermique de la serre, de fournir les données d'entrée du modèle et de le valider en comparant les données de sortie du modèle avec les données recueillies sur le terrain. Une campagne d'instrumentation a donc été réalisée en 2016. Une dizaine de capteurs DTH 22 mesurant la température et l'humidité relative ont été installées à l'intérieur de la serre ainsi qu'un capteur à l'extérieur (Figure 3). De plus, deux pyranomètres CMP3 (Kipp and Zonen) ont été mis en place (un à l'intérieur, un à l'extérieur) dans le but de relever le flux solaire incident et de calculer le coefficient de transmission des parois en polycarbonate. Un thermocouple type K a également été installé pour mesurer la température du sol. Ces capteurs sont reliés à des data-loggers qui enregistrent les données. Un an de données ont ainsi pu être récoltées et analysées.



Figure 2 : Serre coopérative de Kuujjuaq (photo D. Haillot)

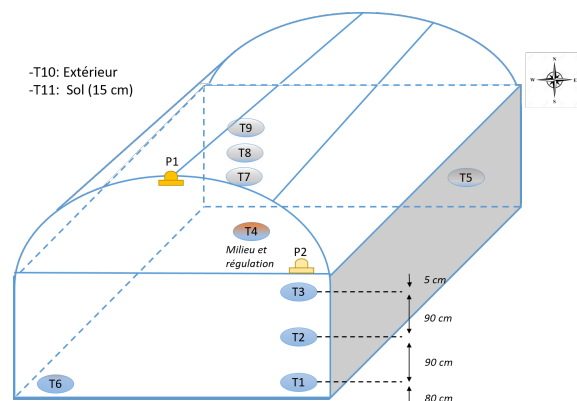


Figure 3 : Position des capteurs dans la serre de Kuujjuaq

3.2. Analyse des données

3.2.1. Données solaires

L'analyse des données d'irradiance solaire ont permis de calculer l'ensoleillement mensuel de Kuujjuaq. Cette analyse révèle qu'il y a un fort potentiel de l'énergie solaire, notamment dû

au fait que les jours de printemps et d'été sont relativement longs ($\approx 16h$). Les données d'ensoleillement de Kuujuaq sont comparées à celle de Toulouse (figure 4) qui sont une moyenne sur 15 ans (1990-2004) [11].

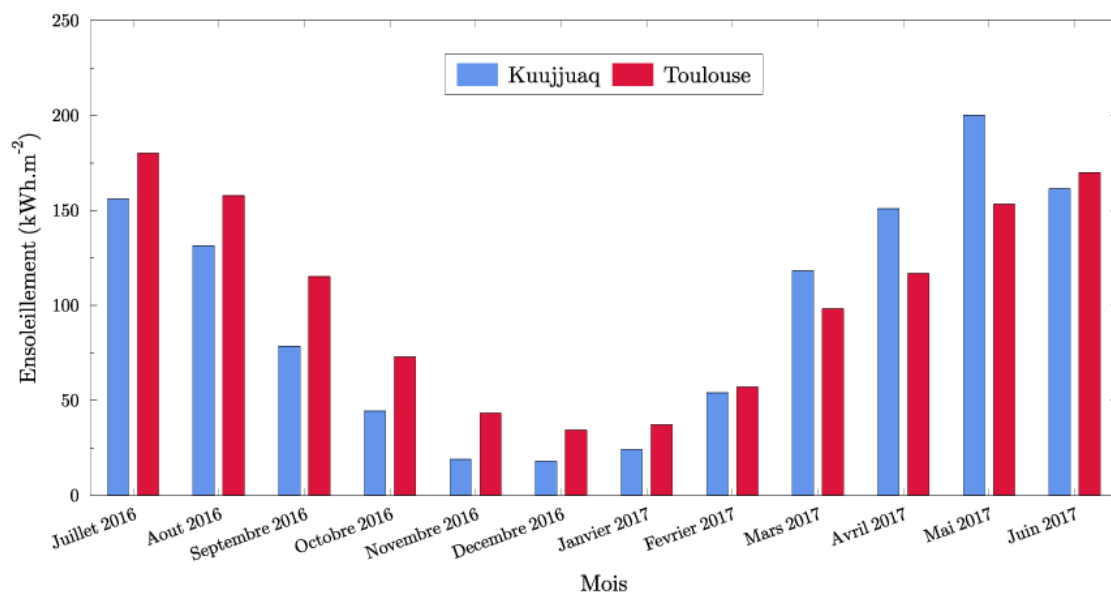


Figure 4 : Ensoleillement mensuel de Kuujuaq et Toulouse

3.2.2. Données thermiques

Les données de température de la serre permettent de se rendre compte qu'il existe un fort écart de température entre le jour et la nuit. La figure 5 présente la différence entre la température diurne maximale et la température nocturne minimale tout au long de la saison de culture. La différence moyenne est de 25°C , différence qui pourrait être considérablement réduite grâce à l'installation de systèmes de stockage thermique comme des volumes d'eau, des lits de pierre, des matériaux à changement de phase ou la géothermie. L'efficacité de ces différents système de stockage pourra être comparé grâce au modèle.

Il a également été possible d'analyser l'uniformité de la température dans la serre. La différence maximale de température entre deux capteurs en fonction de la température moyenne ($\bar{T}$) de la serre, durant une année, est représentée sur la figure 6. Chaque capteur de température a une précision de $\pm 1^{\circ}\text{C}$; on peut donc considérer que la température est homogène si $\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$. Quand $\bar{T} < 25^{\circ}\text{C}$, plus de 88% des valeurs de ΔT sont inférieures à 2°C , ce qui indique une température globalement uniforme et justifie le choix du modèle de "l'enceinte parfaitement brassée" (cf 2.1.). Par contre, quand $\bar{T} > 25^{\circ}\text{C}$, il n'y a plus que 30% des valeurs de ΔT qui sont inférieures à 2°C . Cela est probablement dû à la ventilation qui se déclenche quand la température dépasse 25°C . Cela devra être pris en compte dans le modèle, par exemple avec une subdivision plus fine de la serre pour ces températures.

4. Conclusion

Le développement d'un modèle numérique de serre en milieu circumpolaire est une étape importante du développement de la serriculture dans les régions nordiques. Le principe du modèle ainsi que les équations associées sont données. Le modèle ayant besoin de données pour fonctionner, l'instrumentation de la serre coopérative de Kuujuaq est présentée ainsi que l'analyse

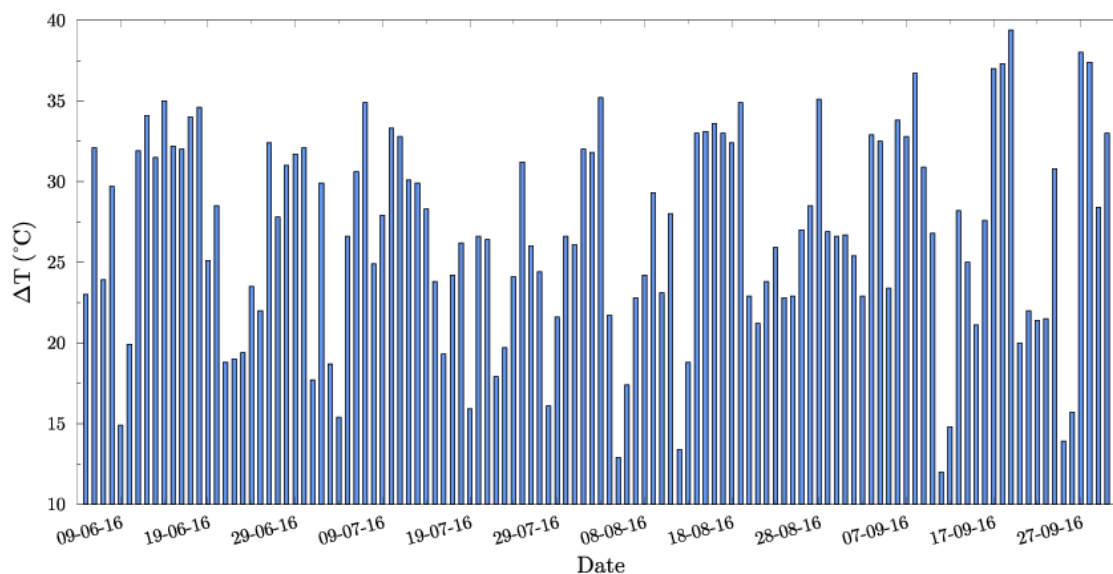


Figure 5 : Différence de température jour/nuit durant une saison de culture

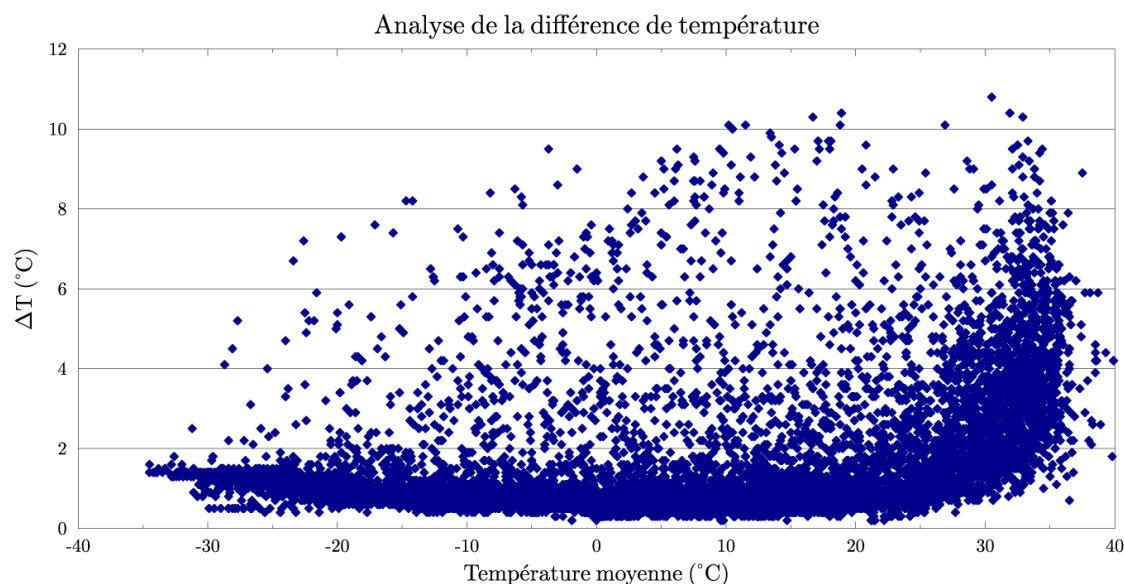


Figure 6 : Uniformité de la température en fonction de la température moyenne de la serre

du comportement thermique dans la serre. L'amélioration de l'instrumentation est prévue pour avril 2018 avec l'installation de nouveaux capteurs (anémomètre, CO_2). L'écriture du modèle en langage python est en cours.

Références

- [1] Catherine Huet, Renata Rosol, and Grace M. Egeland. The prevalence of food insecurity is high and the diet quality poor in inuit communities. *The Journal of Nutrition*, 142(3) :541–547, 2012.
- [2] Annie Lamalice, Ellen Avar, Veronique Coxam, Thora Herrmann, Caroline Desbiens, Yohann Wittrant, and Sylvie Blangy. Supporting food security in the Far North : Community greenhouse projects in Nunavik and Nunavut. *Etudes inuit. Inuit studies*, 40(1) :147–169, 2016.
- [3] Ellen Avar. *Northern Greenhouses : An Alternative Local Food Provisioning Strategy for Nuna-*

- vik. PhD thesis, Université Laval (Québec), 2015.
- [4] Cecilia Stanghellini. *Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management*. PhD thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, June 1987.
 - [5] Fátima de Jesus Folgôa Baptista. *Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting Botrytis cinerea infection*. PhD thesis, Universidade de Evora (Portugal), 2007.
 - [6] Bram Henricus Emanuel Vanthoor. *A model-based greenhouse design method*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, June 2011.
 - [7] Gurpreet Singh, Parm Pal Singh, Prit Pal Singh Lubana, and K.G. Singh. Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy*, 31(10) :1541–1560, August 2006.
 - [8] V.P. Sethi. On the selection of shape and orientation of a greenhouse : Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, 83(1) :21–38, January 2009.
 - [9] E. Mashonjowa, F. Ronsse, J.R. Milford, and J.G. Pieters. Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model. *Solar Energy*, 91 :381–393, May 2013.
 - [10] T. Boulard and A. Baille. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents.pdf. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61 :37–48, 1995.
 - [11] <http://www.soda-pro.com/fr/web-services/meteo-data/monthly-means-solar-irradiance-temperature-relative-humidity>. Consulté le : 10/12/2017.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l’OHMI Nunavik pour leur financement permettant l’instrumentation de la serre de Kuujjuaq.