Calibration d'un modèle énergétique et analyse économique de mesures de conservation d'énergie d'une serre communautaire à Montréal

Frédéric Léveillé-Guillemette et Danielle Monfet
Département de Génie de la Construction, École de technologie supérieure,
Montréal, Canada

Résumé : *L'agriculture en environnement contrôlé connaît une très forte croissance. Ce type de culture permet souvent une meilleure productivité, mais est toutefois très énergivore, surtout dans un climat nordique. L'objectif de cette étude est de comparer différentes mesures de conservation de l'énergie (MCE) pour une serre construite à Montréal et opérant à longueur d'année. Un modèle énergétique est monté dans OpenStudio puis calibré avec des données mesurées sur le site, soit les conditions internes et les consommations énergétiques de chauffage. Différents scénarios sont par la suite modélisés avec le modèle calibré et les économies d'énergie attendues sont reprises dans une analyse des coûts. Les économies d'énergie attendues varient entre 5 % et 30 % pour les mesures étudiées. Les périodes de retour sur investissement (PRI) des mesures sont très variables, mais semblent plus adaptées à des serres de plus grandes superficies. L'isolation du mur Nord est la mesure avec la meilleure PRI variant entre 11 et 16 ans.*

Mots clés : *Serres, analyse des coûts du cycle de vie (ACCV), calibration, mesures de conservation d'énergie*

INTRODUCTION

L'agriculture en environnement contrôlé connaît une très forte croissance. De plus en plus de producteurs cultivent en serre, dans des conteneurs ou même directement dans des bâtiments. Ce type de culture permet souvent une meilleure productivité, mais est toutefois très énergivore, surtout dans un climat nordique. Au Québec, les coûts de chauffage sont la deuxième plus grande dépense après les salaires et peuvent représenter 30 % des coûts annuels de production (AGÉCO 2011).

Plusieurs guides et conseils ont été mis de l'avant lors de la dernière montée des prix de combustible en 2008 pour réduire la consommation énergétique des serres. (Nature Québec 2010). Des audits énergétiques ont même été réalisés dans plusieurs serres. Toutefois, peu d'analyse a été effectuée sur la quantification des économies attendues et obtenues des différentes mesures proposées et réalisées. L'une des raisons évoquées est l'absence d'outils de simulation permettant une quantification rapide des économies d'énergie (Syndicat des producteurs en serre du Québec 2011). Certaines études offrent une quantification des économies attendues pour des serres en climat nordique (De Zwart 1996, Villeneuve, De Halleux et al. 2005, Gilli, Kempkes et al. 2017, Kempkes, De Zwart et al. 2017). Toutefois, les économies peuvent varier énormément selon le modèle de serre et les aspects économiques sont très rarement abordés dans ces études.

Les logiciels de simulation de la performance énergétique de bâtiment ont connu un développement soutenu dans les dernières années. Certaines études commencent d'ailleurs à utiliser ces logiciels pour l'analyse d'espaces de cultures en environnement contrôlé (Kokogiannakis and Cooper 2015, Ward, Choudhary et al. 2015, Benis, Reinhart et al. 2017, Nadal, Llorach-Massana et al. 2017). Cependant, dans la majorité des cas, ces études n'ont pas fait de calibration des consommations énergétiques de leurs modèles.

Cette étude vise à détailler la calibration d'une serre communautaire de petite taille avec un logiciel de simulation de performance énergétique du bâtiment libre d'accès. Le modèle calibré est utilisé comme un archétype pour le calcul des économies d'énergie et périodes de retour sur l'investissement (PRI) attendues de certaines mesures de conservation de l'énergie (MCE) dans le contexte énergétique québécois.

DESCRIPTION DE LA SERRE

La serre est une construction neuve qui a été mise en service en mars 2017. C'est une serre en arche d'acier de 7.62 m X 15.24 m d'une hauteur de 3.66 m avec une orientation Est-Ouest de sa longueur (Figure 1). La structure est ancrée dans une semelle de béton, mais son plancher (membrane) repose sur de la pierre concassée. Aucune dalle ou isolation n'est présente. Les murs Est et Ouest sont fait de polycarbonate rigide alors que le reste de l'enveloppe est composée de polyéthylène double-parois soufflées à l'air. L'infiltration par l'enveloppe est estimée à 0.6 changement d'air à l'heure (CAH) (ASHRAE 2015). La charge d'éclairage est négligée puisqu'aucun éclairage artificiel n'est installé pour les plantes.

ISBN 978-2-921145-88-6

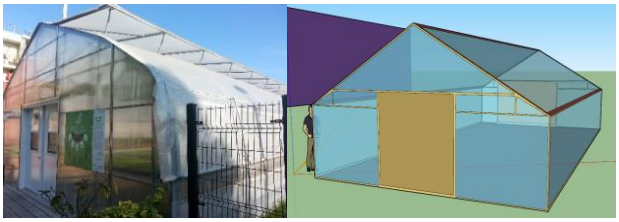

Figure 1: Images de la serre

La serre dispose d'un système de contrôle et de collecte de données en opération depuis le mois d'avril 2017. Les données colligées dans la serre sont principalement la température et l'humidité. Présentement, le système de contrôle maintient la température de la serre selon des consignes en hiver et en été. Les demandes en chauffage sont comblées par un brûleur au gaz naturel d'une capacité de 45 kW. Aucun système de climatisation n'est installé dans la serre; le maintien des conditions intérieures en été se fait par l'ouverture automatisée des fenêtres aux murs Nord et Sud ainsi qu'au toit. Les températures de consignes varient entre 18 °C en chauffage et 25 °C en climatisation.

La densité de culture de la serre récemment inaugurée est assez basse et les charges liées aux plantes sont donc négligées dans cette étude.

CALIBRATION

Dans le cadre de cette étude, le logiciel EnergyPlus (Crawley, Lawrie et al. 2001) avec l'interface utilisateur OpenStudio V2.2 (Guglielmetti, Macumber et al. 2011) sont utilisés. Cette étude utilise la méthodologie proposée par Raftery, Keane et al. (2011), qui est une approche itérative où les modifications apportées au modèle sont effectuées dans un ordre de priorités établies en fonction de la fiabilité des sources utilisées. La liste suggérée des catégories de fiabilité est la suivante : (1) mesure enregistrée; (2) mesure ponctuelle; (3) observation directe (visite du site); (4) entrevue du personnel d'opération; (5) documents d'opération et de maintenance; (6) documents de mise en service (ex : plans tels que construits); (7) études de références et guides des meilleures pratiques; (8) standards et lignes directrices; (9) informations de la phase de conception. Les priorités établies pour les éléments modélisées dans cette étude sont détaillées à l'Annexe A

Le modèle est calibré sur les consommations de chauffage ainsi que sur les températures internes. Les critères des lignes directrices de l'ASHRAE 14-2002 (ASHRAE 2002) stipulent que le modèle est considéré calibré si l'erreur de biais moyenne normalisée (NMBE) et le coefficient de variation de l'erreur moyenne quadratique (CVRMSE) sont respectivement à ±5 % et ±15 % d'écart par rapport aux consommations mensuelles d'une année complète. Les données de consommation de gaz et de températures internes sont de mars 2017 à août 2017, soit depuis la mise en marche de la serre à la réalisation de l'étude. Les données de consommation de gaz sont collectées mensuellement et les températures internes sont collectées toutes les 10 secondes. Les données météo, températures, vents et rayonnement solaire, pour la même période proviennent d'une station météo à proximité (SIMEB 2017).

La serre étudiée est ventilée de façon naturelle, mais ne dispose pas de capteurs de débit. Ainsi, la calibration de la température est effectuée en minimisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des températures simulées et mesurées ainsi qu'en augmentant le degré d'ajustement (goodness of fit G) (Chakraborty and Elzarka 2017).

Ainsi, les paramètres sur lesquels la calibration itérative a été effectuée sont dans l'ordre : (1) la température maintenue dans la serre; (2) la température du sol; 3) les propriétés thermiques des fenêtres (U); et (4) le débit de ventilation naturelle. La Figure 2 représente les consommations mesurées et simulées avant la calibration du modèle. Le CVRMSE et NMBE sont de 53.4 % et 39.7 %, respectivement.

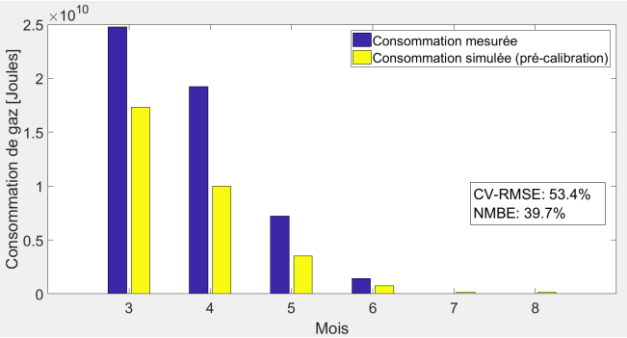

Figure 2: Consommation mensuelle de gaz mesurée et simulée, mars à août 2017

Les modifications effectuées lors de la calibration visent à augmenter la consommation énergétique du modèle puisque cette dernière est inférieure à la réalité.

Température maintenue dans la serre

La température (T_{in}) maintenue dans la serre est contrôlée selon le point de consigne défini dans la séquence de contrôle, soit environ 18 °C de nuit et 18.5 °C de jour. Toutefois, les mesures de température de la serre démontrent que la température maintenue est supérieure à cette valeur (Figure 3).

ISBN 978-2-921145-88-6

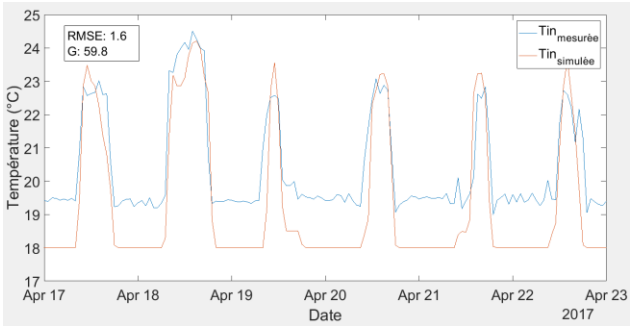

Figure 3: Variation de la température de la serre mesurée et simulée, 17-23/04/2017

Cette variation est liée au surdimensionnement de l'équipement de chauffage au gaz. Dans la serre, le chauffage au gaz fonctionne de façon cyclique avec un temps de fonctionnement de 5 à 10 minutes amenant une augmentation de la température de la serre qui peut atteindre 22 °C. Dans le modèle énergétique, contrairement au fonctionnement réel de l'équipement, le point de consigne est respecté en tout temps. Afin d'identifier le point de consigne permettant de représenter la température de la serre, celui-ci est revu à la hausse de 1 °C et 2 °C (Figure 4). Le Tableau 1 présente les différents indices statistiques obtenus pour ces consignes.

Les modifications du point de consigne permettent une meilleure représentation du point de consigne dans la serre. Lorsque le point de consigne est de 19-19.5 °C, le RMSE est minimisé et le G maximisé. La consommation est toutefois moins bien calibrée avec un CVRMSE et une NMBE plus élevée que pour un point de consigne de 20-20.5 °C. Suite à cette analyse, le point de consigne pour compléter la calibration est tout de même fixé à 19-19.5 °C.

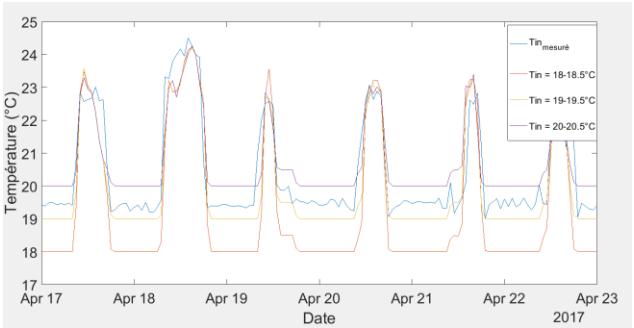

Figure 4: Comparaison de la température de la serre mesurée et simulée selon les points de consignes, 17-23/04/2017

Tableau 1: Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différents points de consigne, mars à août 2017

Version 1	**T_{in} [C°]**		**Consommation de gaz [J]**	
Température de consigne nuit-jour	**RMSE**	**G**	**CVRMSE**	**NMBE**
18-18.5 °C	1.8	54.9	53.4 %	39.7 %
19-19.5 °C	1.7	57.5	40.0 %	28.7 %
20-20.5 °C	1.7	56.7	25.7 %	16.5 %

Température du sol

Quatre méthodes sont actuellement disponibles pour la modélisation du transfert thermique au travers la dalle (ou le plancher sans dalle dans le cas de cette étude) dans le logiciel EnergyPlus pour estimer la température du sol (T_{sol}). Ces méthodes ainsi que leurs avantages sont résumés au Tableau 2.

La méthode par défaut de conduction par le sol, celle du Ground, est retenue pour cette étude puisqu'elle permet de modifier rapidement à la fois la construction du plancher et la température du sol sous la serre directement dans OpenStudio. La documentation d'EnergyPlus recommande d'utiliser une température de 2 °C sous la température de consigne de la zone pour des bâtiments commerciaux (U.S. Department of Energy 2017). Toutefois, il est également spécifié que pour de petits bâtiments commerciaux ou pour des bâtiments résidentiels, la température devrait se situer entre cette température et la température du sol à 0.5 m de profondeur disponible dans les fichiers météos. L'impact de plusieurs températures du sol oscillant entre la température de la serre (T_{in}) et la température à 0.5 m ($T_{0.5m}$) est évalué (Figure 5). Les résultats sont détaillés dans le Tableau 3.

Tableau 2: Comparaison des méthodes de conduction par le sol d'EnergyPlus

Nom	**Dans OS**	**Représentativité**	**Calibration**
FC Factor	Oui	Faible	Facile
Ground	Oui	Moyenne	Facile
Kiva	Non	Bonne	Complexe
Ground domain	Non	Bonne	Complexe

ISBN 978-2-921145-88-6

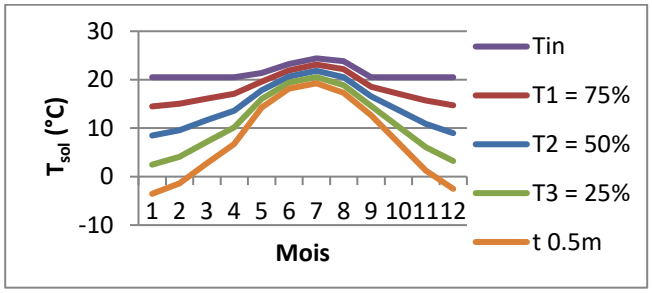

Figure 5: Températures du sol sous le bâtiment évaluées

Tableau 3: Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différentes températures du sol sous le bâtiment, mars à août 2017

Version 2	**T_{in} [C°]**		**Consommation de gaz [J]**	
Scénario	**RMSE**	**G**	**CVRMSE**	**NMBE**
T_{in}	1.7	57.5	40.0 %	28.7 %
2°C sous T_{in}	1.9	52.8	44.7 %	33.6 %
75% entre $T_{0.5m}$ et T_{in} (T1)	1.9	51.7	38.3 %	28.9 %
15% entre $T_{0.5m}$ et T_{in}	1.7	57.0	18.7 %	-3.8 %
$T_{0.5m}$	1.7	57.2	27.1 %	-12.9 %
50% entre $T_{0.5m}$ et T_{in} (T2)	1.8	54.7	23.5 %	16.0 %
25% entre $T_{0.5m}$ et T_{in} (T3)	1.7	56.6	16.2 %	2.1 %
20% entre $T_{0.5m}$ et T_{in}	1.7	56.8	16.9 %	-0.8 %

Pour une température du sol à 25 % entre la température du sol à 0.5 m de profondeur et la température moyenne à l'interne, le RMSE est de 1.7, le G de 56.6 % et le CVRMSE et NMBE de 16.2 % et 2.1 %, respectivement. Pour ces températures du sol, la condensation au sol, problème énoncé par l'opérateur de la serre, est possible. De plus, les températures sous une serre non insolée tendent à se rapprocher de la température extérieure (Nawalany, Bieda et al. 2014). La calibration est poursuivie avec les températures mensuelles T3 (entre 3 °C et 20 °C) pour l'échange par le sol.

Propriétés thermiques des fenêtres

La modification des paramètres physiques de l'enveloppe peut influencer la consommation énergétique de la même façon qu'en modifiant la température du sol. C'est-à-dire qu'il est possible d'augmenter les pertes du modèle en modélisant une moins bonne enveloppe ou une température de sol plus froide. L'approche de calibration veut qu'une fois qu'une modification est effectuée au modèle, il ne devrait pas être possible de revenir à une version précédente. La variation des paramètres de l'enveloppe, les propriétés thermiques des fenêtres, est donc effectuée uniquement pour la température de sol retenue précédemment. Le Tableau 4 résume les indices statistiques pour les différentes configurations testées.

Tableau 4: Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différentes caractéristiques d'enveloppe, mars à août 2017

Version 3	**T_{in} [C°]**		**Consommation de gaz [J]**	
Scénario	**RMSE**	**G**	**CVRMSE**	**NMBE**
4 W/m²°C	1.7	56.6	16.2 %	2.1 %
+5%	1.8	55.2	17.1 %	-0.1 %
-5%	1.7	57.8	15.5 %	4.4 %
-10%	1.6	58.8	15.7 %	6.7 %

Une diminution de 5 % des coefficients globaux de transmission thermique des fenêtres représente respectivement des coefficients de 3.8 W/m²K pour le polyéthylène et de 3.52 W/m²K pour le polycarbonate. Pour ces valeurs, le RMSE et le G de la température sont de 1.7 et de 57.8 et le CVRMSE et NMBE de 15.5 % et 4.4 % respectivement. Cette configuration obtient les meilleurs indices statistiques et la calibration est poursuivie avec ces valeurs de coefficients.

Débit de ventilation naturelle

Plusieurs méthodes sont disponibles pour simuler la ventilation naturelle dans EnergyPlus. La méthode retenue pour cette étude est de fixer un débit de conception pour la ventilation naturelle (ventilation design flow rate). Concrètement, cela revient à modéliser un « équipement » de ventilation naturelle qui assure l'apport d'air extérieur directement dans la zone pour le maintien des conditions. Cette méthode est sélectionnée pour sa simplicité d'utilisation. La différence principale avec les autres méthodes est que le débit de ventilation est un paramètre d'entrée pour cette méthode. Ce débit est ensuite ajusté par des facteurs environnementaux conformément à l'équation (1).

ISBN 978-2-921145-88-6

$$\text{Ventilation} = (V_{design})\,(F_{schedule})[A + B\,|T_{zone} - T_{odb}| + C\,(\text{WindSpeed}) + D(\text{WindSpeed}^2)] \quad (1)$$

Le paramètre A est une constante adimensionnelle fixée par l'utilisateur qui n'est affectée par aucun facteur environnemental. Le paramètre B est le coefficient de température et est influencé par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Les facteurs C et D sont influencés par la vitesse du vent. La documentation d'EnergyPlus suggère des valeurs par défaut de 0.606, 0.03636, 0.1177 et 0 pour les coefficients A, B, C et D respectivement (U.S. Department of Energy 2017). Le paramètre $F_{schedule}$ représente l'horaire d'ouverture des fenêtres. Dans le cas de cette étude, ce paramètre est fixé à 1; les fenêtres s'ouvrent à n'importe quel moment dès que la consigne de climatisation est dépassée. Le débit de conception est estimé lors d'une première itération en calculant le débit au travers les ouvertures à partir des équations de Bernoulli simplifiées (CIBSE 2005). Ce débit est calculé pour chaque ouverture à partir de l'équation (2).

$$q_i = C_{di} A_i S_i \sqrt{\frac{2|\Delta p_i|}{\rho_0}} \quad (2)$$

où C_{di} est le coefficient de décharge de l'ouverture ; A_i est l'aire totale de l'ouverture; S_i est le coefficient du sens du débit (1 ou -1); Δp_i est la différence de pression de l'ouverture; ρ_0 est la densité de l'air au niveau du sol.

La différence de pression est influencée par les hauteurs, les températures et les vitesses des vents. Pour une différence de température de 3 °C avec l'extérieur, une vitesse de vent nulle et un coefficient de décharge de 0.6, le débit maximal qui peut traverser l'ouverture du haut est d'environ 1.5 m³/s soit 17 CAH. Comme la température intérieure simulée est supérieure à la température mesurée, les débits sont augmentés. Le Tableau 5 résume les résultats pour différents débits testés.

Avec une différence de température de 5 à 10°C entre l'intérieur et l'extérieur, un débit de 33.9 CAH est tout à fait possible. De plus, cette valeur est influencée par la vitesse du vent et la température. Le débit moyen simulé lorsque la ventilation est active avec un débit de design de 33.9 CAH est en fait 22.6 CAH. À partir de plus de 33.9 CAH, les écarts sur les températures internes mesurées et simulées commencent à augmenter et le degré d'ajustement des courbes diminue. Le reste de l'étude est donc effectuée avec cette valeur pour la ventilation naturelle. La Figure 6 présente les consommations de gaz mesurées ainsi que celles du modèle initial et calibré.

Tableau 5: Comparaison de la température et de la consommation de gaz mesurée et simulée pour différents débits de ventilation naturelle, mars à août 2017

Version 4	**T_{in} [C°]**		**Consommation de gaz [J]**	
Débits [CAH]	**RMSE**	**G**	**CVRMSE**	**NMBE**
17.0	1.7	57.8	15.5 %	4.4 %
22.6	1.4	64.1	15.5 %	1.7 %
28.3	1.3	66.6	15.1 %	0.2 %
33.9	1.3	66.9	14.7 %	-0.9 %
39.6	1.32	66.3	14.2 %	-2.5 %

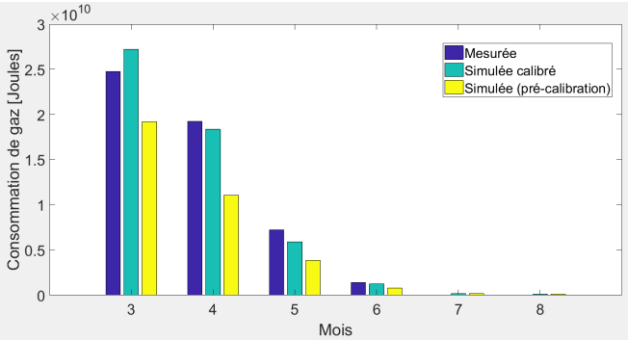

Figure 6: Consommation mensuelle de gaz mesurée et calibrée mars à août 2017

ANALYSE DE COÛTS DES MESURES D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE

L'analyse des coûts sur le cycle de vie des mesures d'économie d'énergie est effectuée avec la valeur actualisée nette. Les coûts des mesures sont principalement pris dans la littérature (Syndicat des producteurs en serre du Québec 2013) ainsi qu'auprès de fournisseurs locaux. Les coûts de main-d'œuvre sont négligés lorsque l'application de la mesure ne requiert pas de compétence spécialisée (ex. l'installation d'isolant). Le taux d'actualisation est calculé à -0,7 % avec un taux d'inflation de 2 % et un taux d'escompte de 1,23 % (Banque du Canada 2018) selon la méthode proposée par ASHRAE (2007). L'analyse considère un coût de base de 3,36 $/GJ du gaz naturel ainsi qu'une augmentation annuelle du coût de l'énergie de 1 % (moyennes sur les 5 dernières années) (Énergir 2018).

Pour ce qui est des mesures d'économie d'énergie dans les serres, ces dernières peuvent être séparées en trois grandes catégories : l'amélioration des systèmes de chauffage, l'amélioration du bâtiment, l'implantation de systèmes de conservation d'énergie ou d'énergies renouvelables.

ISBN 978-2-921145-88-6

Amélioration du système de chauffage

De façon générale, les serres en opération au Québec sont assez âgées et disposent de vieux équipements de chauffage peu efficace (Syndicat des producteurs en serre du Québec 2011). Des économies d'énergie peuvent alors être réalisées simplement en isolant davantage des équipements comme les chaudières et le réseau de distribution de chaleur. Dans le cadre de cette étude, le système de chauffage est assez récent et très efficace (93 %). La distribution est également bonne puisqu'elle est assurée par des ventilateurs de circulation. Aucune mesure de cette catégorie n'est donc traitée dans cette étude.

Amélioration du bâtiment

Les mesures les plus efficaces de cette catégorie sont l'isolation des murs et l'installation de rideaux thermiques. Deux scénarios sont ainsi testés : (1) l'installation de 10 cm de polystyrène extrudé (0.35 RSI/cm) sur le mur Nord recouvert d'un fini réfléchissant et (2) l'installation de rideaux thermiques aux fenêtres du toit, contrôlés selon un horaire et fermés le soir de 20h00 à 4h00. Les caractéristiques des matériaux sont présentées à l'Annexe A.

Ces mesures peuvent cependant avoir un impact sur la productivité puisqu'elles réduisent la quantité de lumière naturelle disponible pour les plantes. Sans analyser l'impact sur la productivité, la réduction de l'ensoleillement au sol est tout de même calculée pour ces mesures en utilisant la radiation solaire absorbée au sol comme métrique.

Systèmes de conservation d'énergie

Les mesures de cette catégorie ne sont pas extensivement analysées dans le cadre de cette étude. Ce sont des mesures qui demandent généralement l'installation d'équipements coûteux et dont la rentabilité n'est pas assurée (De Zwart 1996). Les installations géothermiques ou solaires sont de bons exemples de cette catégorie (Aye, Fuller et al. 2010, Kıyan, Bingöl et al. 2013).

Cette étude fait toutefois l'analyse de deux scénarios de conservation de l'énergie : (1) l'ajout de masse thermique sur le mur nord et (2) l'implantation de la serre sur un toit de bâtiment commercial.

Pour l'ajout d'une masse thermique, la construction du mur Nord est modifiée avec l'ajout de 0.2 m d'argile. Cette épaisseur serait près d'un optimal pour la réduction des écarts journaliers en température (Bastien and Athienitis 2017) et l'argile est dans les matériaux les plus abordables et accessibles.

L'implantation de la serre sur un toit est effectuée sur un bâtiment conforme aux lignes directrices du standard ASHRAE 189.1-2009 (ANSI/ASHRAE/USGBC/IES 2009). La construction d'une serre sur un toit doit se faire conformément au Code Nationale du Bâtiment (CNB) alors que la construction de serre sur sol doit se faire conformément au Code Nationale du Bâtiment Agricole (CNBA). Dans le cadre de cette étude, le modèle calibré ne sera pas modifié pour répondre au CNB. Seulement les coûts de construction additionnels seront considérés dans l'analyse des coûts de cette mesure.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Une consommation annuelle de 500 kWh/m² est estimé pour le modèle calibré et simulé avec des données météos typiques pour Montréal. En moyenne, au Québec, les serres fonctionnant 12 mois par année consomment près de 850 kWh/m² (Proux-Gobeil and Dion 2015). La serre étudiée se trouve donc dans le même ordre de grandeur, mais pourrait être considérée comme une serre assez performante. Deux facteurs peuvent expliquer cet écart avec la moyenne : la taille réduite de la serre (les serres commerciales au Québec ont une superficie moyenne de 2900 m² (Statistique Canada 2016)) ainsi que son type de construction récent (mur double parois).

Le

Tableau 6 présente les économies d'énergie attendues des différentes MCE ainsi que les PRI attendues. Il peut être observé de ces premiers résultats que les mesures avec le retour sur l'investissement le plus rapide sont les mesures générant le moins d'économies, mais nécessitant également moins d'investissement. Avec des hypothèses assez conservatrices sur les coûts, seule l'isolation du mur Nord permettrait un retour sur l'investissement sous les 20 ans. Une analyse plus en détails de chaque mesure est effectuée dans les sections suivantes.

Tableau 6: Analyse des coûts pour les MCE

Mesure	Économies [% kWh]	Investissement [$]	PRI [ans]
Isolation mur Nord	7 %-8 %	537-923	9-16
Rideaux thermiques	13 %-30 %	4872	20-39
Mur de masse	5 %	640-1300	16-28
Serre sur toit	23 %-30 %	5000-76000	20-126

Isolation du mur Nord

L'isolation du mur Nord, tout comme la construction d'un mur de masse, a un impact sur la quantité de lumière transmise aux plantes. Toutefois, cet impact est assez négligeable. En effet, la quantité totale d'énergie solaire

ISBN 978-2-921145-88-6

absorbée au sol ne diminuerait que de 2 % entre le modèle avec un mur opaque et le modèle avec un mur vitré.

L'épaisseur initiale de 10 cm de polystyrène a été utilisée en suivant les recommandations de Dupéré (2004). Toutefois, en coupant de moitié l'épaisseur, les économies demeurent tout de même à 7 % et la PRI descend ainsi à 11 ans. Ainsi, la recommandation est probablement plus adaptée aux serres plus âgées et moins performantes (assez communes au Québec) plutôt qu'au modèle actuellement étudié. Il serait pertinent de revoir ces lignes directrices selon plusieurs modèles de serre.

Rideaux thermiques

L'utilisation de rideaux thermiques est l'une des MCE souvent énumérée dans la littérature. Les économies attendues pour des serres en climat nordique peuvent aller jusqu'à 30 % (Gilli, Kempkes et al. 2017). Le contrôle des rideaux utilisé dans le cadre de cette étude est le plus simple (à modéliser et à utiliser) et non le plus optimal en termes d'économies. Certaines méthodes se basant sur les températures extérieures et la radiation disponible (Gilli, Kempkes et al. 2017) ou encore sur un bilan énergétique (Bastien, Dermardiros et al. 2015) permettraient effectivement plus d'économies, mais ne sont pas intégrées ni dans EnergyPlus ou OpenStudio.

Toutefois, même en considérant une économie de 30 %, cette MCE aurait un retour sur investissement de 20 ans. Cette mesure semble beaucoup plus adaptée à des serres de plus grande superficie (et hauteur) avec une consommation énergétique totale plus élevée.

Masse thermique

Les coûts de cette mesure peuvent grandement diminuer en réutilisant la terre retirée lors de l'aménagement de la semelle de la fondation et en considérant l'auto construction par les propriétaires ou utilisateurs de la serre. En supposant des coûts de 600$ pour les matériaux uniquement (charpente et quincaillerie), cette MCE aurait un retour sur investissement de 16 ans.

L'impact de cette mesure sur la réduction de la consommation énergétique reste toutefois très limité. Ce genre de mesure est plus souvent discuté et analysé dans des serres passives afin d'améliorer les conditions de culture en hiver (Wang, Li et al. 2014, Bastien and Athienitis 2017). Comme la serre étudiée possède un chauffage actif et une ventilation passive, l'impact sur les conditions de culture de cette mesure se fait ressentir en été. Cet impact est toutefois minimal puisque le modèle simulé avec la masse thermique ne permet qu'une diminution moyenne de 0.3 °C de la température en été ainsi qu'une diminution de 0.1 m³/s (3 %) du débit moyen de ventilation naturelle requis.

Construction sur toit

La construction d'une serre sur toit augmente considérablement les coûts de construction. Pour cette raison l'analyse présentée dans cette étude est conservatrice. Elle considère les coûts supplémentaires liés à la modification de la structure de la serre pour permettre une charge de neige au toit 4 fois supérieure (tel que prescrit par le CNB). Sont également inclus les coûts liés à l'emploi de main-d'œuvre spécialisée (détenteurs de carte CCQ) pour la construction en hauteur, ainsi que les coûts de modification de la structure du toit du bâtiment ainsi que de la membrane. La construction sur toit peut ainsi facilement tripler ou quadrupler les coûts de construction d'une serre. Même en ne considérant que les coûts supplémentaires de la main-d'œuvre, la PRI serait de 25 ans, ce qui est plus que la durée de vie de la serre.

Cette analyse ne tient compte que des économies d'énergie du côté de la serre. En additionnant les économies d'énergie générées du côté du bâtiment, la PRI descend à 20 ans. L'intégration d'un espace de culture dans un bâtiment ouvrirait également la porte à d'autres synergies comme la recirculation et l'échange d'air vicié (Ercilla-Montserrat, Izquierdo et al. 2017).

CONCLUSION

Les outils de simulation de la performance énergétique du bâtiment tel qu'OpenStudio permettraient une calibration adéquate d'une serre de petite taille. Les modèles les plus simples de ventilation naturelle et de transfert de chaleur par le sol permettraient une modélisation rapide et assez représentative d'un bâtiment agricole. Le modèle étudié a été calibré avec un CVRMSE et un NMBE de 14.7 % et -0.9 % , respectivement sur la consommation de gaz et un RMSE de 1.3 °C et un G de 66.9 sur la température intérieure de la serre. Ce modèle calibré permet d'évaluer l'impact de différentes MCE. Cette calibration est toutefois incomplète conformément aux lignes directrices de l'ASHRAE 14-2002 (ASHRAE 2002) puisqu'uniquement 6 mois de données étaient disponibles alors qu'il aurait fallu avoir 12 mois de données.

Les résultats et conclusions sont donc à prendre avec parcimonie et l'étude devrait idéalement être refaite sur une année complète.Les MCE souvent analysées dans la littérature visent des serres de grandes superficies et sont peu viables lorsqu'appliquées à une serre de petite taille avec une consommation énergétique moindre. La mesure avec la meilleure PRI pour la serre étudiée est l'isolation du mur Nord avec un PRI variant entre 11 et 16 ans pour 7 % et 8 % d'économie d'énergie respectivement. Une

ISBN 978-2-921145-88-6

catégorisation des archétypes de serres au Québec serait intéressante afin de mieux cibler les mesures les plus appropriées selon le modèle de serre étudié.

Il est à noter que l'analyse économique présentée est des plus conservatrices. Les prix de gaz naturel utilisés dans le cadre de cette étude sont 12 % sous les prix actuels et l'augmentation des prix est fixée à seulement 1 % pour toute l'analyse. Également, elle n'inclut pas l'internalisation des coûts environnementaux via, par exemple, l'achat de crédits carbone. Cet aspect serait à approfondir.

L'ensemble de ces mesures gagneraient cependant à être envisagées avant la construction de nouvelles serres. Cela permettrait notamment de réduire les coûts en matériaux et main-d'œuvre et pourrait faciliter l'accès au financement en annexant les coûts des mesures aux coûts de construction du bâtiment lui-même. Aussi, il serait pertinent d'analyser des mesures plus complexes tels que l'installation de géothermie ou de panneaux solaires.

La viabilité économique ne devrait toutefois pas être l'unique aspect étudié lors de l'analyse ou l'élaboration d'un projet. Il est aussi important de regarder les aspects environnementaux et sociaux. Pons, Nadal et al. (2015) présentent une analyse de l'ensemble de ces aspects dans l'étude de l'intégration d'une serre à un bâtiment. Il serait pertinent de poursuivre l'analyse présentée dans cet article en s'inspirant de leur méthodologie afin d'avoir un portrait plus complet de la durabilité de l'agriculture en environnement contrôlé dans un contexte québécois. En s'inspirant de la méthodologie de Benis, Reinhart et al. (2017), différents bâtiments pourraient être ainsi comparés : les serres intégrées aux bâtiments, les serres sur sol et les espaces de production intérieurs.

Également, pour des espaces de culture où la densité de culture est plus élevée, il serait pertinent de modéliser l'interaction des plantes avec l'environnement. Des travaux commencent à proposer certaines méthodes pour intégrer ces interactions aux logiciels de simulation de la performance de bâtiment (Kokogiannakis and Cooper 2015, Ward, Choudhary et al. 2015). Cela permettra une meilleure calibration et analyse des coûts associés au contrôle de la température et de l'humidité. Il serait aussi intéressant d'intégrer aux outils libres d'accès actuellement utilisés de nouvelles méthodes de contrôle de l'ombrage (Bastien, Dermardiros et al. 2015) ou des méthodes plus avancées de contrôle de la température intérieure (Gilli, Kempkes et al. 2017).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les acteurs du Carrefour alimentaire Centre-Sud et d'AU/LAB, ainsi qu'Énergir et la Ville de Montréal pour avoir partagé l'information nécessaire pour compléter ce projet. Ce projet aurait été impossible sans le soutien reçu via la bourse de recherche du FQRNT.

RÉFÉRENCES

AGÉCO (2011). Portrait québécois et diagnostic de la production de légumes de serre et opportunités de développement, Syndicat des producteurs en serre du Québec.

ANSI/ASHRAE/USGBC/IES (2009). 189.1-2009: Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, ASHRAE.

ASHRAE (2002). ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings.

ASHRAE (2015). ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (SI Edition), ASHRAE.

ASHRAE (2007). 2007 ASHRAE handbook. Heating, ventilating, and air-conditioning applications. Atlanta [NE], ASHRAE.

ASHRAE (2015). ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (SI Edition), ASHRAE.

Aye, L., R. J. Fuller and A. Canal (2010). "Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating." *International Journal of Thermal Sciences 49*(1): 202-208.

Banque du Canada. (2018). "Inflation." Retrieved 02 février, 2018, from https://www.banqueducanada.ca/grandes-fonctions/politique-monetaire/inflation/.

Banque du Canada. (2018). "Taux d'intérêt au Canada et variables clés relatives à la politique monétaire - dix dernières années." Retrieved 02 février, 2018, from https://www.banqueducanada.ca/taux/.

Bastien, D. (2015). Methodology for Enhancing Solar Energy Utilization in Solaria and Greenhouses phd thesis, Concordia University.

Bastien, D. and A. K. Athienitis (2017). "Passive thermal energy storage, part 2: Design methodology for solaria and greenhouses." *Renewable Energy* 103: 537-560.

Bastien, D., V. Dermardiros and A. K. Athienitis (2015). "Development of a new control strategy for improving the operation of multiple shades in a solarium." *Solar Energy* 122.

Benis, K., C. Reinhart and P. Ferrao (2017). "Development of a simulation-based decision support

ISBN 978-2-921145-88-6

workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts." Journal of Cleaner Production 147: 589-602.

Chakraborty, D. and H. Elzarka (2017). "Performance testing of energy models: are we using the right statistical metrics?" Journal of Building Performance Simulation: 1-16.

CIBSE (2005). Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings - CIBSE Applications Manual AM10, CIBSE.

Crawley, D. B., L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte and J. Glazer (2001). "EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program." *Energy and Buildings* 33(4): 319-331.

De Zwart, H. (1996). Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model, Wageningen.

Dupéré, R. (2004). "Les économies d'énergies: Partie 1 - Sachez isoler." *Bulletin d'information Réseau d'avertissement phytosanitaire Cultures en serres* (No 3).

Énergir. (2018). "Le prix du gaz naturel et son historique." Retrieved 02 février, 2018, from https://www.energir.com/fr/grandes-entreprises/prix-du-gaz-naturel/prix-et-historique/.

Ercilla-Montserrat, M., R. Izquierdo, J. Belmonte, J. I. Montero, P. Muñoz, C. De Linares and J. Rieradevall (2017). "Building-integrated agriculture: A first assessment of aerobiological air quality in rooftop greenhouses (i-RTGs)." *Science of the Total Environment* 598: 109-120.

Gilli, C., F. Kempkes, P. Munoz, J. I. Montero, F. Giuffrida, F. J. Baptista, A. Stepowska and C. Stanghellini (2017). Potential of different energy saving strategies in heated greenhouse. *Acta Horticulturae*. 1164: 467-474.

Guglielmetti, R., D. Macumber and N. Long (2011). Openstudio: An open source integrated analysis platform. *12th Conference of IBPSA Building Simulation 2011*, BS 2011, November 14, 2011 - November 16, 2011, Sydney, NSW, Australia, IBPSA.

Kempkes, F., H. F. De Zwart, P. Munoz, J. I. Montero, F. J. Baptista, F. Giuffrida, C. Gilli, A. Stepowska and C. Stanghellini (2017). Heating and dehumidification in production greenhouses at northern latitudes: Energy use. *Acta Horticulturae*. Y. Tuzel and G. B. Ozetkin, International Society for Horticultural Science. 1164: 445-452.

Kıyan, M., E. Bingöl, M. Melikoğlu and A. Albostan (2013). "Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink." *Energy Conversion and Management* 72: 147-155.

Kokogiannakis, G. and P. Cooper (2015). Evaluating the environmental performance of indoor plants in buildings. *14th Conference of IBPSA, BS 2015, Hyderabad, India, IBPSA*.

Nadal, A., P. Llorach-Massana, E. Cuerva, E. López-Capel, J. I. Montero, A. Josa, J. Rieradevall and M. Royapoor (2017). "Building-integrated rooftop greenhouses: An energy and environmental assessment in the mediterranean context." *Applied Energy* 187(Supplement C): 338-351.

Nature Québec (2010). Références en efficacité énergétique - L'énergie à la ferme: une question à réfléchir, des GES à réduire! Agriréseau.

Nawalany, G., W. Bieda, J. Radoń and P. Herbut (2014). "Experimental study on development of thermal conditions in ground beneath a greenhouse." *Energy and Buildings* 69(Supplement C): 103-111.

Pons, O., A. Nadal, E. Sanyé-Mengual, P. Llorach-Massana, E. Cuerva, D. Sanjuan-Delmàs, P. Muñoz, J. Oliver-Solà, C. Planas and M. R. Rovira (2015). "Roofs of the Future: Rooftop Greenhouses to Improve Buildings Metabolism." *Procedia Engineering* 123: 441-448.

Proux-Gobeil, G. and L.-M. Dion (2015). Évaluation du chauffage à l'électricité pour les serres. Journée provinciale en serriculture, St-Rémi, Québec, CRAAQ.

Raftery, P., M. Keane and J. O'Donnell (2011). "Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology." *Energy and Buildings* 43(9): 2356-2364.

SIMEB. (2017). "Fichiers météo pour le Québec." Retrieved septembre, 2017, from https://www.simeb.ca:8443/index_fr.jsp.

Statistique Canada (2016). Tableau 001-0046: estimation de la superficie totale des serres et mois d'exploitation, annuel. CANSIM.

Syndicat des producteurs en serre du Québec (2011). Rapport final Projet-pilote en serriculture. B. d. l. e. e. d. l. i. énergétiques, Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques.

Syndicat des producteurs en serre du Québec (2013). La serriculture sur les toits en milieu urbain - Perspectives de développement dans le contexte Québécois.

ISBN 978-2-921145-88-6

U.S. Department of Energy (2017). EnergyPlus™ Version 8.8.0 Documentation.

Villeneuve, J., D. De Halleux, A. Gosselin and D. Amar (2005). Concept of dynamic liquid foam insulation for greenhouse insulation and the assessment of its energy consumption and agronomic performances. *Acta Horticulturae*. G. van Straten, G. P. A. Bot, W. T. M. van Meurs and L. M. F. Marcelis. 691: 605-610.

Wang, J., S. Li, S. Guo, C. Ma, J. Wang and S. Jin (2014). "Simulation and optimization of solar greenhouses in Northern Jiangsu Province of China." *Energy and Buildings* 78: 143-152.

Ward, R., R. Choudhary, C. Cundy, G. Johnson and A. McRobie (2015). Simulation of plants in buildings; incorporating plant-Air interactions in building energy simulation. *14th Conference of IBPSA*, BS 2015, December 7, 2015 - December 9, 2015, Hyderabad, India, IBPSA.

ANNEXE A

Paramètre	Valeur	Source	Priorité
Zone			
Consigne hiver	18.5°C	Opérateur	4
Consigne été	24°C	Opérateur	4
T_{in}	Variable [°C]	Mesurée	1
$T_{extérieur}$	Variable [°C]	Enregistrée (ville de MTL)	1
T_{sol}	16°C	Document E+	8
Constructions			
Polyéthylène double parois			
U	4 W/m²	ASHRAE (2015)	8
VT	88%	Bastien (2015)	8
SHGC	0.8		8
WWR	95%	Plans	6
Polycarbonate			
U	3.7 W/m²	ASHRAE (2015)	8
VT	79%	Bastien (2015)	8
SHGC	0.81	Données manufacturier	6
WWR	95%	Plans	6
Structure d'acier			
Épaisseur	3 mm	Plans	6
Conductivité	45W/m K	BCL	8
Densité	7680 kg/m³	BCL	8
Chaleur spécifique	418.4 J/kg K	BCL	8
Absorption solaire/visible /thermique	0.6/0.6/0.9	BCL	8
Polystyrène extrudé 10 cm (Mur nord isolé)			
Épaisseur	101.6 mm		
Conductivité	0.029 W/m K		
Densité	29 kg/m³ K		
Chaleur spécifique	1210 J/kg K		
Absorption solaire/visible/thermique	0.1/0.1/0.1		
Rideau thermique			
Épaisseur	50 mm		
Conductivité	0.05 W/m K		
Transmitivité thermique	0.1		
Plancher en résine			
R	0.1 m²K/W	BCL	8
Absorption solaire/visible /thermique	0.9/0.8/0.8	BCL	8
Systèmes CVCA			
Bruleur au gaz			
Puissance	45.43 kW	Documents d'opération	5
Efficacité	93%	Documents d'opération	5
Ventilation naturelle			
Débit	1.5 m³/s	CIBSE (2005)	8

ISBN 978-2-921145-88-6