eSim 2018
«BUILDING SIMULATION TO SUPPORT BUILDING SUSTAINABILITY»
IBPSA Canada
The Canadian Chapter of the International Building Performance Simulation Association
Le chapitre canadien de International Building Performance Simulation Association

Impact des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégré au bâtiment : Implantation d'un modèle de plantes

Marie-Hélène Talbot[1], Danielle Monfet[1]
[1] École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada

Résumé : *Lors de la modélisation d'un espace d'agriculture, l'impact des plantes est généralement négligé. Or, ces gains internes complexes peuvent avoir un impact significatif sur les charges sensibles et latentes de l'espace. Ce travail aura pour objectif d'évaluer l'impact des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégré au bâtiment (eAIB) lorsque le modèle de bâtiment considère les plantes comme gain interne sensible et latent. Sous le logiciel de modélisation TRNSYS, ce modèle est développé puis couplé à un modèle de plantes. L'impact des plantes est évalué selon une étude portant sur la densité de culture, l'intensité d'éclairage et le débit de ventilation. Les résultats démontrent que l'impact des plantes sur les charges de l'eAIB étudié ne peut être négligé lors de la conception des systèmes mécaniques. Ce travail présente le comportement énergétique d'un modèle de plantes et ses limites lorsqu'il est soumis à différents scénarios.*

Mots clés: *modèle de plantes, charges du bâtiment, espace d'agriculture intégrée au bâtiment, bilan thermique*

INTRODUCTION

L'intégration d'espace d'agriculture à un bâtiment est un concept (Caplow et Nelkin, 2007) qui fait partie du lot de solutions proposé par l'agriculture urbaine. Ce concept consiste à dédier un espace du bâtiment à l'agriculture, comme un toit ou une pièce. Pour concevoir un espace d'agriculture intégré au bâtiment (eAIB), la modélisation du bâtiment est nécessaire. Cependant, les logiciels de modélisation de bâtiment comme EnergyPlus et TRNSYS n'offrent pas encore de solution intégrée pour insérer des plantes dans un bâtiment à titre de gains internes. L'apport des plantes comme gains internes est donc négligé dans la plupart des cas (Sethi et al., 2013). Or, dans un eAIB ces gains internes ne sont pas nécessairement négligeables ni prévisibles, c'est pourquoi il est important d'identifier et de quantifier les impacts des plantes au sein d'un eAIB.

L'objectif de cette étude vise à observer l'impact sensible et latent d'un modèle de plantes sur les charges d'un eAIB intérieur (eAIB-I).

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Pour assurer l'intégration d'un modèle de plantes à un outil de modélisation et assurer la conception adéquate d'un eAIB-I, cette section présente les différents modèles de plantes développés ainsi que les paramètres environnementaux à maintenir.

Aperçu des modèles de plantes

Lorsqu'un bâtiment dédié à l'agriculture est modélisé, tel qu'une serre, l'impact des plantes sur les gains internes est généralement négligé par leur complexité. Dans les dernières années, différents auteurs (Benis, Reinhart et Ferrão, 2017b; Graamans et al., 2017; Kokogiannakis et Cooper, 2015; Ward et al., 2015) ont proposé des modèles de plantes en culture hydroponique qui s'intègre à un modèle de bâtiment. Le Tableau 1 présente un aperçu des différents modèles proposés.

Un bilan d'énergie entre la plante et son environnement est effectué (Figure 1) à l'aide de l'équation 1, où une partie des radiations solaires transmises par les fenêtres et celles des lampes est absorbée (q_{rad_abs}) par la plante puis redistribuée en différents flux énergétiques.

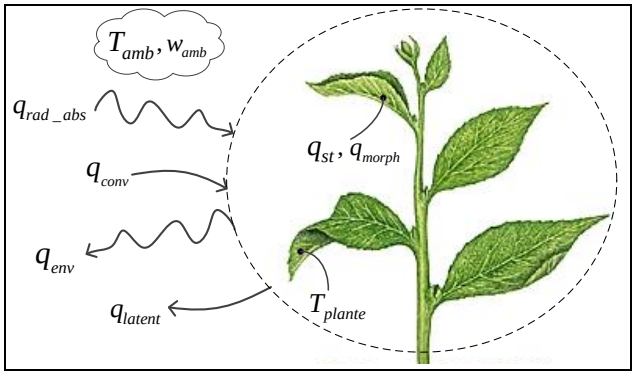

Figure 1: Bilan d'énergie de la plante

$$q_{rad_abs} = q_{morph} + q_{st} + q_{lat} + q_{env} + q_{conv} \qquad (1)$$

ISBN 978-2-921145-88-6

Tableau 1 : Comparaison des modèles de plantes développés

	Modèle de Ward (2015)	**Modèle de Kokogiannakis (2015)**	**Modèle de Benis (2017)**	**Modèle de Graamans (2017)**
Plante cultivée	Tomate	Non-spécifique	Tomate	Laitue
Type(s) d'espace d'agriculture	Serre	Serre	Serre, serre au toit, serre intégrée, eAIB-I	Espace d'agriculture à haute densité en environnement contrôlé
Logiciel	TRNSYS	ESP-r	EnergyPlus	MATLAB
Objectif de recherche	Développer un modèle de plantes autonome et évaluer l'impact des plantes au sein d'une serre.	Développer un modèle de plantes versatile qui s'intègre à un modèle de bâtiment.	Évaluer le potentiel de réchauffement global (PRG) de différents types d'eAIB.	Valider à l'aide de données expérimentales un modèle de plantes simple en régime permanent pour différents scénarios.
Modèles de flux d'énergie				
Lumière absorbée (q_{rad_abs})	$f(q_{rad_soleil}, q_{rad_{lampes}}, LAI, k_l)$ (De Zwart, 1996)	$f(q_{rad_soleil}, \alpha_{pl})$	Valeur expérimentale	$f(q_{rad_lampes}, \alpha_{pl})$
Radiations infrarouges (q_{env})	$f(T_{pl}, T_{ciel})$	-	-	-
Convection (q_{conv})	$f(T_{pl}, LAI, T_{amb}, U_\infty)$	$f(h_{conv}, T_{pl}, T_{amb}, vpd)$	-	$f(LAI, T_{pl}, T_{amb}, r_a)$ (Monteith, 1965)
Latent (q_{lat})	$f(r_{st}, LAI, vpd)$ (Jolliet, 1994)	$f(q_{rad_soleil}, r_{st}, r_a, T_{amb})$ Peinman-Monteith model (Monteith, 1965)	$f(r_{st}, LAI, vpd)$ (Stanghellini, 1987)	$f(q_{rad_soleil}, r_{st}, r_a, T_{amb})$ Peinman-Monteith model (Monteith, 1965)
Stocké (q_{st})	✓	✓	-	-
Sous-modèles				
Résistance stomatique (r_{st})	$f(vpd, q_{rad_abs}, T_{pl}, [CO_2])$ (Stanghellini, 1996)	$f(q_{rad_abs}, T_{amb}, vpd)$ (équation dérivée de Jarvis (1976))	$f(LAI)$ (Pamungkas, Hatou et Morimoto, 2014)	$f(q_{rad_abs})$ (équation dérivée de Wang et al. (2016))
Résistance aérodynamique de la couche limite (r_a)	-	$f(U_\infty)$ (Thom et Oliver, 1977)	$f(U_\infty)$ (Pamungkas, Hatou et Morimoto, 2014)	$f(U_\infty, LAI)$ (Fuchs, 1993)
Calculs complémentaires				
Bilan de masse du CO_2	✓	-	-	-
Bilan de masse de l'eau	✓	Non-intégré	Non-intégré	Non-intégré
Modèle de croissance	✓ (Vanthoor et al., 2011)	-	✓ (Vanthoor et al., 2011)	Valeur expérimentale

ISBN 978-2-921145-88-6

Une partie de la radiation solaire absorbée (q_{rad_abs}) est utilisée pour permettre la photosynthèse de la plante (q_{morph}), ce qui engendre de la transpiration. Cela se traduit en un rejet d'énergie latente vers l'environnement (q_{latent}) et un effet de refroidissement des plantes par convection (q_{conv}). Une autre partie est stockée par inertie thermique au sein de la plante (q_{st}). Un flux d'énergie radiative infrarouge existe aussi entre la plante et son environnement (q_{env}).

Pour modéliser les flux, différents modèles développés et validés en horticulture sont utilisés tels que détaillés dans le Tableau 1. Alors que tous les auteurs ont négligé l'énergie utile au développement (q_{morph}), l'énergie stockée (q_{st}) et échangée avec l'environnement par radiation infrarouge (q_{env}) sont négligés par certains auteurs seulement.

D'ailleurs, puisque les interactions des plantes avec l'air sont multifactorielles, différents niveaux de complexité peuvent être considérés. Le modèle de Ward (2015), par exemple, est très dynamique avec de nombreuses variables et a permis de faire des simulations au sein d'une serre semi-contrôlée. Inversement, le modèle de Graamans et al. (2017) est en régime permanent et a utilisé des modèles moins complexes. Ce modèle a été validé expérimentalement dans le cadre d'une étude d'un eAIB-I, ce qui convient à une simulation en régime permanent.

Pour développer un outil versatile et performant, le modèle autonome de Ward (2015) portant sur les tomates sera celui utilisé et adapté pour évaluer l'impact des plantes sur les charges d'un eAIB-I.

Paramètres environnementaux

Un eAIB-I est un espace situé à l'intérieur d'un bâtiment dédié à l'agriculture sous éclairage artificiel dont toutes les conditions intérieures (température, humidité, éclairage et concentration en CO_2) sont contrôlées afin de favoriser la productivité agricole.

Température

Il existe pour chaque plante deux intervalles de température recommandés afin d'optimiser l'activité végétale lors de la photopériode et lors de la période obscure. Par exemple, pour les tomates, ces intervalles sont de 16-30°C et de 13-18°C, respectivement (Castilla, 2013).

Humidité

Il est optimal de maintenir l'humidité relative entre 60 % et 90 % (Kittas et al., 2013) afin de limiter la transpiration et la prolifération de champignons.

Éclairage

Dans une eAIB-I, les plantes sont superposées à l'intérieur d'étagères illuminées par un éclairage de type DEL (Figure 2b). Ce type d'éclairage permet de placer les lampes près des plantes sans les brûler, car les pertes thermiques radiatives des lampes DEL sont négligeables. D'autre part, les lampes artificielles sont généralement activées selon un horaire adapté à la photosynthèse des plantes. Il s'agit de la photopériode et elle est spécifique à chaque espèce de plante. Lors de la période obscure, les plantes respirent, un phénomène tout aussi nécessaire à leur développement. Dans le cas des tomates, une photopériode de 16-20h (Dorais, 2003) sous lumière artificielle est recommandée.

CO_2

Les plantes consomment le CO_2 par la photosynthèse et afin d'assurer une activité végétale maximale, la concentration en CO_2 doit être maximisée. En agriculture en environnement contrôlé, le taux de CO_2 est généralement maintenu par un système d'enrichissement au CO_2 à 1000 ppm (Kozai, Niu et Takagaki, 2015) afin de favoriser la photosynthèse. Le taux de changement d'air par ventilation et par infiltration sont réduits au minimum, entre 0,01h^{-1} et 0,02 h^{-1}, afin d'éviter la dilution du CO_2 injecté (Kozai, Niu et Takagaki, 2015).

De plus, afin de maximiser l'absorption du CO_2, des ventilateurs maintenant une vitesse d'écoulement d'air sur les plantes d'environ 0,5 m/s (ASHRAE, 2011) sont utilisés. Ces ventilateurs servent également à réduire les risques de moisissures.

ÉTUDE DE CAS

Cette étude porte sur un bâtiment industriel de 877 m^2 revalorisé à des fins communautaires à Montréal. Construit en 1946, le bâtiment a un taux d'infiltration estimé à 3,05 $l \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ (Bell, 2000) selon la superficie des murs extérieurs et la résistance thermique des murs est faible (RSI = 0,89 $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$). Autrefois utilisé comme entrepôt, le bâtiment sera converti en pôle alimentaire à multiples usages. Ceux-ci incluent une salle polyvalente, une cuisine industrielle, un entrepôt et des espaces d'agriculture (Figure 2a). La répartition des espaces permet de déterminer les débits de ventilation minimaux selon la norme ASHRAE 62-2010 (ASHRAE, 2010). D'autre part, des horaires d'occupation standards sont pris en compte. Enfin, la densité d'éclairage du bâtiment est estimée à 5 $W \cdot m^{-2}$.

ISBN 978-2-921145-88-6

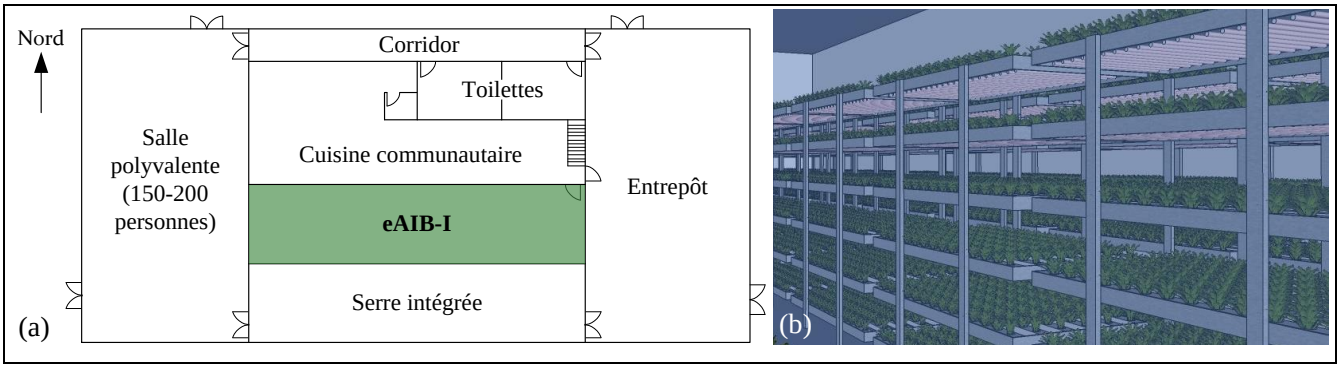

Figure 2: (a) Répartition des espaces dans le bâtiment et (b) vue intérieure de l'eAIB-I

L'espace étudié est l'eAIB-I, un espace de 110,55 m^2 d'une hauteur de 5,3 m. Puisque les gains internes des plantes sont complexes, l'eAIB-I permet de bien évaluer l'interaction des plantes avec l'environnement. Son environnement est contrôlé et ses charges thermiques ne fluctuent pas beaucoup puisque les échanges thermiques avec l'extérieur sont limités. De plus, dans le cas étudié, le revêtement intérieur prévu dans l'eAIB-I est hydrofuge afin d'assurer l'intégrité de l'enveloppe. En effet, puisqu'il s'agit d'un espace très humide, ce type de revêtement permet de retenir l'humidité dans l'espace et d'éviter la migration de vapeur d'eau au travers de l'enveloppe. Les paramètres de modélisation utilisés dans cette étude sont la densité de culture, le type et l'intensité d'éclairage, le taux de ventilation, la vitesse d'écoulement de l'air et les points de consigne pour la culture de tomates.

Densité de culture

La densité de culture permet d'observer l'impact des plantes dans un si grand espace selon une fraction cultivée calculée selon l'équation 3.

$$Fraction\ cultivée\ = \frac{Aire_{cultivée}}{Aire_{eAIB-I}} \qquad (3)$$

Une valeur de 100 % estime qu'il n'y a qu'un seul étage de tomates. Pour le modèle de référence, la fraction cultivée est de 100 %.

Type et intensité d'éclairage

L'éclairage testé est de type DEL. Contrairement aux lampes au sodium, les pertes thermiques sont principalement convectives. Lorsque modélisées, les pertes convectives sont considérées comme instantanées, ce qui permet de mieux évaluer l'impact des plantes. D'autre part, afin d'assurer une activité végétale suffisante, des lampes DEL de grande puissance seront considérées pour le modèle de référence. Cela correspond à une intensité d'éclairage de 480 W/m^2 dont l'efficacité est de 25 %.

Ventilation

Dans cette étude, il n'y a pas de système d'enrichissement intégré au modèle de plantes. La concentration de CO_2 est donc maintenue par un renouvellement d'air suffisant à une valeur maximum d'environ 400 ppm (ESRL, 2018) aux conditions standards, ce qui correspond à la concentration en CO_2 de l'air extérieur. Pour le modèle de référence, le débit de ventilation est de 1 h^{-1}.

Vitesse d'écoulement d'air

Bien que la vitesse d'écoulement recommandé est d'environ de 0,5 m/s (ASHRAE, 2011), la valeur par défaut de 0,3 m/s du modèle de plantes de Ward et al. (2015) est celle utilisée.

Points de consigne

En chauffage et en climatisation, un seul point de consigne sera utilisé, soit 21°C. L'intervalle de température de confort des plantes est plus large que celui des humains, mais puisque l'objectif de cette étude est d'observer l'impact des plantes, ce paramètre demeure constant.

Le taux d'humidité dans l'espace est aussi maintenu à une valeur constante de 75 % d'humidité relative. Cela correspond à une humidité absolue de 0,0117 kg d'eau/kg d'air sec.

APPROCHE DE SIMULATION

Afin d'observer l'impact des plantes au sein d'un eAIB-I, le modèle du bâtiment a été développé à l'aide de TRNBuild puis couplé à un modèle de plantes. Les charges considérées pour l'eAIB-I sont la ventilation, l'éclairage et les plantes. Les gains internes des équipements, tels que ceux des pompes du système hydroponique, sont négligés.

ISBN 978-2-921145-88-6

Le modèle de plantes utilisé est celui de Ward et al. (2015). Celui-ci est composé d'un bilan thermique, d'eau, de CO_2 ainsi que d'un modèle de croissance spécifique à la tomate (Vanthoor et al., 2011). Le modèle de croissance consiste à résoudre un bilan de carbone. De ce bilan, la valeur de LAI (*Leaf Area Index*) est recalculée à chaque pas de temps. Il s'agit du ratio de la superficie de feuilles sur la superficie cultivée.

Afin d'évaluer l'impact du modèle de plantes sur la charge latente de l'eAIB-I, le modèle de plantes a été modifié afin de transférer au modèle de bâtiment le gain latent en plus du gain convectif. En effet, initialement, le bilan d'eau au sein de l'eAIB-I et des plantes était résolu par le modèle de plantes. Le modèle de plantes a été modifié afin le bilan d'eau qui consistait à calculer l'humidité ambiante soit calculé par TRNBuild.

À chaque pas de temps, le modèle de plantes modifié et de bâtiment interagissent jusqu'à convergence des résultats (Figure 3).

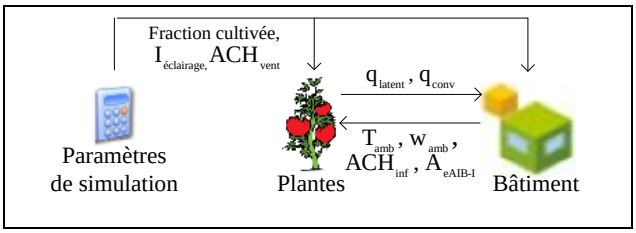

Figure 3: Interactions entre les modèles

Un problème de discrétisation numérique au sein du modèle de plantes a été noté; conséquemment, un pas de temps d'un par seconde est donc imposé afin que les modèles soient en mesure de converger vers une solution.

Différents scénarios sont effectués afin d'évaluer l'impact de l'intégration d'un modèle de plantes sur les charges d'une eAIB-I. Une analyse paramétrique est complétée sur la charge de chauffage et de refroidissement pour deux journées ayant les conditions extérieures présentées à la Figure 4.

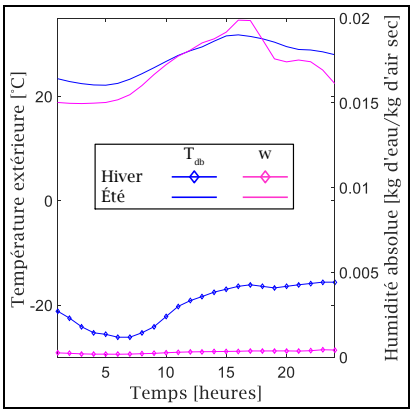

Figure 4: Conditions extérieures (température bulbe sec et humidité absolue) pour une journée d'hiver et d'été typique

Trois paramètres seront testés sur le modèle de référence afin d'évaluer leur influence sur les charges de chauffage et de refroidissement de l'eAIB-I :

1) La densité de culture sera étudiée pour différente fraction cultivée, soit 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % et 200 %. Lorsque la fraction cultivée est de 200 %, cela représente un eAIB-I composé de deux étagères.
2) L'intensité de l'éclairage artificiel sera étudiée pour des valeurs de 160 W/m^2, 320 W/m^2 et 480 W/m^2. Cela correspond à des lampes DEL de puissance faible, moyenne et élevée. Une intensité d'éclairage de 0 W/m^2 sera également évaluée afin d'observer le comportement des plantes lorsqu'elles sont dans l'obscurité.
3) Le débit de ventilation sera étudié pour différents taux de renouvellement, soit 0,5 h^{-1}, 1 h^{-1}, 1,5 h^{-1}, 2 h^{-1}, 3 h^{-1} et 5h^{-1}. Les valeurs ont été choisies à titre exploratoire, car ils n'existent pas de lignes directrices pour le contexte étudié.

RÉSULTATS

Les résultats de l'analyse paramétrique sont présentés afin d'évaluer l'impact des plantes sur les charges de l'eAIB-I. Les charges de chauffage et d'humification sont positives alors que les charges de refroidissement et de déshumidication sont négatives.

Densité de culture

L'impact de la densité de culture est évalué pour différents scénarios. Or, la densité de culture est indissociable de la puissance totale fournie par les lampes DEL et le gain convectif induit par l'éclairage est proportionnel à la densité de culture.

ISBN 978-2-921145-88-6

En hiver, avec l'augmentation de la densité de culture, une diminution de la charge de chauffage puis une augmentation de la charge de refroidissement sont observées (Figure 5a).

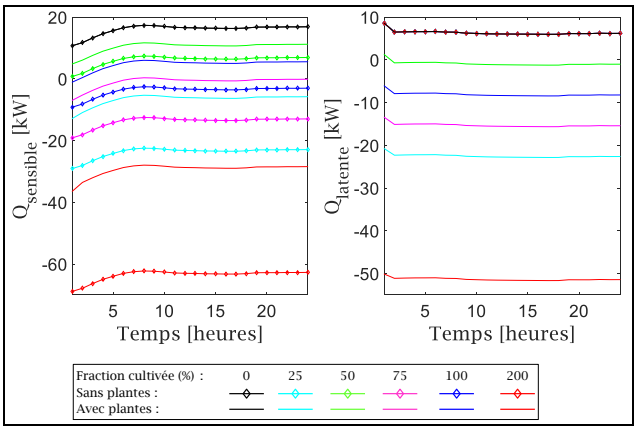

Figure 5 : Impact de la densité de culture sur les charges (a) sensibles et (b) latentes de chauffage de l'eAIB-I

Cela est expliqué par le gain sensible induit par l'éclairage, mais celui-ci est retranché de 43% par l'intégration de plantes dans les conditions étudiées. En effet, les plantes atténuent l'impact des DEL, car elles ont un effet de refroidissement (Graamans et al., 2017). Lors de la photosynthèse, les plantes transpirent et abaissent leur température, ce qui crée un effet de refroidissement au sein de l'eAIB-I. Dans les conditions étudiées, la température des plantes s'abaisse d'environ 1°C par rapport à la température ambiante.

Puisque l'air extérieur en hiver est sec, l'air d'alimentation de l'eAIB-I doit être humidifié jusqu'au point de consigne. Avec l'augmentation de la superficie cultivée, une diminution de la charge d'humidification puis une augmentation de la charge de déshumidification sont observées (Figure 5b). Cette importante charge latente est causée par la transpiration des plantes.

En été, avec l'augmentation de la fraction cultivée, une augmentation de la charge de refroidissement est observée telle que présentée à la Figure 6a.

Lorsque la fraction cultivée est de 200 %, la charge de refroidissement causée par l'éclairage est alors 52 fois plus élevée qu'à 0 % et est diminué de 43% par l'effet de refroidissement des plantes. Ce gain de chaleur causé par l'éclairage artificiel a également été identifié comme étant problématique par Benis, Reinhart et Ferrão (2017a) en climat chaud, car cela augmente le potentiel de réchauffement global de ce type d'eAIB. Or, ils existent des techniques de pulsation de lampe DEL (Yeh et Chung, 2009) qui pourrait être en mesure de réduire la charge de l'éclairage sans compromettre l'activité végétale.

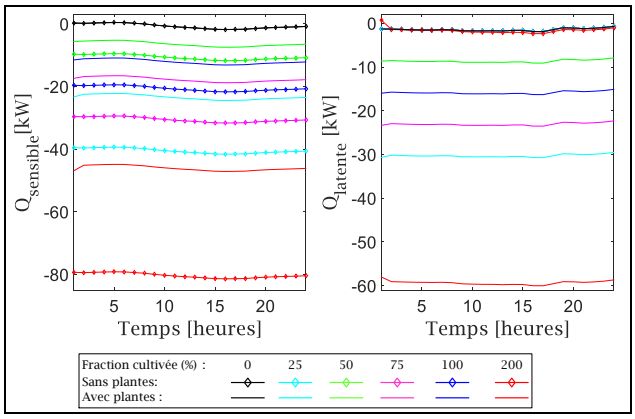

Figure 6 : Impact de la densité de culture sur les charges (a) sensibles et (b) latentes de refroidissement de l'eAIB-I

En été, puisque l'air est humide, l'air d'alimentation doit être déshumidifié. Avec l'augmentation de la fraction cultivée, la charge de déshumidification augmente de la même façon qu'en hiver (Figure 6b). Lorsque la fraction cultivée est de 200 %, la charge de déshumidification est alors 31 fois plus élevée qu'à 0 %.

Éclairage

Lorsque la densité de culture est de 100 %, la diminution de l'intensité de l'éclairage entraine un ralentissement de l'activité végétale. Cela diminue la charge de déshumidification et augmente la charge de chauffage de l'eAIB-I (Figure 7).

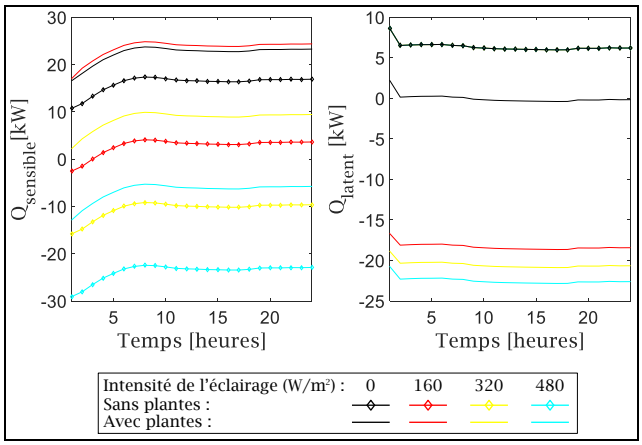

Figure 7 : Impact de l'intensité d'éclairage sur les charges (a) sensibles et (b) latentes de chauffage de l'eAIB-I

ISBN 978-2-921145-88-6

En effet, lorsque l'intensité d'éclairage est minimale, l'effet de refroidissement des plantes est élevé et plus important que les gains d'éclairage, ce qui induit une augmentation de 45 % de la charge de chauffage par rapport au cas sans plantes ni éclairage.

Alors que les autres conditions affectant l'activité végétale sont constantes (température et humidité ambiante, taux de CO_2, LAI), les gains thermiques associés aux plantes varient selon l'intensité de l'éclairage (Tableau 2). Les résultats permettent d'établir que lorsque l'intensité de l'éclairage augmente, l'énergie émise par transpiration augmente alors que l'effet de refroidissement des plantes diminue. Cette tendance peut également être observée dans les résultats obtenus par Graamans et al. (2017) pour le cas de laitues.

Tableau 2 : Gains latents et sensibles des plantes selon l'intensité de l'éclairage

	Intensité de l'éclairage [W/m²]			
	0	**160**	**320**	**480**
Gains latents [W/m²]	58	223	243	261
Gains sensibles [W/m²]	-58	-188	-173	-155

Lorsqu'il n'y a pas d'éclairage, l'activité végétale se modifie : la photosynthèse n'est plus possible et il y a seulement respiration. Selon les résultats de simulation, l'effet de refroidissement est alors égal à l'effet d'humidification des plantes (Tableau 2). En se référant à l'équation 1, il s'agit d'un résultat attendu car il n'y a pas de flux radiatif solaire (q_{rad_abs}), le flux radiatif infrarouge avec l'environnement (q_{env}) est faible et que l'énergie stockée (q_{st}) dans les plantes est faible. De plus, la Figure 7 montre que lorsque les plantes sont en période obscure, elles génèrent une augmentation de la charge de chauffage de 38 % par rapport au cas sans plantes. En été, cet effet de refroidissement pourrait être mis à contribution. En effet, les périodes obscures d'environ 8 heures pourraient être planifiées aux moments où la charge de refroidissement est maximale.

Les résultats obtenus pourraient permettre de conclure qu'en été ou en climat chaud, il est préférable de sélectionner une intensité d'éclairage qui limite les charges de refroidissement et favorise l'effet de refroidissement des plantes. Cependant, cela induirait une baisse de la productivité agricole, un facteur important qui doit aussi être considérée lors de la conception d'un eAIB.

Ventilation

En hiver, lorsque l'intensité d'éclairage est maximale et que la densité de culture est de 100 %, l'augmentation du nombre de changement d'air à l'heure permet de diminuer la charge de déshumidification induite par l'activité végétale puisque l'air extérieur est sec. D'autre part, cela entraine une augmentation de la charge de chauffage (*Figure 8*).

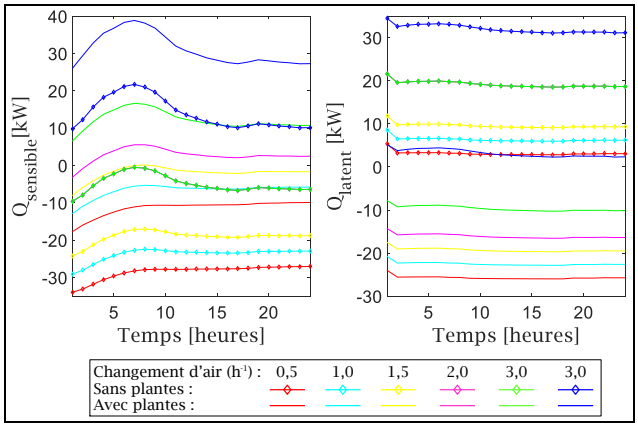

Figure 8 : Impact du débit de ventilation sur les charges (a) sensibles et (b) latentes de chauffage de l'eAIB-I

En été, l'augmentation du nombre de changement d'air à l'heure augmente la charge de refroidissement et de déshumidification puisque l'air extérieur est chaud et humide (*Figure 9*).

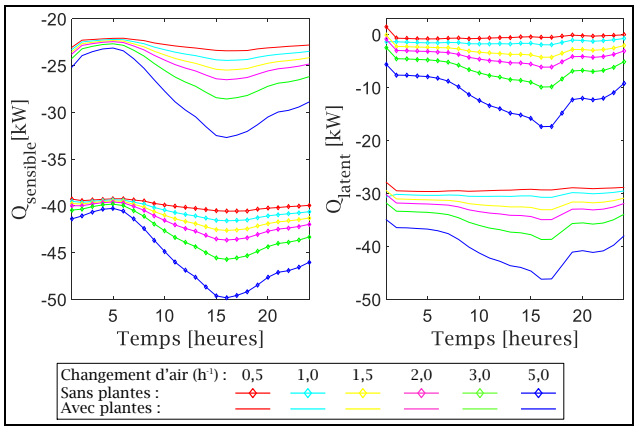

Figure 9 : Impact du débit de ventilation sur les charges (a) sensibles et (b) latentes de refroidissement de l'eAIB-I

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'intégration d'un modèle de plantes à un modèle d'eAIB-I a permis d'évaluer l'impact des plantes sur les charges de celui-ci. De plus, le modèle de plantes existant a été ajusté au contexte de l'étude. Les résultats confirment que les gains internes induits par les plantes au sein d'un eAIB-I ne peuvent être négligés et doivent être considérées lors de la conception de systèmes de

ISBN 978-2-921145-88-6

chauffage, ventilation et conditionnement de l'air (CVCA).

L'étude a également permis de constater que le bilan thermique fonctionne tel qu'attendu, alors que celui du bilan de croissance et de CO_2 devront être revus. En effet, peu importe le scénario simulé, la valeur de LAI calculée par le bilan de croissance tend dès le premier pas de temps vers la valeur maximum (environ de 3 pour les tomates). Ce comportement porte à croire que la résolution numérique du bilan de croissance de Vanthoor (2011) au sein du modèle de plantes est défaillante pour l'étude de cas. Une fois revu, le bilan de croissance sera un outil important pour étudier la productivité agricole de différents scénarios. Par ailleurs, les résultats démontrent que même lorsque les débits de ventilation sont très bas et que la fraction cultivée est de 200 %, la concentration en CO_2 tend vers 400 ppm. Cela n'est pas un résultat attendu, puisque dans ce contexte, la concentration en CO_2 devrait plutôt diminuer à cause de la photosynthèse des plantes. Puisque le bilan de croissance sera revu, cela corrigera également le bilan en CO_2 du modèle de plantes.

Les résultats ont également démontré que l'utilisation de l'air extérieur pour maintenir la concentration en CO_2 à 400 ppm augmente toutes les charges à l'exception de la charge de déshumidification en hiver. Or, dans le cas d'un bâtiment multizone, l'air évacué par les autres espaces est conditionné et a une teneur en CO_2 égale ou supérieure à celle de l'air extérieur. Tel qu'évalué par Nadal et al. (2017) dans le cas d'une serre intégrée à un bâtiment, cet air évacué peut être recyclé vers un eAIB afin d'améliorer l'efficacité globale du bâtiment.

La prochaine étape consistera à valider le modèle de plantes en régime permanent à l'aide de l'étude de Graamans et al. (2017). D'autre part, afin d'explorer la possibilité de récupérer l'air évacué du bâtiment pour alimenter l'eAIB-I, un bilan de CO_2 devra être effectué pour chaque zone en fonction de l'occupation. De plus, d'autres améliorations pourront être apportées au modèle de plantes afin qu'il soit plus versatile :

- Ajouter un système d'enrichissement de CO_2;
- Effectuer un traitement des gains solaires absorbés par les surfaces en fonction de la superficie cultivée tel que réalisé par Kokogiannakis et Cooper (2015). En effet, une partie des gains solaires transmis normalement aux surfaces sont en fait interceptés par les plantes (ASHRAE, 2011);
- Ajuster le modèle pour différents types de plantes (p. ex. laitue, fraise, micropousse, etc.);
- Ajouter une période sombre (durée et horaire).

Plus largement, une étude de CFD pourra être faite au sein d'un eAIB-I afin de déterminer les coefficients de convection h pour les murs et plafond qui tiennent en compte les ventilateurs nécessaires à la productivité agricole. De cette étude, une composante TRNSYS pourra être créée.

NOMENCLATURE

α_{pl} : Coefficient d'absorption de la lumière visible des plantes [-]

ACH_{inf} : Débit d'infiltration [h^{-1}]

ACH_{vent} : Débit de ventilation [h^{-1}]

h_{conv} : Coefficient de convection [$W/m^2 \cdot K$]

$I_{éclairage}$: Puissance des lampes DEL selon la superficie de plancher [W/m^2]

k_l : Coefficient d'extinction des plantes [-]

LAI : Ratio de l'aire de feuilles sur l'aire cultivée [-]

q_{rad_abs} : Flux d'énergie radiative (visible) absorbée par les plantes [W]

q_{rad_soleil} : Flux d'énergie radiatif (visible) émis par le soleil [W]

q_{rad_lampes}: Flux d'énergie radiatif (visible) émis par les lampes [W]

q_{abs} : Flux d'énergie absorbée par les plantes [W]

q_{conv} : Flux d'énergie convective échangée [W]

q_{env} : Flux d'énergie radiative (infrarouge) échangée [W]

q_{lat} : Flux d'énergie latente échangée [W]

q_{morph}: Flux d'énergie utile aux plantes [W]

q_{st} : Flux d'énergie stockée [W]

Q_{latent} : Charge latente [kW]

$Q_{sensible}$: Charge sensible [kW]

r_a : Résistance aérodynamique de la couche limite [s/m]

r_{st}: Résistance stomatique [s/m]

T_{amb} : Température ambiante [ºC]

T_{ciel}: Température du ciel [ºC]

T_{pl}: Température de la plante [ºC]

U_∞ : Vitesse de l'écoulement d'air sur la plante [m/s]

vpd : Différentiel de pression partielle de vapeur d'eau entre les plantes et leur environnement [kPa]

w_{amb} : Humidité absolue ambiante (kg d'eau/kg d'air sec)

ISBN 978-2-921145-88-6

REMERCIEMENT

Les auteurs remercient leurs collègues du département d'ingénierie de l'Université de Cambridge qui ont partagé un modèle de plantes développé sous TRNSYS.

RÉFÉRENCES

ASHRAE. 2010. *Standard 62.1-2010 (2010). ventilation for acceptable indoor air quality, atlanta, ga*.

ASHRAE. 2011. « ASHRAE Handbook - HVAC Applications : Environmental Control for Animals and Plants ». In. < http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009EBQL5/ashrae-handbook-heating/ashrae-han-environmental >.

Bell, A.A. 2000. *HVAC: Equations, Data, and Rules of Thumb*. McGraw-Hill.

Benis, Khadija, C. Reinhart et Paulo Ferrão. 2017a. *Building-Integrated Agriculture (BIA) In Urban Contexts: Testing A Simulation-Based Decision Support Workflow*.

Benis, Khadija, Christoph Reinhart et Paulo Ferrão. 2017b. « Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, p. 589-602.

Caplow, T, et J Nelkin. 2007. « Building-integrated greenhouse systems for low energy cooling ». In *2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century*. Vol. 1, p. 172-176.

Castilla, Nicolás. 2013. *Greenhouse technology and management*. Cabi.

De Zwart, Hendrik Feije. 1996. « Analyzing energy-saving potentials in greenhouse cultivation using a simulation model ». Ph. D. Dissertation, Wageningen University, Wageningen.

Dorais, Martine. 2003. « The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices ». In.

ESRL. 2018. « Trends in Atmospheric Carbon Dioxide ». <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html >.

Graamans, Luuk, Andy van den Dobbelsteen, Esther Meinen et Cecilia Stanghellini. 2017. « Plant factories; crop transpiration and energy balance ». *Agricultural Systems*, vol. 153, n° Supplement C, p. 138-147.

Jarvis, PG. 1976. « The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 273, n° 927, p. 593-610.

Jolliet, O. 1994. « HORTITRANS, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses ». *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 57, n° 1, p. 23-37.

Kittas, C, N Katsoulas, T Bartzanas et JC Bakker. 2013. « Greenhouse climate control and energy use ». In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas*. p. 63-95. 217: ISHS/FAO/NCARE.

Kokogiannakis, G., et P. Cooper. 2015. « Evaluating the environmental performance of indoor plants in buildings ». In *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings*. p. 712-719.

Kozai, Toyoki, Genhua Niu et Michiko Takagaki. 2015. *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.

Monteith, John L. 1965. « Evaporation and environment ». In *Symp. Soc. Exp. Biol*. Vol. 19, p. 4.

Pamungkas, Agung Putra, Kenji Hatou et Tetsuo Morimoto. 2014. « Evapotranspiration model analysis of crop water use in plant factory system ». *Environmental Control in Biology*, vol. 52, n° 3, p. 183-188.

Sethi, V. P., K. Sumathy, Chiwon Lee et D. S. Pal. 2013. « Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies ». *Solar Energy*, vol. 96, p. 56-82.

Stanghellini, C. 1996. « Transpiration of greenhouse crops : An aid to climate management. ». Wageningen Agricultural University.

Stanghellini, Cecilia. 1987. « Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management ».

Thom, AS, et HR Oliver. 1977. « On Penman's equation for estimating regional evaporation ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 103, n° 436, p. 345-357.

Vanthoor, B. H. E., P. H. B. de Visser, C. Stanghellini et E. J. van Henten. 2011. « A methodology for model-

ISBN 978-2-921145-88-6

based greenhouse design: Part 2, description and validation of a tomato yield model ». *Biosystems Engineering*, vol. 110, n° 4, p. 378-395.

Wang, Jun, Wei Lu, Yuxin Tong et Qichang Yang. 2016. « Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (Lactuca sativa L.) exposed to different ratios of red light to blue light ». *Frontiers in plant science*, vol. 7, p. 250.

Ward, R., R. Choudhary, C. Cundy, G. Johnson et A. McRobie. 2015. « Simulation of plants in buildings; incorporating plant-Air interactions in building energy simulation ». In *14th Conference of International Building Performance Simulation Association, BS 2015, December 7, 2015 - December 9, 2015*. (Hyderabad, India). International Building Performance Simulation Association.

Yeh, Naichia, et Jen-Ping Chung. 2009. « High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 8, p. 2175-2180.

ISBN 978-2-921145-88-6