

JOEY VILLENEUVE

Étude et analyse des effets d'une solution moussante sur le micro climat d'une serre, lorsqu'utilisée comme isolation et ombrage entre les matériaux de couvertures.

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie agroalimentaire
pour l'obtention du grade de Maître ès science (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2010

© Joey Villeneuve, 2010

RÉSUMÉ

L'expérience réalisée de l'hiver 2003-2004 à l'été 2005 sur l'utilisation de mousse liquide comme matériau de couverture de serre a permis de démontrer l'efficacité de la technologie comme isolation thermique en hiver et comme écran solaire en période estivale. Deux expériences comparatives sur une période de deux ans ont été effectuées dans des serres de recherche. Une serre expérimentale (S.Exp.) équipée d'un système d'injection de mousse et une serre référence (S.Réf.), sur le campus de l'Université Laval à Québec ont servi aux expérimentations. Les résultats de cette étude démontrent qu'il est possible de réduire la consommation d'énergie de l'ordre de 40 % à 60 % en période hivernale et qu'il est possible de diminuer la pénétration d'énergie solaire de l'ordre de 10 % à 30 % en période estivale en plus de réduire la température de l'air de l'ordre de 4,0 °C. De plus, la mousse liquide réfléchissait une partie de l'éclairage artificiel et augmentait la lumière totale utile pour la croissance des plants de tomates.

AVANT-PROPOS

Plusieurs publications sont issues des études menées sur le sujet de cette maîtrise dont l'article intitulé « Concept of Dynamic Liquid Foam Insulation for Greenhouse Insulation and the Assessment of its Energy Consumption and Agronomic Performances » dont je suis l'auteur principal a été publié dans la revue « Acta Horticulturae » (Villeneuve et al., 2005). Je remercie les coauteurs de cet article lesquels sont Dr Damien de Halleux professeur au Département des Sols et Génie alimentaire et Dr André Gosselin professeur au Département de Phytologie ainsi que monsieur Dror Amar, ingénieur de la compagnie Sunarc du Canada pour son assistance technique. Je remercie aussi le Dr Damien de Halleux, mon directeur de maîtrise, pour tout le savoir qu'il a su me transmettre lors de la réalisation de mon projet de maîtrise. Je remercie aussi le Dr André Gosselin pour avoir partagé sa passion de la culture en serre et de l'avoir animée en moi.

Je remercie aussi Les Industries Harnois pour leur assistance technique, leur participation financière et leur expertise sur le projet. Lorsque le projet a eu besoin de leurs services, ils ont répondu à l'appel. Leur aide pour l'installation et l'entretien du système fut grandement appréciée.

Je remercie aussi monsieur Michel Bauduin, technicien chez Sunarc du Canada, qui tout au long du projet s'est déplacé entre Montréal et Québec pour corriger et réparer les problèmes techniques. La réussite de cette étude est en partie attribuable à son enthousiasme et sa participation active dans l'entretien du système.

Ma reconnaissance est aussi transmise au Conseil national de recherche du Canada avec le programme d'aide à la recherche industrielle (*CNR-PARI*), à l'Agence de l'efficacité énergétique du Québec (*AEEQ*).

Life is often much more simple than what most people make it out to be. While some nations prosper other crumble under the weight of poverty. But yet these prosperous nations take for granted all forms of energy and waste away. If all used only what was necessary to survive everybody would live on a cleaner more enjoyable planet. Nous sommes limités en ressources naturelles sur notre planète et il faut tout contribuer, soit par notre savoir ou nos actions, le plus efficacement possible dans le but d'assurer la survie de l'humain aujourd'hui et pour les générations futures.

Joey Villeneuve

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
AVANT-PROPOS	iii
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : PROBLÉMATIQUE.....	2
1.1 Culture en serre au Canada	3
1.2 Problématique	3
1.3 Phénomène de transfert de chaleur dans une serre	6
1.4 Matériaux de recouvrement	9
1.5 Le polyéthylène (IR, UV, anticondensation).....	11
1.5.1 Serre de polyéthylène et la réduction des coûts de chauffage	11
1.5.2 Les écrans thermiques.....	11
1.6 Hypothèses.....	12
1.7 Objectif général et objectifs spécifiques	13
CHAPITRE II : LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	14
2.1 Introduction.....	15
2.2 Matériel et méthode	15
2.2.1 Serres expérimentales	15
2.2.1.1 Régie de fonctionnement en période hivernale.....	16
2.2.1.2 Régie de fonctionnement période estivale	17
2.2.2 Contrôle du climat et mesures.....	18
2.3 Mesure de réflexion de la lumière artificielle sur la mousse liquide	21
2.4 Isolation des serres	22
2.4.1 Coefficient de transfert de chaleur global (U) et expérimental (U').....	23
2.4.1.1 Coefficient global d'échange de chaleur U, essais laboratoire	24
2.5 Ombrage des serres	26
CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	27
3.1 Introduction.....	28
3.2 Conditions hivernales.....	28
3.2.1 Hiver 2004	28
3.2.1.1 Conditions climatiques.....	30
3.2.1.2 Analyse et discussion sur les résultats pour l'hiver 2004	31
3.2.2 Hiver 2005	32
3.2.2.1 Conditions climatiques.....	35

3.2.2.2	Réflexion de la lumière artificielle sur la mousse liquide.....	36
3.2.2.3	Analyse et discussion sur les résultats pour l'hiver 2005	37
3.3	Conditions estivales	38
3.4	Été 2004	39
3.4.1	Rayonnement global (W/m ²) avec et sans les gicleurs en fonction	39
3.4.2	Mesure de température avec et sans les gicleurs en fonction	40
3.4.3	Analyse et discussion des résultats de l'été 2004	42
3.5	Été 2005	43
3.5.1	Introduction résultats été 2005.....	43
3.5.2	Rayonnement global (W/m ²) avec et sans le système en fonction	44
3.5.3	Mesure de température avec et sans le système en fonction.....	45
3.5.4	Analyse et discussion des résultats de l'été 2005	47
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	49
	BIBLIOGRAPHIE	51
	ANNEXE I.....	53
	ANNEXE II	53
	ANNEXE III.....	54
	ANNEXE V: ISHS Acta Horticulturae 691.....	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Coefficient global de transfert de chaleur (U), matériaux de serres	7
Tableau 2 Taux d'infiltration estimé dans les serres par type de construction.....	8
Tableau 3 Coefficient de l'équation de pression de vapeur saturée.....	9
Tableau 4 Propriétés des matériaux de recouvrement typiques.....	10
Tableau 5 Répartition des surfaces des serres (expérimentale et référence).....	24
Tableau 6 Coefficient global d'échange de chaleur (hiver 2004)	29
Tableau 7 Conditions climatiques moyennes dans les serres; hiver 2004	30
Tableau 8 Coefficient global d'échange de chaleur (mois de février 2005)	33
Tableau 9 Coefficient global d'échange de chaleur (mois de mars 2005)	34
Tableau 10 Conditions climatiques moyennes (hiver 2005).....	35
Tableau 11 Lumière FPP mesurée (serre expérimentale avec et sans mousse isolante) ..	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Évolution du prix du baril de pétrole brut entre 1970 et 2009	5
Figure 2 Bilan thermique de la serre	6
Figure 3 Écran thermique dans une serre de verre.....	12
Figure 4 Illustration de la serre expérimentale à l'Université Laval (hiver 2004-2005) ..	16
Figure 5 Système d'acquisition de données du climat intérieur	20
Figure 6 Emplacements des sondes (vue plan)	20
Figure 7 Injection de mousse dans la serre expérimentale	21
Figure 8 Emplacement de mesure de lumière (FPP) réfléchie (vue plan)	22
Figure 9 Emplacement des lectures de la lumière (FPP) réfléchie (vue de coupe)	22
Figure 10 Rayonnement global intérieur et extérieur le 26 mars 2004.....	31
Figure 11 Rayonnement global intérieur et extérieur le 26 mars 2005.....	36
Figure 12 Rayonnement global (W/m ²) (avec gicleurs) le 21 juillet 2004	39
Figure 13 Rayonnement global (W/m ²) (sans gicleur) le 24 juillet 2004	40
Figure 14 Température de l'air le 21 juillet 2004 (le système en fonction)	41
Figure 15 Température de l'air le 24 juillet 2004 (système éteint).....	42
Figure 16 Rayonnement global (W/m ²) le 6 juillet 2005 (système en fonction)	44
Figure 17 Rayonnement global (W/m ²) le 9 juin 2005 (système éteint)	45
Figure 18 Température de l'air le 6 juillet 2005 (système en fonction)	46
Figure 19 Température de l'air le 9 juin 2005 (système éteint).....	47

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La culture en serre est une industrie internationale qui contribue au développement économique tout en favorisant la consommation locale. Approximativement 95 % des légumes de serre produits en Europe sont consommés dans un rayon de 500 à 1000 km (*Wijnands, 2001*). La population des pays développés cherche et exige des produits de qualité, frais, sans défauts, le tout sur une base annuelle. La production de fruits, légumes, fleurs coupées, plantes annuelles peut se faire à l'aide de la culture en serre dans des régions qui ne sont pas toujours favorisées par le climat. Ce mode de production constitue également une possibilité dans des pays où les sols ne sont pas fertiles, la saison de culture (maraîchère, florale, etc.) est courte et où il manque d'eau.

Cependant, le prix à payer pour avoir accès à des denrées fraîches sur une base annuelle, dans des régions de latitudes nordiques, est très élevé. L'installation de structures modernes de serres et les équipements nécessaires à leur fonctionnement engendrent des coûts d'investissement qui doivent être amortis sur plusieurs années. Les deux principaux coûts associés à la culture en serre sont le chauffage et la main-d'œuvre (*Statistique Canada, 2007*). Dans le but de rentabiliser les infrastructures et d'augmenter les marges de profit, de nombreuses recherches sont effectuées pour trouver des technologies ou méthodes permettant de réduire les frais d'exploitation.

La diminution des coûts associés à l'utilisation des différentes sources d'énergie contribue directement à l'augmentation du profit net de l'entreprise. La pression est grande sur les producteurs en climat nordique qui doivent rivaliser avec des concurrents étrangers qui n'ont pas de coûts importants associés au chauffage et à la main-d'œuvre. La maîtrise globale de la consommation d'énergie dans le cadre de productions en serre s'avère indispensable pour limiter les coûts énergétiques (*Wuillays, 2007*).

CHAPITRE I : PROBLÉMATIQUE

1.1 Culture en serre au Canada

Au Canada, en 2007, l'expansion de la superficie consacrée aux cultures de serre a ralenti après une longue période de croissance constante qui a commencé en 1990. La superficie totale des cultures de serre sous plastique et sous verre était d'environ 20,9 millions de mètres carrés. (*Statistique Canada, 2007*).

Parmi les dépenses importantes auxquelles l'industrie doit faire face figurent les coûts de chauffage. En 2007, les exploitants de serres ont dépensé 271 millions de dollars en chauffage. Le chauffage au gaz naturel s'est taillé la part du lion, représentant 69,8 % des coûts totaux de chauffage au Canada. Toutefois, même si les dépenses en mazout ont diminué de 14,0 % versus 2006, les dépenses pour les autres types de combustibles, comme le charbon, l'électricité et les copeaux, ont augmenté de 39,8 % par rapport à 2006. Les coûts de chauffage représentent environ de 30 à 40 % des coûts de production de la plupart des producteurs de légumes de serre (*Statistique Canada, 2007*).

En 2007, les exploitants de serres ont déclaré des ventes totales de 2,3 milliards de dollars, une augmentation de moins de 1 % par rapport à 2006 (*Statistique Canada, 2007*).

La situation actuelle de l'industrie canadienne démontre la pertinence d'effectuer des projets de recherche dans le domaine de la culture de serres. Les superficies de cultures ainsi que les revenus augmentent peu, mais les dépenses sont en croissance. Des projets de réduction de la consommation d'énergie sont des avenues qui doivent être explorées afin d'assurer que cette industrie demeure profitable.

1.2 Problématique

La culture en serre en climat nordique nécessite beaucoup d'énergie sous forme de chaleur pour maintenir une température de culture favorable dans la serre. Une serre recouverte d'un double film de polyéthylène soufflé offre peu d'isolation thermique. Une grande partie de la chaleur produite est utilisée à combler les pertes d'énergie de la serre.

Les pertes se produisent par conduction, convection, rayonnement et infiltration. Il est donc primordial de limiter les infiltrations et les échanges avec le climat extérieur.

L'été, les excès de chaleur peuvent devenir problématiques pour la culture en serre. Les serres doivent donc avoir des systèmes de ventilation très performants qui permettent d'évacuer la chaleur qui autrement s'accumulerait dans la serre. De plus, lors de périodes estivales très chaudes, les serres peuvent bénéficier d'ombrage supplémentaire pour de courte période dans la journée et de façon ponctuelle afin de réduire le stress sur les cultures et stimuler leur croissance.

Pour demeurer compétitive, l'industrie serricole doit trouver des moyens de diminuer sa consommation énergétique. Pour mieux cerner la problématique, la figure 1 montre l'évolution des cours du pétrole brut depuis 1970. Cette tendance est problématique pour les producteurs en serre qui voient continuellement leurs coûts de production augmenter. Le prix du baril de pétrole a atteint un sommet à l'été 2008 à 133,93 \$ US (*WTI, juin 2008*) avant de redescendre à 40,59 \$ US (*WTI, février 2009*) le baril. L'économie mondiale traverse une période de récession profonde et cela affecte le prix des énergies fossiles. Lorsque l'économie mondiale va reprendre sa croissance, les économistes prévoient que le prix du pétrole augmentera à nouveau. L'industrie serricole doit donc trouver des moyens pour demeurer compétitive.

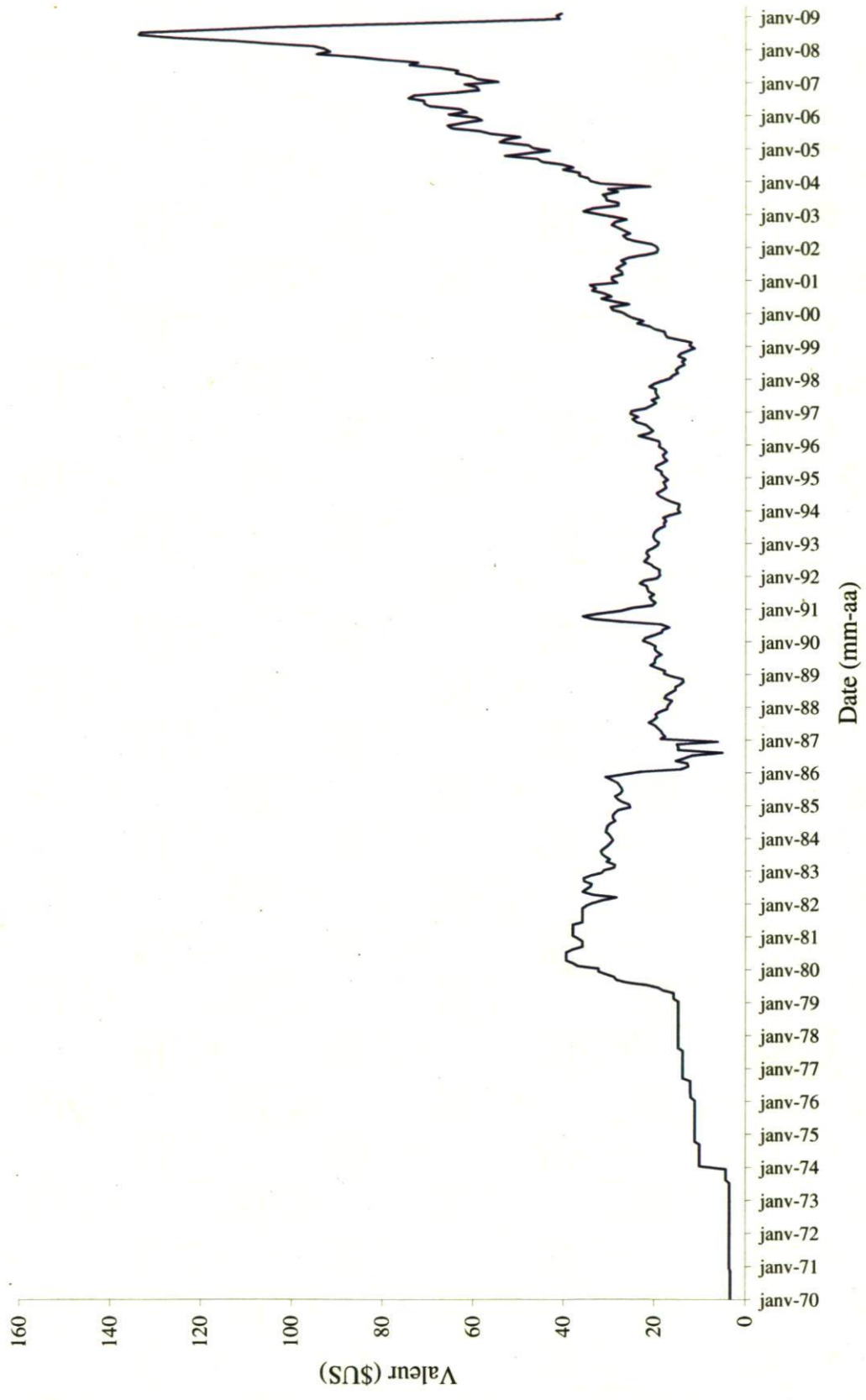


Figure1 Évolution du prix du baril de pétrole brut entre 1970 et 2009 (WTI, 2009)

1.3 Phénomène de transfert de chaleur dans une serre

La chaleur (ou énergie thermique) ne peut passer que d'un corps chaud vers un corps froid, c'est-à-dire d'un corps à température donnée vers un autre à température plus basse. L'analyse qui suit a pour objectif d'étudier la manière dont s'effectue cet échange dans une serre (figure 2). Le transfert énergétique se produit suivant cinq modes :

- soit par contact : c'est la conduction thermique;
- soit à distance : c'est le rayonnement thermique et solaire;
- soit par les fuites : c'est l'infiltration;
- soit par échange gazeux : c'est la convection;
- soit par échange de masse : c'est l'évaporation et la condensation

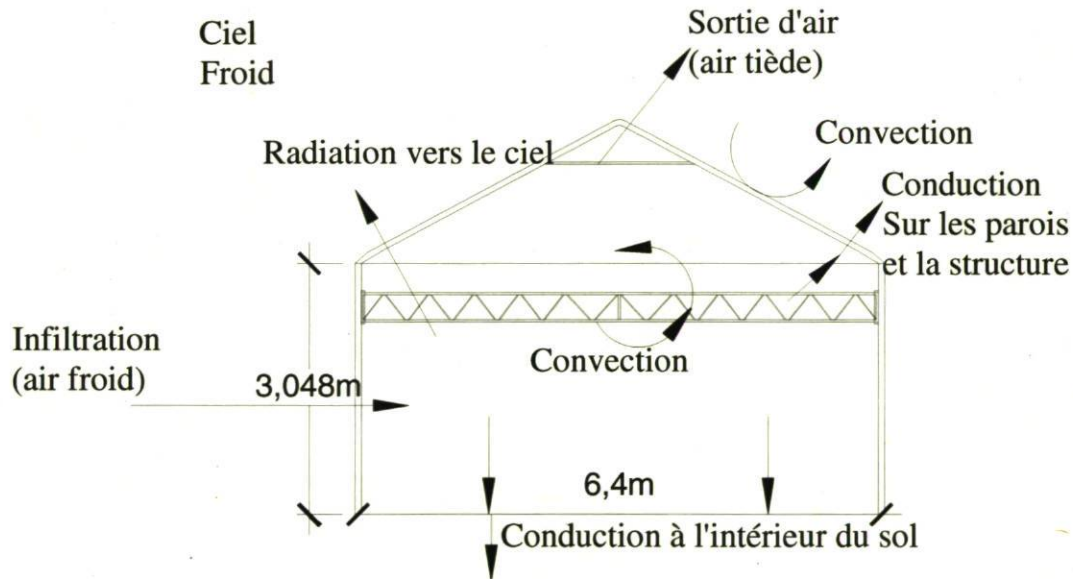


Figure 2 Bilan thermique de la serre (Gosselin et Dansereau, 2001)

La majeure partie de la perte de chaleur dans une serre est occasionnée par le rayonnement (rayonnement infrarouge), la conduction et la convection (q_{rc}) ainsi que les pertes par l'infiltration (q_i). Le calcul de la somme des termes (q_{rc}) et (q_i) permet de déterminer le besoin en chauffage de la serre. (ASABE, 2003a)

Les pertes par conduction et convection, q_{rc} (W) se calculent comme suit;

$$(1) q_{rc} = UA_c(t_i - t_o)$$

où

U est le coefficient global d'échange de chaleur ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) (tableau 1)

A_c est la surface de serre recouverte (m^2)

t_i est la température de l'air à l'intérieur de la serre ($^\circ C$)

t_o est la température de l'air à l'extérieur de la serre ($^\circ C$)

Le coefficient U est appelé coefficient de transmission global du mur. Il s'exprime en $W/m^2 \cdot ^\circ C$, le tableau 1 identifie le coefficient U d'une série de matériaux de recouvrement utilisés dans les serres. Il caractérise les propriétés thermiques d'une paroi séparant deux fluides, c'est-à-dire la quantité de chaleur traversant une paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la dite paroi. (*J.Brau, 2006*). Plus sa valeur est faible et plus la construction sera isolée.

Tableau 1 Coefficient global de transfert de chaleur (U), matériaux de serres

Matériaux de recouvrement de serre	U
	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
Verre simple, scellé	6,2
Verre simple, faible transmission	5,4
Verre double, scellé	3,7
Plastique simple	6,2
Polycarbonate simple, ondulé	6,2 - 6,8
Polyéthylène double	4
Polyéthylène double, thermique	2,8
Acrylique rigide, paroi double	3,2
Polycarbonate rigide, paroi double 1)	3,2 - 3,6
Acrylique rigide, avec billes de polystyrène 2)	0,57
Verre simple avec rideau thermique 3)	4
Polyéthylène double et rideau thermique 3)	2,5

1) Fonction de l'espace entre les parois

2) Panneau d'acrylique rigide de 32 mm rempli de billes de polystyrène

3) Uniquement lorsque le rideau thermique est fermé et bien scellé

(*ASABE, 2003b*)

Les pertes par infiltration, q_i , (W) peuvent être mesurées en considérant que l'échange total est fonction de l'échange de chaleur latente et sensible et se calculent comme suit (ASABE, 2003a) :

$$(2) q_i = \rho_i N V [C_{p_i}(t_i - t_o) + h_{fg}(W_i - W_o)]$$

où

ρ_i est la densité de l'air intérieur, kg/m³

C_{p_i} est la chaleur spécifique de l'air intérieur, J/kg °C

N est le taux d'infiltration, s⁻¹ (tableau 2)

V est le volume de la serre, m³ (Université Laval)

h_{fg} est la chaleur latente de vaporisation à t_i , J/kg

W_i est l'humidité de l'air intérieur, kg_{eau}/kg_{air}

W_o est l'humidité de l'air extérieur, kg_{eau}/kg_{air}

où

$$(3) h_{fg} = C_p * t_i$$

$$(4) W_i = 0,622 * (P_v - / (P - P_v))$$

$$HR = P_v / P_{vs}$$

P est la pression atmosphérique (kPa)

P_v est la pression de vapeur (kPa)

P_{vs} est la pression de vapeur saturée (kPa) (tableau 3)

HR est l'humidité relative (%)

Tableau 2 Taux d'infiltration estimé dans les serres par type de construction

Type de serre et construction	taux d'infiltration (N) ¹⁾	
	1/s	1/h
<u>Construction neuve :</u>		
Paroi de plastique double	2,1 x 10 ⁻⁴ - 4,1 x 10 ⁻⁴	0,75 - 1,5
Verre ou fibre de verre	1,4 x 10 ⁻⁴ - 2,8 x 10 ⁻⁴	0,50 - 1,0
<u>Construction âgée :</u>		
Verre, bon entretien	2,8 x 10 ⁻⁴ - 5,6 x 10 ⁻⁴	1,0 - 2,0
Verre, entretien négligé	5,6 x 10 ⁻⁴ - 11,1 x 10 ⁻⁴	2,0 - 4,0

1) Taux d'échange du volume d'air interne par unité de temps (s-1 or h-1). L'exposition à des vents directs ou en hauteur va augmenter les taux d'infiltration; inversement, de faibles vents et des mesures de protection du vent vont réduire les taux d'infiltration.

(ASABE, 2003b)

Pour déterminer la pression de vapeur saturée l'équation suivante est utilisée :

$$(5) \ln(P_{vs}) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^5 + C_7 \ln(T)$$

Tableau 3 Coefficients de l'équation de pression de vapeur saturée

coefficient	(-100 °C < T < 0 °C)	(0 °C < T < 200 °C)
C ₁	-5,67 E+03	-5,80 E +03
C ₂	-5,15 E-01	-5,52 E +00
C ₃	-9,68 E-03	-4,86 E-02
C ₄	6,22 E-07	4,18 E-05
C ₅	2,07 E-09	-1,45 E-08
C ₆	-9,48 E-13	0
C ₇	4,163502	6,545967

(ASHRAE, 1993)

1.4 Matériaux de recouvrement

Puisque la lumière est souvent un facteur limitant lors de l'installation de nouvelles structures de serres, les matériaux utilisés doivent offrir un maximum de transmission de lumière (Turcotte, 2007) tout en étant pratiques et utiles pour l'utilisation en cours. Le tableau 4 présente certaines propriétés de plusieurs matériaux généralement utilisés dans le domaine de la culture en serre. Les matériaux de couvertures de serre telles que le double film de polyéthylène, le verre ou les panneaux d'acrylique n'influencent pas de manière significative le rendement vendable des premières récoltes saisonnières de tomates (Papadopoulos et Hao, 1997).

Tableau 4 Propriétés des matériaux de recouvrement typiques

Matériaux	Épaisseur (mm)	Durée de vie (années)	Lumière* Transmission PAR (%)	Avantages	Désavantages
Verre	Épaisseur double	30	88	Résistance supérieure à la chaleur, aux UV et l'abrasion. Faible expansion thermique	Faible résistance aux impacts. Lourd
Verre « faible transmission »	3,175	30	90-92	Résistance supérieure à la chaleur, aux UV et à l'abrasion. Faible expansion thermique	Lourd
Verre-double (scellé)	25,4	30	71	Résistance supérieure à la chaleur, aux UV et l'abrasion. Faible expansion thermique	Lourd
Panneau d'acrylique	8 - 16	+ de 20	83	Résistance aux UV et à la météo, léger	Grande expansion, nécessite des joints d'étanchéité, inflammable. Faible résistance
Panneau de polycarbonate	6 - 8	15	79	Grande résistance aux impacts	Grande expansion
Film de polyéthylène simple résistant aux UV	0,16 - 0,24	3	87	Grande feuille, d'installation facile. Faible coût	Courte durée de vie
Film de polyéthylène (IR)	0,16 - 0,24	3	82	Grande feuille, d'installation facile. Faible coût	Courte durée de vie
Film de polyvinyle fluoré, PVF	0,08 - 0,16	>10	92	Grande résistance aux impacts. Résistance aux UV	Feuille de petite taille

* Photosynthetically active radiation, 400 à 700 nm avec un angle incident de 0 ° (ASABE, 2003b)

1.5 Le polyéthylène (IR, UV, anticondensation)

C'est le matériau le plus communément utilisé en raison de son faible coût d'achat et de la disponibilité de grandes surfaces de film. Des films de grade « agriculture » peuvent être utilisés pour recouvrir des structures pour moins d'un an. Il existe cependant des films qui sont beaucoup plus résistants, car ils sont munis d'une protection aux rayonnements UV. Leur durée de vie est plus longue, soit de 3 à 5 ans. Des films munis d'une protection thermique permettent de réduire les pertes de chaleur. La majorité des films intérieurs dans les serres sont offerts avec une protection qui réduit la formation de gouttelettes d'eau, cette eau forme plutôt une mince pellicule qui ne nuit pas aux cultures.

1.5.1 Serre de polyéthylène et la réduction des coûts de chauffage

À la base, l'utilisation de double film de polyéthylène permet de réduire la consommation d'énergie de manière significative lorsque comparer au recouvrement en verre simple (*Brumfield, 2007*). Une grande partie des pertes de chaleur dans ce type de serre est due aux infiltrations. La ventilation mécanique est souvent une cause d'infiltration, car les systèmes occupent une grande surface, sont faits de métal et ne sont pas étanches à 100 %. Les ouvertures fréquentes des portes, les trous dans les matériaux de recouvrement, un manque de calfeutrage ainsi que l'exposition au vent sont d'autres sources d'infiltration. La conduction et la convection sur la structure constituent également d'autres causes de pertes de chaleur.

1.5.2 Les écrans thermiques

Les écrans thermiques sont communément utilisés dans les serres de verre pour réduire les coûts de chauffage et procurer de l'ombrage en période estivale. Les serres de polyéthylène utilisent rarement ce type de structure. Cependant, les augmentations des coûts d'énergie des dernières années incitent de plus en plus de producteurs en serres de polyéthylène à installer des écrans thermiques. L'écran thermique permet de réduire de l'ordre de 20 à 50 % (*le Cadre, 2006*) la consommation d'énergie dans une serre la nuit. L'économie d'énergie varie en fonction du climat, du type d'écran (rétention de chaleur ou combinaison de rétention de chaleur et d'ombrage), ainsi que de l'utilisation que le producteur en fait. De plus, une étude menée à l'Université Laval a démontré que

l'utilisation d'un écran thermique dans une serre recouverte d'un polyéthylène double contribue à réduire les pertes de chaleur de 23 à 24 % la nuit lorsque comparée au verre simple (*Zhang et al., 1996*).



Figure 3 Écran thermique dans une serre de verre

1.6 Hypothèses

Les hypothèses du projet sont les suivantes :

- 1) L'utilisation de mousse entre les parois de polyéthylène d'une serre permettra de faire des économies d'énergie en hiver.
- 2) L'ajout de mousse liquide entre les matériaux de recouvrement d'une serre afin de produire de l'ombrage pendant la saison estivale permettra de diminuer la température de l'air.
- 3) La transmission de lumière dans la serre expérimentale sera identique à celle de la serre référence suite aux injections de mousse liquide lorsque le système n'est pas en fonction.
- 4) L'utilisation de mousse entre les parois de polyéthylène d'une serre devra réfléchir jusqu'à un maximum de 50 % de la lumière artificielle à l'intérieur de la serre.

1.7 Objectif général et objectifs spécifiques

L'objectif général de l'expérience est de mesurer et de quantifier le potentiel d'économie d'énergie l'hiver et d'ombrage de la mousse liquide l'été. Cet objectif comprend 4 objectifs spécifiques énumérés ci-dessous :

1. Déterminer le coefficient global d'échange de chaleur (U) de la serre avec et sans mousse liquide.
2. Effectuer un suivi de la température de l'air dans les serres.
3. Mesurer la lumière artificielle réfléchiée sur la paroi la nuit.
4. Mesurer la lumière totale dans les serres le jour.

CHAPITRE II : LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1 Introduction

L'injection de mousse liquide entre deux films de polyéthylène d'une serre permet d'augmenter l'isolation des serres en hiver et de diminuer la température de l'air en saison estivale. Des mesures du microclimat (température, humidité relative, lumière, consommation de gaz) ont été effectuées sur une période de deux saisons complètes (hiver, été). Le dispositif expérimental et les instruments utilisés pour obtenir les résultats sont détaillés dans la section « matériel et méthode » de l'expérience.

2.2 Matériel et méthode

2.2.1 Serres expérimentales

Une serre conventionnelle de type nordique (24,4 m de long x 6,4 m de large x 3,05 m sous gouttière) recouverte d'un double film de polyéthylène a été modifiée pour permettre l'installation d'un système d'injection de mousse liquide (figure 4). Cette serre expérimentale ainsi qu'une autre serre identique sont équipées de fournaises au gaz naturel ainsi que de deux ventilateurs d'extraction d'air et d'un panneau ouvrant. Les membranes intérieures des deux serres sont des films fabriqués par la compagnie Klerk Hyplast inc. (www.klerksusa.com) d'une épaisseur de 0,15 mm (6 millième de pouce) avec des propriétés anticondensation. Les films extérieurs, pour les deux serres, sont aussi fabriqués par la compagnie Klerk Hyplast inc. (www.klerksusa.com) d'une épaisseur de 0,15 mm (6 millième de pouce) avec des propriétés thermiques, c'est-à-dire qu'ils bloquent les rayons infrarouges longs. Des lampes à haute pression de vapeur de sodium (HPS) de 470 W (Gavita, GAN 400 AL 230V) sont utilisées afin d'assurer la photopériode requise.

La figure 4 illustre l'installation dans laquelle le projet de recherche a eu lieu. Sur cette figure, le toit est rempli de mousse. L'équipement nécessaire à la fabrication de la mousse est situé à l'intérieur de la serre sur le plancher de béton. Cette installation permet le verrouillage des parois de polyéthylène murales séparément de celles du toit. Cette configuration permet un remplissage rapide de la mousse (30 à 45 minutes) et permet d'offrir une comparaison juste avec une serre jumelée. Cette installation a donc permis un fonctionnement continu pour la période hivernale 2004-2005.

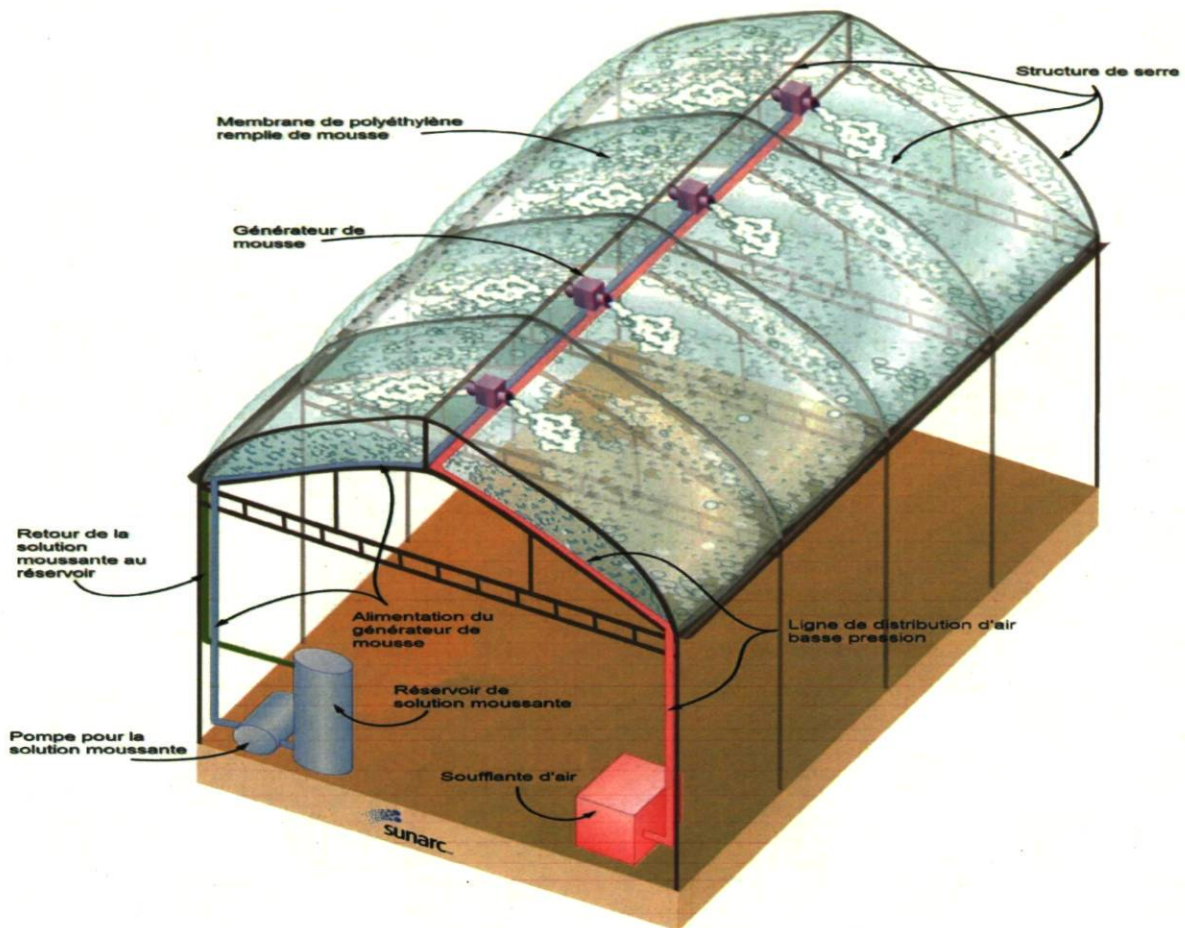


Figure 4 Illustration de la serre expérimentale à l'Université Laval (hiver 2004-2005)

2.2.1.1 Régie de fonctionnement en période hivernale

L'injection de la mousse liquide a lieu juste avant le coucher du soleil et son élimination a lieu le lendemain matin immédiatement après le lever du soleil (programmation automatique via l'horloge solaire). Une sonde détectant la pression (Omega, PSW495) sur la paroi permet de suivre le déplacement de la paroi de polyéthylène. Il s'agit de l'ajuster pour que la détection se fasse lorsque le toit est rempli de mousse liquide. Lorsque la mousse se brise, le système redémarre et remplit le toit jusqu'à ce qu'il y ait détection par la sonde. Une caméra a été placée afin de vérifier et de valider les résultats de fonctionnement du système, ce qui permet de valider que l'espace entre les deux films de polyéthylène de la serre expérimentale contient de la mousse toute la nuit.

Une culture de tomate hydroponique a été transplantée dans chaque serre dans le but de reproduire des conditions de croissance communément employées dans les serres commerciales. Avant la transplantation des plants de tomates, les unités de chauffage ont été ajustées afin de maintenir une température de 18 °C la nuit et de 24 °C lors de période éclairée (ensoleillement le jour et éclairage artificiel le soir).

La première plantation de tomates a été effectuée le 15 novembre 2003 et les premiers fruits ont été cueillis au mois de février 2004. La seconde plantation de tomate a été effectuée le 8 novembre 2004 et les premiers fruits ont été récoltés au mois de février 2005. Le système d'isolation par mousse liquide a fonctionné de façon intermittente entre le 1^{er} janvier et 1^{er} avril 2004. L'année suivante, le système d'isolation par mousse liquide a fonctionné de façon continue du 1^{er} janvier au 8 avril 2005, soit la date à laquelle les plants de tomates ont été enlevés.

Toutes les manipulations et données en lien avec la culture de tomates dans les serres (expérimentale et référence) ne font pas partie de ce mémoire de maîtrise et ont fait l'objet d'une expérience menée en parallèle par un autre étudiant (*Aberkani, 2009*).

2.2.1.2 Régie de fonctionnement période estivale

Une première série d'essais menés à l'été 2004 a débuté le 24 mai. L'année suivante, les essais ont débuté le 1^{er} mai 2005. Un régime de fonctionnement du système d'injection de mousse a été établi dans le but d'optimiser l'utilisation et afin de créer un ombrage ponctuel (20 à 60 %) à l'aide du même système qui est utilisé pour isoler la serre en période hivernale. Un système de gicleurs, qui est normalement utilisé pour rincer les résidus de mousse, permet d'obtenir un effet d'ombrage d'environ 20 %. Les mesures prises pour cette période servent à déterminer si le système d'injection par mousse liquide peut être utilisé pour ombrager les cultures de tomates. Une première série d'essais (été 2004) a permis de cumuler des données sur la performance du système de gicleurs pour créer de l'ombrage lorsque ce dernier est en fonction de 8 h à 16 h (programmation automatique via une minuterie). Pour cette série d'expériences, aucun matériau ou produit d'ombrage n'a été appliqué sur le recouvrement extérieur de la serre référence.

À l'été 2005, un nouveau protocole d'utilisation d'une combinaison de gicleurs et de mousse pour créer de l'ombrage sur la serre expérimentale a été rédigé dans le but de mieux gérer les ressources disponibles. La température de consigne au niveau de la ventilation est de 26 °C. Lors des journées très ensoleillées, la quantité totale d'énergie sous forme de rayonnement global et PAR pénétrant dans les serres a été mesurée. La valeur cible recherchée correspond à celle d'une toile d'ombrage qui réduit de 20 à 30 % le rayonnement total dans la serre.

Entre 8 h et 10 h du matin, lorsque le rayonnement global extérieur excède 500 W/m², alors le système de gicleurs démarre, permettant un ombrage d'environ 20 %. À partir de 10 h, la mousse est fabriquée de façon à avoir un effet d'ombrage de l'ordre de 40 % (60 à 70 % de la surface du toit est couverte de mousse). Cette régie se poursuit jusqu'à 13 h. Par la suite, les gicleurs (20 % d'ombrage) sont remis en fonction jusqu'à 18 h. Le contrôle de la mousse se fait uniquement via le rayonnement global extérieur. C'est-à-dire, si la lumière extérieure est inférieure à 400 W/m² (bande morte) alors l'alimentation électrique du système s'arrête. Ce seuil minimum fut fixé afin d'éviter que le système effectue des arrêts et démarrages lors du passage de nuages devant le soleil.

2.2.2 Contrôle du climat et mesures

Afin de faire un suivi adéquat du climat intérieur des serres (expérimentale et référence) trois sondes de température (Hobo S-TMB-M017, $\pm 0,2$ °C de 0° à 50 °C) et une sonde d'humidité relative (Hobo S-THB-M002, ± 3 %) ont été placées dans des cages aspirantes uniformément disposées dans chacune des serres et à une hauteur de 1,8 m du sol.

Un capteur quantique a été utilisé pour mesurer le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR, Hobo S-LIA-M003, ± 5 $\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$). De plus, un pyranomètre a été utilisé pour mesurer le rayonnement solaire global (Hobo S-LIB-M003, ± 5 W/m²). Ces deux sondes ont été placées au-dessus de la culture à 3,05 m du sol. Lors des mois d'hiver, il

est nécessaire de mesurer la transmission lumineuse des deux serres le jour lorsque la mousse n'est pas présente dans le but de caractériser et de comparer la transmission lumineuse entre les deux serres. L'été, lors de périodes ensoleillées, ces sondes permettent de mesurer les effets de l'utilisation de la mousse pour faire de l'ombrage sur mesure. Une serre nécessite un système d'acquisition de données afin de pouvoir faire une analyse du micro climat (*Bakker, 1997*).

La consommation de gaz naturel, en mètre cube, utilisée dans chaque serre était mesurée avec des compteurs à gaz commerciaux (AL M800 140 kPa MAOP du Canadian meter company inc., m³, $\pm 0,1$ m³). Les mesures ont été notées dans chaque serre avant l'injection de mousse et après l'élimination de la mousse suite au lever du soleil. L'énergie électrique consommée par les différentes composantes du système d'injection de mousse liquide a été notée et calculée. La quantité de mousse résiduelle entre les parois le matin a été estimée chaque jour par observation visuelle. L'observation visuelle était basée sur une répartition, en pourcentage, de la surface du toit recouverte de mousse.

Une station météo, de marque Priva, permettait de faire un suivi constant des conditions climatiques extérieures à proximité de la serre. La station météo permettait de faire une lecture de la température (Priva temp. sensor $\pm 0,1$ °C), du rayonnement solaire global (Kipp & Zonen SDI-SR-CM11, W/m², ± 2 %), ainsi que de la vitesse (Priva wind speed sensor $\pm 0,1$ m/s) et de la direction du vent (Priva wind direction sensor).

La figure 5 décrit le système d'acquisition de données utilisé pour l'expérience et la figure 6 décrit l'emplacement des sondes utilisées lors de l'expérimentation. Les sondes sont placées aux mêmes endroits dans les deux serres (expérimentale et référence) :

La collecte de données se fait à l'aide de système d'acquisition de données de marque "Hobo weather station" (figure 5). Ces instruments peuvent accueillir jusqu'à 16 sondes. La longueur totale du câblage reliant les 16 sondes ne doit pas excéder 100 m. Lorsque cette condition n'est pas respectée, le système d'acquisition de données est dans l'impossibilité d'enregistrer les données selon leur valeur originale. L'augmentation de la

longueur des fils de sonde au-dessus de 100 m. a pour effet de modifier le signal (volt, ampère) capté par le système d'acquisition de données.

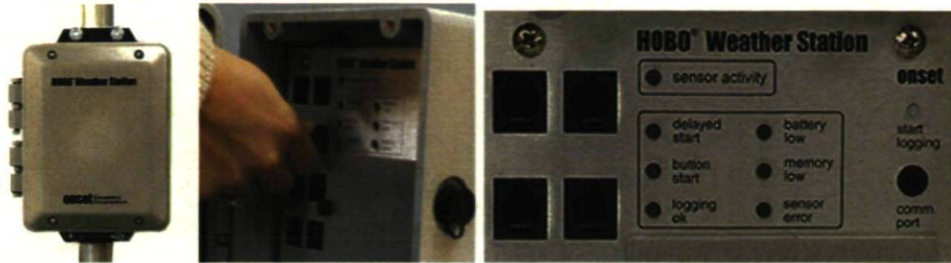


Figure 5 Système d'acquisition de données du climat intérieur

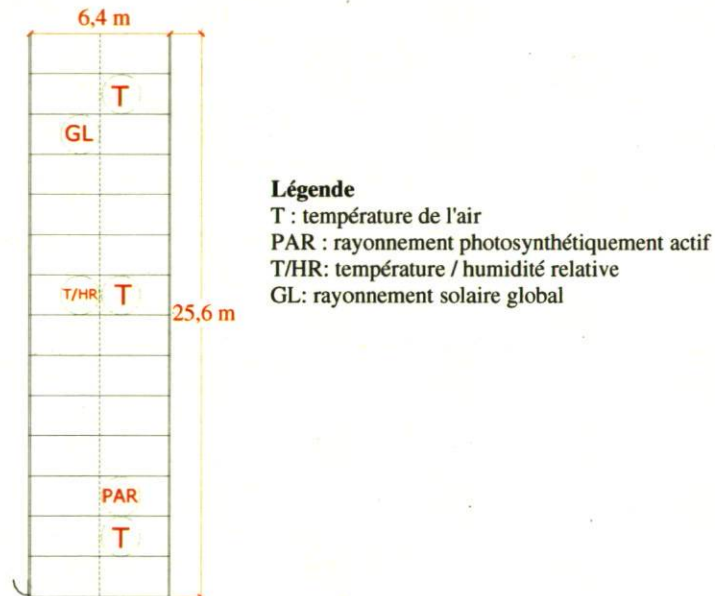


Figure 6 Emplacements des sondes (vue plan)



Figure 7 Injection de mousse dans la serre expérimentale

La figure 7 présente l'injection de mousse faite entre les parois de la serre expérimentale le jour. La mousse est produite au faite et coule lentement vers le bas de la paroi de la serre qui se remplit progressivement par la suite.

2.3 Mesure de réflexion de la lumière artificielle sur la mousse liquide

La mousse liquide entre les parois de serre a des propriétés réfléchissantes. Cette caractéristique de la mousse a été observée lorsque l'éclairage artificiel fonctionnait dans la serre expérimentale la nuit. Puisqu'une surface de plastique complètement blanche a un coefficient de réflexion de l'ordre de 50 % (*De Herde, 2004*), des mesures de réflexion de la lumière artificielle ont été faites à 9 endroits spécifiques dans la serre (figure 8). Le flux de photon photosynthétique ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) a été mesuré dans la serre expérimentale (avant et après injection de mousse) à deux hauteurs différentes (figure 9) (1,65 sous les lampes et à 0,85 m au dessus des lampes). Ces mesures ont été prises avec un système portable de mesure photosynthétique (Li6400, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA).

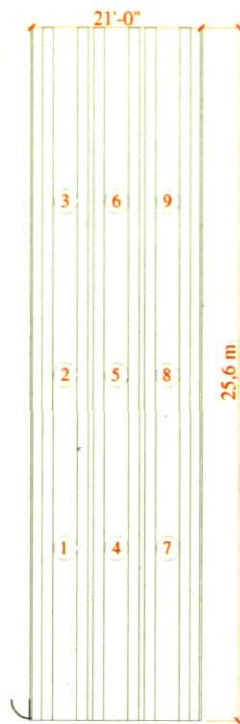


Figure 8 Emplacement de mesure de lumière (FPP) réfléchi (vue plan)

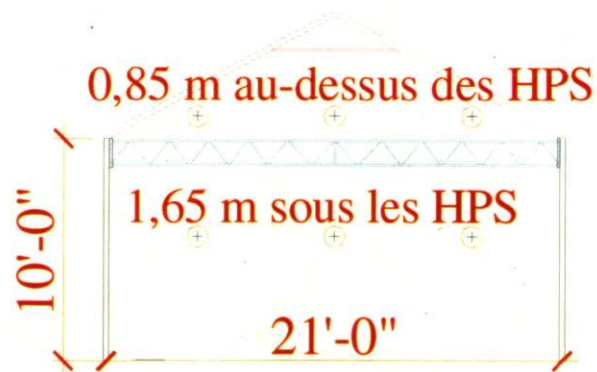


Figure 9 Emplacement des lectures de la lumière (FPP) réfléchi (vue de coupe)

2.4 Isolation des serres

Pour les premiers essais réalisés dans cette expérience, le système d'isolation par mousse liquide a fonctionné de façon interrompue entre le 1^{er} novembre 2003 et 1^{er} mai 2004. Pour la deuxième série d'essais, le système a opéré de façon continue du 1^{er} février 2005 au 8 avril 2005, soit la date à laquelle les plants de tomates ont été enlevés de la serre.

Lors des expériences à l'hiver 2004, les serres (expérimentale et référence) étaient recouvertes de film de polyéthylène d'épaisseurs différentes; cependant, à l'hiver 2005 les serres étaient recouvertes de film de polyéthylène identique.

2.4.1 Coefficient de transfert de chaleur global (U) et expérimental (U')

La quantité d'énergie perdue (q) dans la serre expérimentale, lorsque le toit est rempli de mousse, est déterminée par calcul à l'aide de l'équation (1). Les résultats sont comparés avec ceux des valeurs obtenues dans la serre référence.

La valeur U d'un polyéthylène thermique double est de 2,8 (W/m²°C) et la valeur U du polycarbonate rigide (paroi double) 3,6 (W/m²°C) (ASABE, 2003a). Ces panneaux sont utilisés aux extrémités des serres. Le coefficient U est un coefficient de transfert global qui correspond à des conditions expérimentales fixes. Cependant, dans le cas des serres (expérimentale et référence) les conditions météorologiques sont éminemment variables. De plus, le coefficient U ne tient pas compte du renouvellement de l'air de la serre ni des processus de condensation qui peuvent apparaître sur les parois. C'est la raison pour laquelle un nouveau coefficient global de transfert de chaleur U' du toit ou des murs ou de la combinaison du toit et des murs a été défini et calculé. Ce coefficient U' (W/m²°C) est calculé comme suit :

U' = Consommation énergétique (q_{tot}) sur une période de temps / Superficie de la paroi (m²) * ΔTmoyen (°C)

ΔTmoyen (°C) : Température (°C) intérieure nocturne moyenne – Température (°C) extérieure nocturne moyenne

Cette équation permet de trouver la valeur du coefficient global d'échange de chaleur (U') qui servira au calcul d'économie d'énergie. Durant la période nocturne considérée la valeur q_{rc} est obtenue à partir de la formule suivante;

$$q_{tot} = q_{gaz} + q_{lampes} = q_{rc} + q_{inf}$$

q_{tot} est la valeur mesurée au compteur de gaz (W)

q_{rc} est la perte de chaleur par rayonnement, conduction et convection (W)

q_{inf} est la perte par infiltration dans la serre (W)

q_{gaz} est la quantité de gaz consommée la nuit (W)

q_{lampes} est l'apport de chaleur provenant de l'éclairage artificiel (W)

À partir de ces équations, il est donc possible de calculer l'économie d'énergie entre les deux serres. Cette méthode de calcul permet donc de déterminer l'économie d'énergie réalisée, lors de la période hivernale la nuit, quand la mousse est utilisée.

Les surfaces de serre, en m², utilisées pour le calcul du coefficient d'échange de chaleur global sont identifiées au tableau 5. De plus, à l'hiver 2004, l'isolation par mousse liquide recouvrait 251,2 m² du toit de la serre expérimentale. Afin d'imiter avec précision une serre commerciale jumelée à chapelle multiple, la configuration de la serre expérimentale fut modifiée à l'hiver 2005. La surface recouverte d'isolation par mousse liquide fut réduite à 206,6 m².

Tableau 5 Répartition des surfaces des serres (expérimentale et référence)

Répartition des surfaces des serres (expérimentale et référence)	Superficie (m ²)
Surface totale serre expérimentale avec mousse (hiver 2004)	251,2
Surface totale serre expérimentale avec mousse (hiver 2005)	206,6
Surface totale serre expérimentale sans mousse	154,8
Surface totale serre référence	361,4
Surface totale de mur aux extrémités	54,3
Surface totale	415,7

2.4.1.1 Coefficient global d'échange de chaleur U, essais laboratoire

Afin de déterminer la résistance à la transmission de chaleur de la mousse liquide, des mesures ont été faites dans des conditions contrôlées de laboratoire (*Swinton, 2004*) par l'Institut de recherche en construction (IRC), une division du Conseil national de recherches du Canada (CNRC). La méthode d'essai standard pour déterminer les performances thermiques des parois soit la norme ASTM C-236 (*ASTM, 2003*) a été utilisée.

Puisque la mousse liquide est instable et de nature variable, la valeur mesurée du coefficient de transfert de chaleur global U est également variable. Le mur extérieur a été instrumenté avec des thermocouples et des capteurs de flux de chaleur afin de déterminer la résistance thermique et de caractériser le flux de chaleur à travers le mur d'essai au cours d'une période de 3 heures. Au cours de cette période, le mur a été maintenu rempli de mousse et l'accumulation de liquide a été drainée. Le coefficient de transfert de chaleur global (U) a été mesuré et calculé à partir de la surface intérieure vers la surface exposée aux conditions climatiques.

Afin de déterminer la valeur du coefficient de transfert de chaleur global (U), un mur de 2,5 m x 2,5 m a été construit en bois de charpente de pin de 5 cm x 15 cm. Les surfaces (une exposée aux conditions climatiques et une à température pièce) du cadre ont été recouvertes de panneaux de Lexan transparent de 0,6 cm d'épaisseur. Un générateur de mousse a été relié au centre du cadre dans le haut de celui-ci. La base du cadre a été construite avec une pente afin de pouvoir assurer le drainage et d'élimination de l'excédent de liquide. La température du côté exposé aux conditions climatiques a été fixée à $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la face intérieure à une température de $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les essais réalisés sur les différentes solutions moussantes mises à l'essai sur une période de trois heures ont permis de déterminer que les valeurs de U sont comprises entre 0,35 et 0,76 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. (Villeneuve et coll. 2005). La valeur U en laboratoire est variable, car la mousse a une composition qui varie au cours du temps. En effet lors de son injection initiale elle est plus liquide et moins efficace, car les pertes par conduction entre les molécules d'eau sont supérieures. Lorsque l'eau excédentaire, utilisée lors de la fabrication initiale, est drainée alors la mousse liquide est plus efficace et réduit les pertes de chaleur. Ces essais, réalisés en laboratoire dans des conditions contrôlées, permettent d'avoir des valeurs théoriques comme base de comparaison pour les essais pratiques réalisés en serre.

2.5 Ombrage des serres

Pour les premiers essais d'ombrage réalisés dans cette expérience (été 2004), le système d'ombrage a fonctionné de façon continue en utilisant uniquement les gicleurs pour faire une mince pellicule liquide d'ombrage entre les parois de serres. À l'été 2005, le système a fonctionné en continu en combinant l'utilisation de la mousse liquide et des gicleurs. Des mesures de température de l'air (intérieur et extérieur), d'humidité relative (intérieure et extérieure), de la lumière (intérieure et extérieure) ont été prises afin de comparer les serres (expérimentale et référence).

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction

Les essais qui se sont déroulés sur une période de deux ans à l'Université Laval dans une serre expérimentale et une serre de référence sur l'utilisation d'une technologie d'injection de mousse liquide entre les parois de serres ont permis de compiler une grande quantité de données expérimentales. Tout au long de l'expérience, des données, sur le climat intérieur de la serre ainsi que sur le climat extérieur de la serre ont été compilées afin d'évaluer les performances, comme matériau isolant, de la mousse liquide. Les essais font suite à une expérience menée en laboratoire qui a permis de déterminer la valeur théorique du coefficient d'échange de chaleur de la mousse liquide. L'ordre dans lequel l'expérience s'est déroulée est le suivant : laboratoire, essais hiver 2004, essais été 2004, essais hiver 2005, essais été 2005.

3.2 Conditions hivernales

3.2.1 Hiver 2004

Lorsque le soleil se couche, la consommation d'énergie dans la serre référence augmente plus rapidement que la consommation d'énergie dans la serre expérimentale. Les premiers résultats obtenus permettent d'entrevoir des économies d'énergie substantielles. Ces résultats sont présentés au tableau 6.

Le tableau 6 permet de comparer les différentes valeurs de coefficient global d'échange de chaleur (U) entre elles. La valeur U Global (représente la serre entière) est calculée à partir de la consommation réelle dans les serres (expérimentale et référence). La valeur U toit est une valeur calculée et considère la serre expérimentale (mur et toit compris) comme étant recouverte en totalité de mousse isolante. Cette approche permet de faire une comparaison plus juste entre la serre expérimentale et les serres commerciales jumelées multi chapelle où la surface de mur est négligeable comparativement à la surface de toit. Les températures moyennes sont identifiées pour les serres (expérimentale et référence) ainsi que la température extérieure. À partir de ces différentes données, il est possible de calculer une valeur réelle d'économie d'énergie et une valeur calculée qui considère la serre expérimentale comme une serre recouverte entièrement de mousse isolante.

Tableau 6 Coefficient global d'échange de chaleur durant la nuit (hiver 2004)

Date	Coefficient global d'échange de chaleur U (W/m ² °C)			Température (°C)		
	U Global	U Toit	U Global	Moyenne		
	S.Exp	S.Exp	S.Réf	S.Exp	S.Réf	Extérieur
06 févr	1.62	—	3.26	21.1	21.4	-7.0
25 févr	1.82	—	3.32	22.7	21.6	-7.3
02 mars	2.19	—	3.68	23.2	21.4	3.5
09 mars	1.51	—	2.88	22.8	21.7	-7.6
10 mars	1.86	—	2.88	22.6	22.6	-4.0
11 mars	1.52	—	3.41	22.9	22.4	-0.6
14 mars	1.70	—	2.73	22.9	22.3	-2.8
15 mars	2.03	—	3.43	22.8	22.1	-6.7
29 mars	2.30	1.71	2.88	22.9	22.4	4.0
09 avr	1.80	1.02	2.82	20.3	21.1	-0.7
10 avr	1.86	1.12	2.88	20.3	21.8	-1.4
13 avr	2.10	1.47	2.99	20.3	21.5	3.0
14 avr	2.20	1.49	3.20	20.9	21.7	2.9
22 avr	2.74	2.32	3.42	19.4	21.0	3.1
27 avr	2.54	2.11	3.22	19.3	20.5	4.1
U _{moyen}	1.98	1.61	3.13	21.6	21.7	-1.2
Économie d'énergie totale (%)						
—	37 %	49 %	—	—	—	—

La première partie des résultats (6 février au 15 mars) dans le tableau 6 sont des valeurs réelles enregistrées. Suite à une modification de l'unité expérimentale (résultats du 27 mars au 27 avril), les résultats sont présentés en deux parties (coefficient d'échange de chaleur global et coefficient d'échange de chaleur spécifique au toit). La régie de la mousse est très importante afin de permettre des économies d'énergie toute la nuit.

Ce tableau permet de constater que la serre expérimentale a un coefficient d'échange de chaleur global (U Global) inférieur à la serre référence. Cela veut dire que la serre expérimentale, qui est soumise à des conditions climatiques similaires à la serre référence, consomme en moyenne 37 % moins d'énergie pour maintenir sa température de consigne. Lorsqu'on considère le toit uniquement, on constate que la valeur du coefficient d'échange de chaleur (U Toit) de la serre expérimentale est inférieure à celle de la serre de référence. La serre expérimentale consomme donc en moyenne 49 % moins d'énergie pour maintenir sa température de consigne.

3.2.1.1 Conditions climatiques

Le tableau 7 ci-dessous permet de comparer les conditions climatiques dans les serres pour plusieurs journées avant et après qu'il y ait eu des modifications à la configuration de la serre expérimentale.

Tableau 7 Conditions climatiques moyennes dans les serres; hiver 2004

Date	Humidité relative (%)		Rayonnement global (W/m ²)	
	Par période de 24 heures		Moyenne journalière	
	S.Réf	S.Exp	S.Réf	S.Exp
Hiver 2004	44 ± 27	44 ± 28	205 ± 105	180 ± 98

À l'hiver 2004, l'humidité relative sur une base de 24 heures est en dessous de 50 %. Cette différence s'explique par le fait que les plants de tomates dans les serres à l'hiver 2004 ont uniquement été introduits le 4 février, leur taille est donc petite et leur contribution à hausser l'humidité relative est moindre. Ce qui est important de constater c'est que l'humidité est similaire dans les deux serres. Cette similarité est importante, car elle permet de démontrer que la gestion des climats dans la serre expérimentale et dans la serre référence se fait selon les mêmes consignes.

Le rayonnement global total moyen de la serre expérimentale est moindre (environ 12 %) que celui de la serre de référence à l'hiver 2004 (figure 10). Cela s'explique par le fait qu'à l'hiver 2004 les membranes de polyéthylène recouvrant la serre expérimentale étaient d'une épaisseur supérieure aux membranes recouvrant la serre de référence. Cela implique qu'il y a moins de lumière dans la serre expérimentale le jour, cela peut avoir un effet sur la consommation d'énergie dans la serre expérimentale.

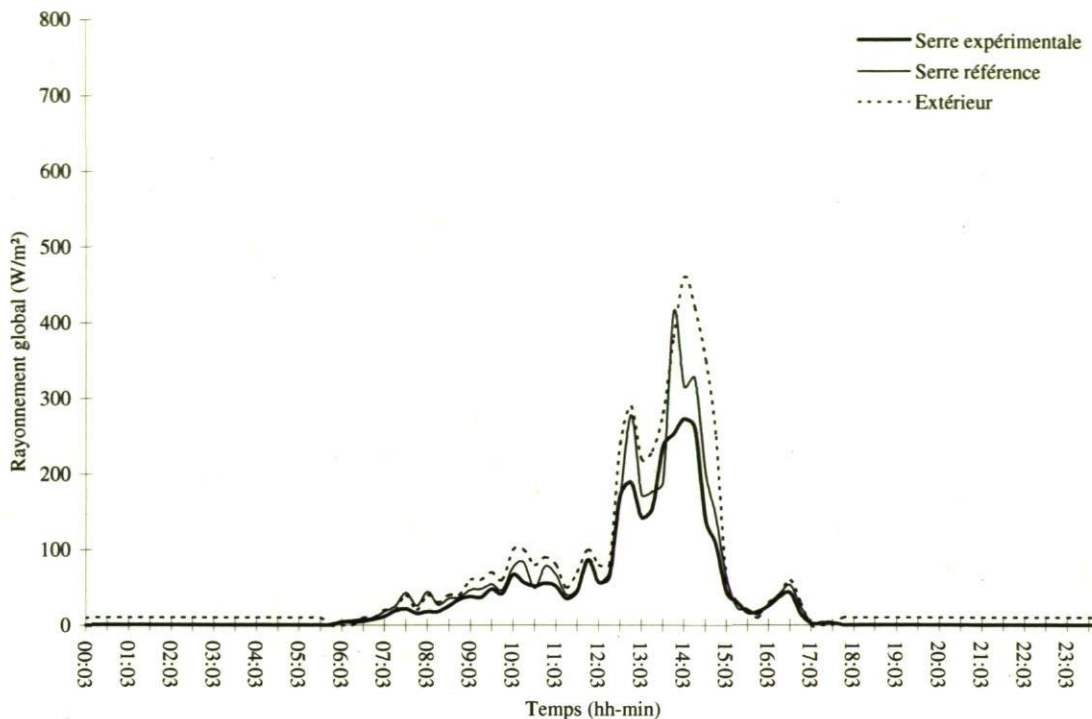


Figure 10 Rayonnement global intérieur et extérieur le 26 mars 2004

3.2.1.2 Analyse et discussion sur les résultats pour l'hiver 2004

Les calculs de la perte de chaleur par conduction, convection et rayonnement permettent de déterminer les différentes valeurs du coefficient global d'échange de chaleur (U) pour l'hiver 2004. Les résultats permettent de constater que la valeur du coefficient global d'échange dans la serre expérimentale est de $1,98 \text{ W/m}^2\text{°C}$ lorsqu'il y a présence de mousse isolante dans les murs et dans le toit (période nocturne). Cette valeur est comparée à celle de la serre référence qui est de $3,13 \text{ W/m}^2\text{°C}$, ce qui se traduit par une économie d'énergie globale de 37 % en faveur de la serre expérimentale. Lorsque la serre est considérée comme étant recouverte entièrement de mousse, la valeur (U) est de $1,61 \text{ W/m}^2\text{°C}$ versus $3,13 \text{ W/m}^2\text{°C}$, ce qui se traduit par une économie d'énergie ajustée de 49 % lorsqu'il y a présence de mousse.

Les valeurs calculées du coefficient global d'échange de chaleur sont le reflet des conditions climatiques variables qui peuvent être très différentes des conditions mesurées

en laboratoire. De nombreuses améliorations ont été apportées au système à l'été 2004 dans le but de produire des résultats améliorés à l'hiver 2005.

3.2.2 Hiver 2005

La deuxième partie de l'expérience a eu lieu à l'hiver 2005. Cette deuxième phase hivernale bénéficie d'améliorations qui ont pour but d'augmenter la fiabilité du système en place afin d'obtenir un plus grand nombre de données analysables. Les tableaux (8 et 9) permettent de comparer les différentes valeurs du coefficient global d'échange de chaleur (U) obtenues en tenant compte des pertes par infiltration et de l'efficacité de la consommation du gaz naturel dans les serres. La valeur U Global, représente la serre telle quelle, et est calculée à partir de la consommation réelle dans les serres (expérimentale et de référence). La valeur U toit, est une valeur calculée, et considère la serre (mur et toit compris) comme étant recouverte en totalité de mousse isolante. Les températures moyennes sont identifiées pour les serres (expérimentale et de référence) ainsi que la température extérieure. À partir de ces différentes données, il est possible de calculer une valeur réelle d'économie d'énergie et une valeur calculée qui considère la serre expérimentale comme une serre recouverte entièrement de mousse isolante.

Tableau 8 Coefficient global d'échange de chaleur (mois de février 2005)

Date	Coefficient global d'échange de chaleur U (W/m ² °C)			Température (°C)		
	U Global	U Toit	U Global	Moyenne		
	S.Exp	S.Exp	S.Réf	S.Exp	S.Réf	Extérieur
31 janv	1.98	1.04	2.08	16.8	17.0	-10.8
01 févr	1.38	0.64	1.65	17.0	17.0	-9.5
02 févr	2.34	0.98	3.02	17.1	17.1	-7.6
03 févr	2.71	1.14	3.47	17.4	17.3	-3.2
04 févr	2.22	1.00	2.72	17.3	17.3	-3.4
05 févr	1.58	0.74	1.88	17.3	17.2	-2.5
06 févr	2.84	1.44	3.11	17.4	17.2	-1.3
07 févr	3.04	1.57	3.26	17.5	17.3	3.0
08 févr	1.63	0.80	1.85	17.6	17.2	1.7
09 févr	1.24	0.62	1.37	17.1	17.1	-3.7
10 févr	2.42	1.30	2.49	17.3	17.6	-5.7
11 févr	2.06	1.13	2.06	17.4	17.9	-6.0
13 févr	1.56	0.77	1.77	17.4	18.0	-11.3
14 févr	4.40	2.25	4.80	17.2	17.6	-2.3
16 févr	1.83	0.91	2.03	17.8	17.2	-5.3
19 févr	2.64	1.32	2.95	17.3	17.1	-14.9
20 févr	1.80	0.95	1.91	17.2	17.0	-16.9
21 févr	3.20	1.57	3.63	17.4	17.2	-9.9
22 févr	2.43	1.15	2.83	17.6	17.3	-6.7
23 févr	1.19	0.52	1.49	17.6	17.5	-12.5
24 févr	2.50	1.09	3.13	18.0	17.5	-11.6
25 févr	2.19	1.03	2.59	17.8	17.9	-13.0
26 févr	2.28	1.15	2.52	18.2	17.6	-10.1
27 févr	2.97	1.31	3.69	18.0	17.7	-8.3
28 févr	3.51	1.65	4.13	16.9	17.1	-5.1
U _{moyen}	2.32	1.12	2.66	17.43	17.36	-7.09
Économie d'énergie globale (%)						
—	13%	58%	—	—	—	—

Tableau 9 Coefficient global d'échange de chaleur (mois de mars 2005)

Date	Coefficient global d'échange de chaleur U (W/m ² °C)				Température (°C)	
	U Global		U Toit		Moyenne	
	S.Exp	S.Exp	S.Réf	S.Exp	S.Réf	Extérieur
02 mars	2.83	1.28	3.45	17.5	17.7	-7.6
03 mars	2.34	1.12	2.72	17.6	17.9	-10.7
05 mars	2.68	1.11	3.47	17.7	17.6	-4.8
06 mars	1.73	0.73	2.22	17.7	17.5	-10.5
07 mars	2.57	1.26	2.92	16.8	17.1	-8.5
08 mars	1.89	1.00	1.98	17.5	17.7	-11.1
10 mars	2.92	1.55	3.04	17.2	18.2	-14.0
11 mars	3.99	2.04	4.33	17.1	17.1	-4.3
13 mars	2.23	1.07	2.58	18.0	17.8	-4.2
14 mars	3.57	1.89	3.72	17.8	17.1	-1.6
15 mars	2.21	1.05	2.59	17.7	17.7	0.5
17 mars	1.29	0.61	1.52	17.7	18.2	-3.2
18 mars	2.40	1.19	2.70	17.9	17.1	-1.8
19 mars	2.47	1.02	3.22	17.9	17.0	0.4
20 mars	4.19	1.81	5.31	18.0	17.8	1.4
21 mars	2.58	1.10	3.27	17.9	17.2	-0.2
22 mars	0.88	0.33	1.22	18.0	17.8	0.5
23 mars	2.83	1.36	3.27	17.9	17.8	-0.9
24 mars	1.43	0.55	1.96	18.0	17.7	2.5
25 mars	1.18	0.50	1.50	17.8	18.1	-4.9
26 mars	3.13	1.47	3.70	17.8	17.9	-3.8
27 mars	3.16	1.33	4.07	17.8	17.7	1.6
28 mars	2.34	1.00	2.99	17.3	16.8	1.8
30 mars	1.79	0.75	2.32	17.5	17.3	1.4
31 mars	1.91	0.74	2.59	17.5	17.2	1.5
U _{moyen}	2.42	1.11	2.91	17.67	17.56	-3.22
Économie d'énergie globale (%)						
—	17%	62%	—	—	—	—

La donnée « U Global » représente la consommation réelle entre les deux serres. Cette donnée ne fait aucune distinction entre la surface avec mousse et la surface sans mousse. Quant à la donnée « U Toit », elle considère la serre comme une surface recouverte en totalité avec de la mousse et ne fait pas de distinction entre les murs et le toit. La serre expérimentale peut dans ce cas être comparée à une serre jumelée à chapelle multiple, serre où la surface des murs est négligeable par rapport à la surface du toit.

Les tableaux 8 et 9 permettent de constater que la serre expérimentale a un coefficient d'échange de chaleur global (U Global) inférieur à la serre référence. Cela veut dire que

la serre expérimentale, qui est soumise à des conditions climatiques similaires à la serre référence, consomme en moyenne 15 % moins d'énergie pour maintenir sa température de consigne. Cette valeur est inférieure à celle obtenue à l'hiver 2004, car la surface totale, de la serre expérimentale à l'hiver 2005, recouverte de mousse liquide est passée de 251,2 m² (70 % de la surface totale de la serre) à 206,6 m² (57 % de la surface totale de la serre), soit une réduction de 13 % de la surface totale. Lorsqu'on considère le toit uniquement, on constate que la valeur du coefficient d'échange de chaleur (U Toit) de la serre expérimentale est inférieure à celle de la serre référence. La serre expérimentale consomme en moyenne 60 % moins d'énergie pour maintenir sa température de consigne.

3.2.2.1 Conditions climatiques

Le tableau 10 montre l'humidité relative moyenne sur une base de 24 heures et le rayonnement global moyen de 7 h à 18 h dans les serres (expérimentale et de référence). L'humidité relative est élevée dans les deux serres et cela est dû à la présence d'une culture de tomates mature. Les plants de tomates introduisaient alors une plus grande quantité de vapeur d'eau dans la serre et contribuaient à faire augmenter l'humidité relative. L'humidité est similaire dans les deux serres. Ce qui permet de démontrer que la gestion des climats dans la serre expérimentale et dans la serre de référence se fait selon les mêmes consignes.

Tableau 10 Conditions climatiques moyennes (hiver 2005)

Date	Humidité relative (%)		Rayonnement global (W/m ²)	
	Par période de 24 heures		Moyenne journalière	
	S.Réf	S.Exp	S.Réf	S.Exp
Hiver 2005	75 ± 5	76 ± 6	197 ± 91	200 ± 94

Le rayonnement global total moyen de la serre expérimentale et de la serre de référence est constant pour la période de l'expérimentation (figure 11). Cela permet d'observer que les niveaux de lumière dans les deux serres n'ont pas de différence significative. À l'hiver 2005, les deux serres étaient recouvertes de membranes de polyéthylène identiques. De plus, la quantité de résultats obtenus pour l'expérience hivernale 2005 permet d'augmenter significativement la précision des calculs d'économie d'énergie.

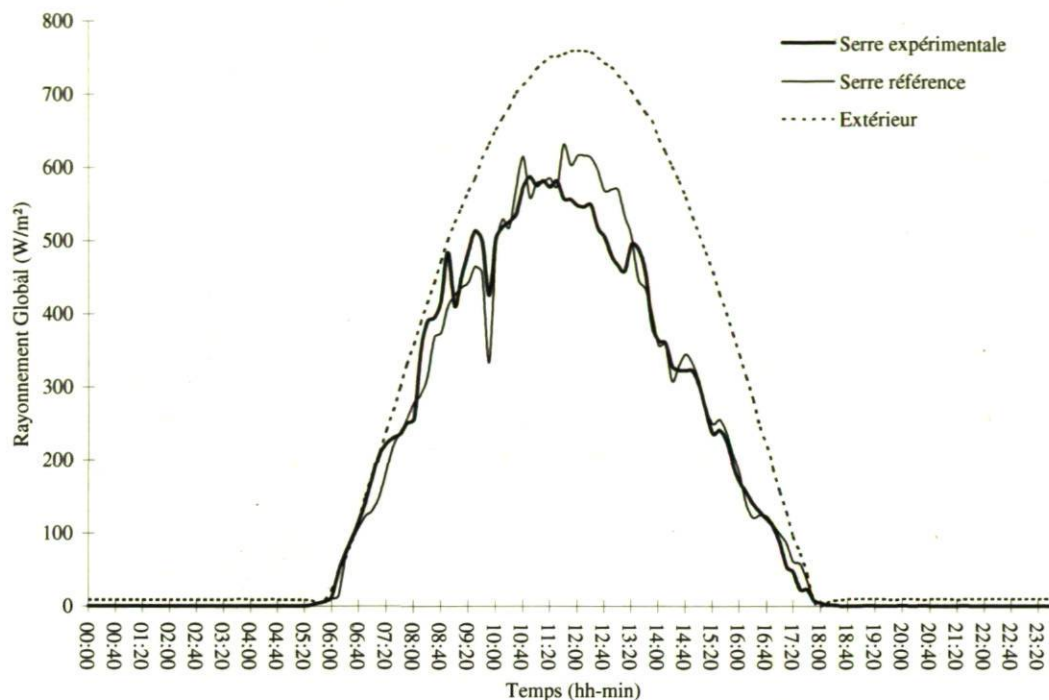


Figure 11 Rayonnement global intérieur et extérieur le 26 mars 2005

3.2.2.2 Réflexion de la lumière artificielle sur la mousse liquide

Le Tableau 11 présente une série de mesures du flux de photon photosynthétique (FPP) réfléchi ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) à 9 endroits différents dans la serre expérimentale (Figure 8) sous les lampes HPS (1,65 m sous les HPS) et au-dessus des lampes HPS (0,85 m au-dessus des HPS) (figure 9). Ces mesures ont été prises la nuit sans présence de condensation sur les parois.

Des mesures de la quantité de lumière (FPP) en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ sont détaillées au Tableau 11. À une hauteur 0,85 m au dessus des lampes HPS, la valeur du FPP passe de 1,12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, sans mousse, à 3,44 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ avec de mousse. De plus, à 1,65 m en bas des lampes HPS, la valeur du FPP passe de 41,73 à 44,20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Cela correspond à une augmentation de 6 % du flux de photon photosynthétique due à la présence de mousse.

Tableau 11 Lumière FPP mesurée (serre expérimentale avec et sans mousse isolante)

Serre expérimentale ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)				
Position	À 1,65 m sous les HPS		À 0,85 m au dessus des HPS	
	Sans mousse	Avec mousse	Sans mousse	Avec mousse
1	61,66	61,28	0,96	2,82
2	55,99	57,04	1,19	3,87
3	29,42	30,45	1,12	3,49
4	53,89	54,80	1,13	3,25
5	31,14	33,00	1,29	3,65
6	40,01	42,45	1,25	3,72
7	35,37	40,87	0,99	3,12
8	38,06	44,11	1,10	3,78
9	30,00	33,84	1,08	3,23
Moyenne	41,73	44,20	1,12	3,44
Pourcentage de lumière réfléchi serre expérimentale à 1,65 m sous les lampes				6 %

Le calcul de lumière réfléchi considère la moyenne de lumière dans la serre à 1,7 m du sol et la moyenne de lumière dans la serre à 3,35 m du sol. La comparaison de ces deux moyennes donne 6 % de lumière réfléchi de plus dans la serre expérimentale lorsqu'il y a présence de mousse liquide et d'éclairage artificiel.

3.2.2.3 Analyse et discussion sur les résultats pour l'hiver 2005

Les mesures de lumière réfléchi peuvent influencer les rendements des cultures expérimentales comparativement à la serre référence. Une lampe à haute pression de vapeur de sodium (HPS) émet 28 % de lumière utile à la plante et 72 % de chaleur (sous forme de rayons infrarouges). De plus, l'effet isolant de la mousse contribue à créer un environnement de culture favorable à la plante en réduisant les pertes d'énergie dans la serre expérimentale.

La démonstration de la technologie d'injection de mousse liquide lors de l'hiver 2005 a permis de reproduire des résultats similaires à l'hiver 2004. Le fait d'avoir des résultats similaires pendant deux saisons permet de conclure que l'utilisation de la mousse liquide entre les parois d'une serre lors de périodes nocturnes contribue à diminuer les besoins en chauffage de cette serre sans effets négatifs sur les rendements des cultures de tomates.

Les calculs de perte de chaleur par conduction, convection et rayonnement (q_{rc}) permettent de déterminer les différentes valeurs du coefficient global d'échange de chaleur (U). Le coefficient global d'échange dans la serre expérimentale, lorsqu'il y a de la mousse dans les murs et dans le toit (période nocturne), est beaucoup moins élevée que dans la serre référence; $1,12 \text{ W/m}^2\text{°C}$ versus $2,66 \text{ W/m}^2\text{°C}$ pour le mois de mars et $1,11 \text{ W/m}^2\text{°C}$ versus $2,91 \text{ W/m}^2\text{°C}$ pour le mois de février $\text{W/m}^2\text{°C}$. Le calcul du pourcentage d'économie moyen pour les mois de mars et février, à partir de ces valeurs, permet d'obtenir une économie d'énergie de 62 % lorsqu'il y a présence de mousse.

La mousse liquide a une capacité de réfléchir la lumière artificielle. Cependant, il n'est pas possible de comparer les résultats d'une série de mesures avec une autre série de mesures puisque le positionnement des sondes influence énormément les résultats obtenus. Les seules comparaisons valides sont celles qui comparent les résultats de réflexion avec mousse et sans mousse pour une même nuit et pour des lectures prises aux mêmes endroits dans la serre expérimentale. Les mesures prises la nuit dans la serre expérimentale démontrent une augmentation de 6 % du FPP utile pour la plante. Étant donné que la lumière se trouve tout près du feuillage, elle devient utile à la plante et pourrait se traduire par une activité photosynthétique accrue.

3.3 Conditions estivales

Les serres en période estivale nécessitent beaucoup de ventilation afin de maintenir les cultures dans un environnement convenable à la croissance. Il arrive parfois que la ventilation ne soit pas suffisante. Un moyen mécanique d'apporter un ombrage supplémentaire permet alors de maintenir des températures de culture adéquates à la croissance des plantes. Cependant, les systèmes d'ombrage sont souvent en place de manière permanente et pour la durée de l'été. Le système d'injection par mousse liquide permet d'apporter un ombrage supplémentaire à la culture uniquement en cas de besoin et à des heures précises. L'application d'un ombrageant sur les toitures doit pouvoir se faire facilement, car il faut souvent recourir à cette technique pendant la période estivale (Turcotte, 2008).

3.4 Été 2004

3.4.1 Rayonnement global (W/m^2) avec et sans les gicleurs en fonction

Pour une journée type (21 juillet 2004), la figure 12 donne la quantité de rayonnement qui pénètre dans les serres (expérimentale et de référence), ainsi que le rayonnement global extérieur lorsque le système est en fonction. Puisque la position du soleil n'est pas la même le matin que l'après-midi, les données sont présentées pour le matin (8 h à 12 h) et pour l'après-midi (12 h à 16 h). La quantité de lumière est moindre de 8 h à 12 h dans la serre expérimentale pour la journée type. Cependant de 12 h à 16 h la quantité de lumière est plus élevée dans la serre expérimentale. L'emplacement des sondes et l'angle de pénétration du soleil ont un effet sur les données. La pellicule de solution moussante sur la surface de la membrane de polyéthylène influence aussi sur la lumière et son angle d'incidence. L'énergie totale qui entre dans la serre expérimentale est inférieure de 10 % entre 8 h à 12 h et de 3 % entre 8 h et 16 h.

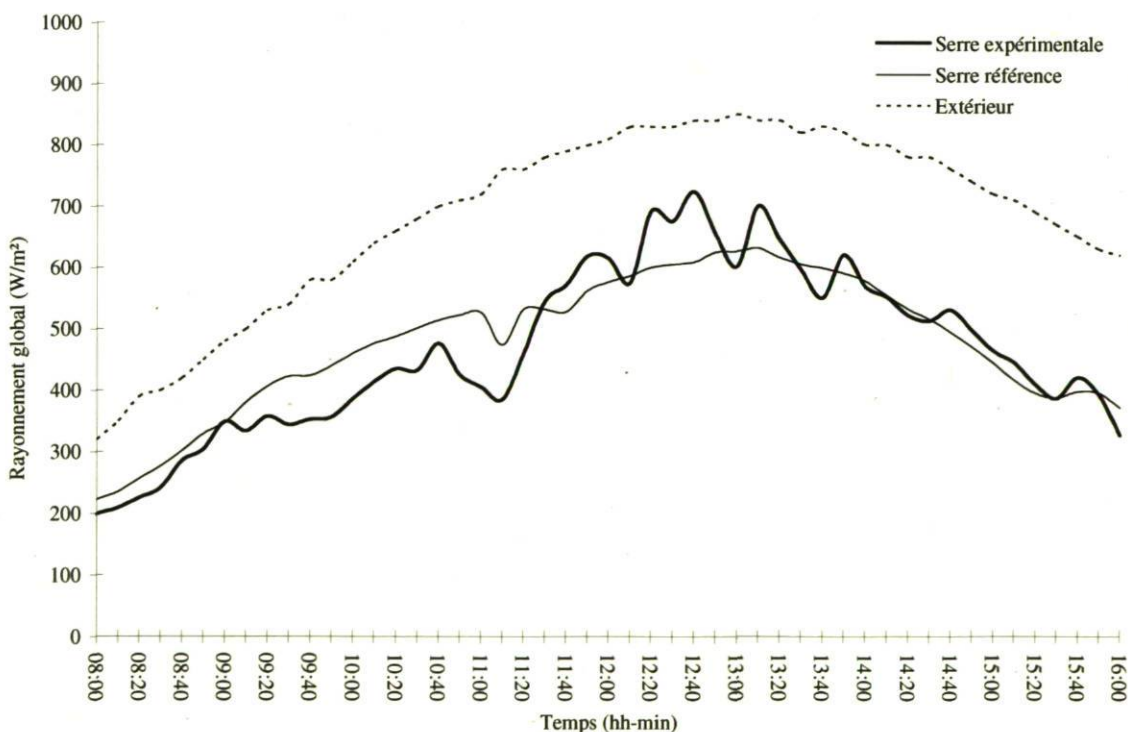


Figure 12 Rayonnement global (W/m^2) (avec gicleurs) le 21 juillet 2004

Le 24 juillet 2004, représente une journée type où les gicleurs ne sont pas en fonction (figure 13). Les données de rayonnement qui pénètre dans les serres (expérimentale et référence) lorsque les gicleurs ne sont pas en fonction y sont identifiées. L'énergie totale qui entre dans la serre expérimentale est égale à l'énergie totale qui entre dans la serre référence pour le 24 juillet 2004.

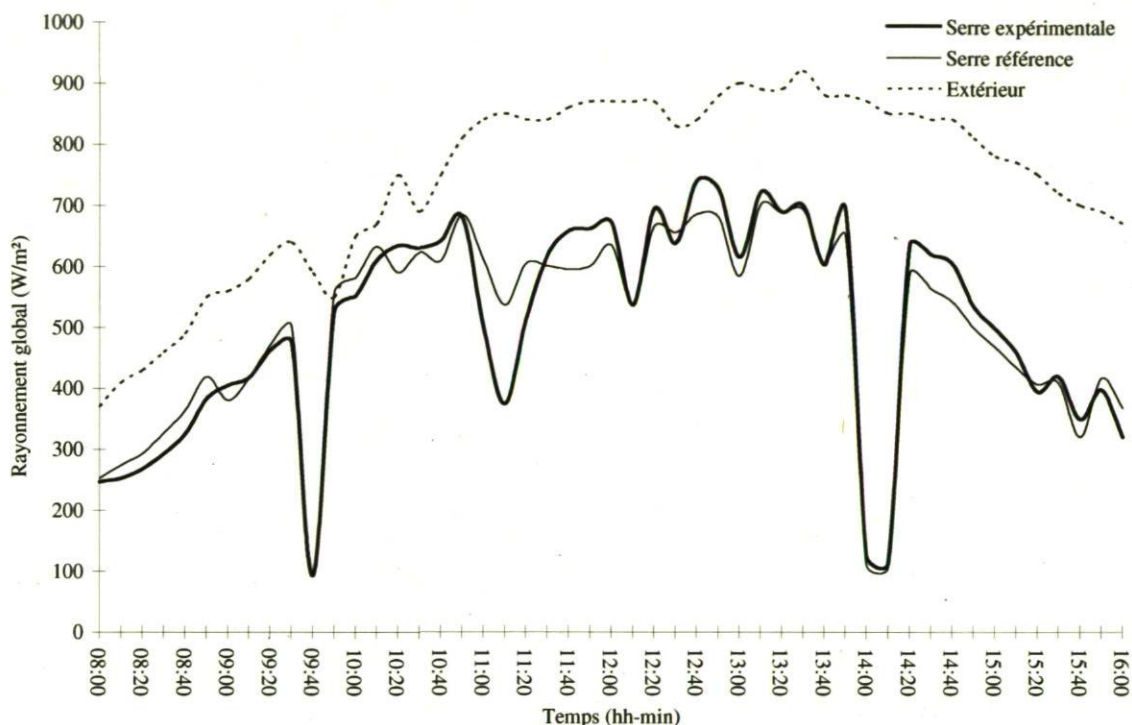


Figure 13 Rayonnement global (W/m^2) (sans gicleur) le 24 juillet 2004

3.4.2 Mesure de température avec et sans les gicleurs en fonction

Température de l'air lorsque le système est en fonction

La figure 14 présente la température de l'air pour la journée du 21 juillet 2004. La température de l'air de la serre expérimentale est inférieure de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ comparativement à celle de la serre de référence. Lorsque la température extérieure excède $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit la température de consigne de la ventilation, il devient impossible de maintenir cette température dans la serre. L'utilisation des gicleurs comme matériau ombrageant sur mesure permet de limiter l'augmentation de température dans la serre.

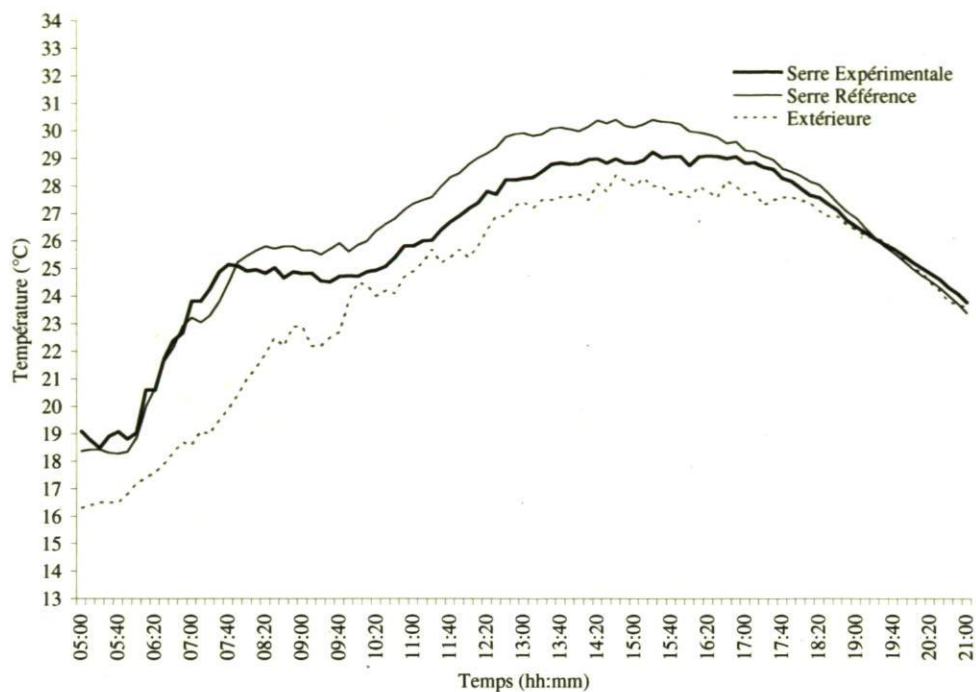


Figure 14 Température de l'air le 21 juillet 2004 (le système en fonction)

Température de l'air, sans gicleur en fonction

La figure 15 présente la température de l'air pour la journée du 24 juillet 2004. La température de l'air de la serre expérimentale et de la serre de référence est similaire tout au long de la journée. De plus, la température de l'air à l'intérieur de la serre n'excède pas 26 °C, soit la température de consigne du système de ventilation mécanique. Le maintien de la température est possible via la ventilation mécanique, car la température extérieure maximum atteinte dans la journée est de 23 °C.

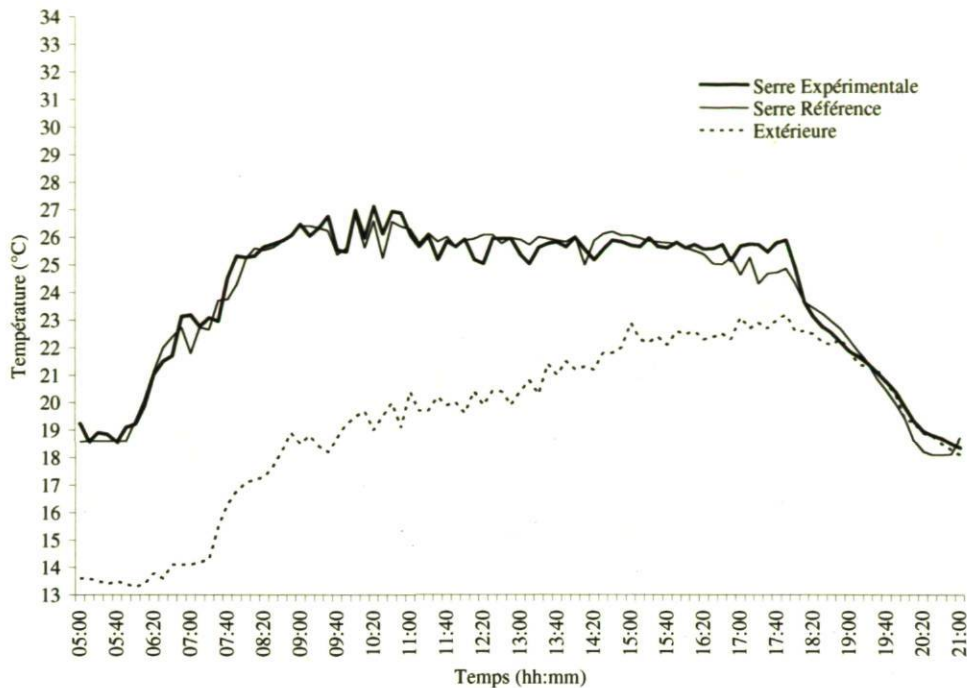


Figure 15 Température de l'air le 24 juillet 2004 (système éteint)

3.4.3 Analyse et discussion des résultats de l'été 2004

Les résultats obtenus lors des essais d'ombrage montrent qu'avec les gicleurs il est possible de réduire la quantité totale d'énergie qui pénètre dans la serre expérimentale lors d'une journée ensoleillée. Lorsque l'activité photosynthétique de la plante est presque saturée (97 %) une réduction de 25 % de la lumière totale dans la serre, réduit seulement de 4 % l'activité photosynthétique de la plante (*Faust, 2004*). La réduction moyenne a été de 3 % lors de l'analyse d'une journée typique (varie en fonction de la météo extérieure). Pour cette journée, il est important de signaler un ensoleillement complet, sans couverture nuageuse et que la température extérieure frôlait les 30 °C. L'impact de l'ombrage sur la température de l'air dans la serre est plus important le matin que l'après-midi. Lors d'une journée type sans gicleurs (le 24 juillet 2004) les serres (expérimentale et de référence) ont des conditions climatiques similaires.

L'ombrage influence directement la température de l'air dans la serre expérimentale, la température de la serre expérimentale est moins élevée que celle de la serre de référence

lorsque les gicleurs sont en fonction. L'utilisation d'un système d'ombrage rétractable permet de réduire la charge sur la culture et le système de ventilation d'une serre (A.J. Both, 2008). L'utilisation des gicleurs contribue à diminuer la température dans la serre expérimentale de 1,0 °C à 1,5 °C à certains endroits. La poursuite des mesures en période estivale (été 2005) permettra de confirmer ces observations.

3.5 Été 2005

3.5.1 Introduction résultats été 2005

Les mesures climatiques effectuées montrent que l'été 2005 à Québec a été un des plus chauds depuis plus de 50 ans (*Environnement Canada, 2005*). Il a eu 9 jours où la température a dépassé les 30 °C alors que la moyenne annuelle pour la ville de Québec est de 5 jours. De plus, la température moyenne observée au cours de l'été 2005 (1^{er} juin au 31 août) à Québec a été de 19,1 °C alors que la normale est de 17,9 °C pour cette période (*Environnement Canada, 2005*). Pour les producteurs en serres au Québec cela se traduit par un besoin d'ombrage encore plus important que par le passé.

Les résultats obtenus à l'été 2004 ont permis de constater un potentiel d'ombrage inférieur à 10 %. Cette valeur est inférieure à la valeur visée qui est de l'ordre de 20 à 30 %. Pour améliorer le système d'ombrage, quelques modifications ont été apportées au système. La plus grosse modification apportée est au niveau du protocole d'utilisation du système. Lors des essais d'ombrage à l'été 2004, seul un film de liquide (utilisation des gicleurs) fut utilisé pour créer une couverture d'ombrage tandis qu'à l'été 2005, ce fut une combinaison de mousse et d'un film de liquide (utilisation des gicleurs).

Pour cette étape du projet, un protocole d'utilisation du système d'injection de mousse liquide a été établi dans le but d'améliorer l'impact du système sur les plants de tomates. Les gicleurs sont en fonction entre 8 h et 11 h. De 11 h à 13 h, l'injection de mousse est faite de façon à avoir un effet d'ombrage de l'ordre de 40 % (60 à 70 % de la surface du toit est recouverte de mousse). Par la suite, les gicleurs sont remis en fonction jusqu'à 18 h. La programmation est automatisée, les gicleurs démarrent selon une minuterie programmable et l'injection de mousse démarre en fonction du seuil de lumière à

l'extérieur, lorsque celui-ci excède 500 W/m^2 l'injection de mousse se fait entre 11 h et 13 h.

3.5.2 Rayonnement global (W/m^2) avec et sans le système en fonction

Pour une journée type (6 juillet 2005), la figure 16 donne la quantité de rayonnement qui pénètre dans les serres (expérimentale et référence), ainsi que le rayonnement global extérieur lorsque le système est en fonction. Puisque la régie de fonctionnement a été modifiée par rapport à l'été 2004, les données sont présentées selon des plages horaires spécifiques. Soit, le matin de 8 h à 11 h (gicleurs seuls), le midi de 11 h à 13 h (fabrication de mousse sur 60-70 % de la surface du toit) et pour l'après-midi de 13 h à 18 h (gicleurs seuls). L'énergie totale qui entre dans la serre expérimentale est inférieure de 23 % par rapport à la serre de référence. Cette valeur correspond à la cible établie pour le protocole d'ombrage.

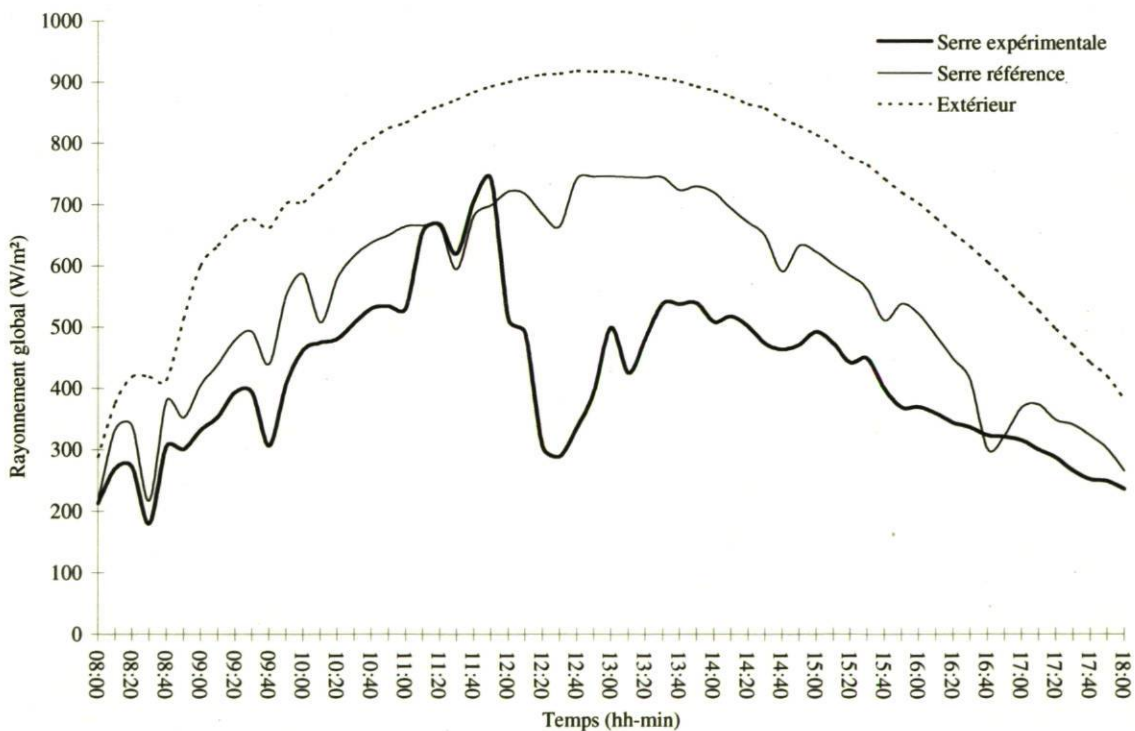


Figure 16 Rayonnement global (W/m^2) le 6 juillet 2005 (système en fonction)

La figure 17 démontre que lors d'une journée ensoleillée de l'été (9 juin 2005), lorsque le système n'est pas en fonction, la quantité d'énergie totale qui entre dans les serres

(expérimentale et de référence) est du même ordre de grandeur puisque les courbes du graphique se superposent.

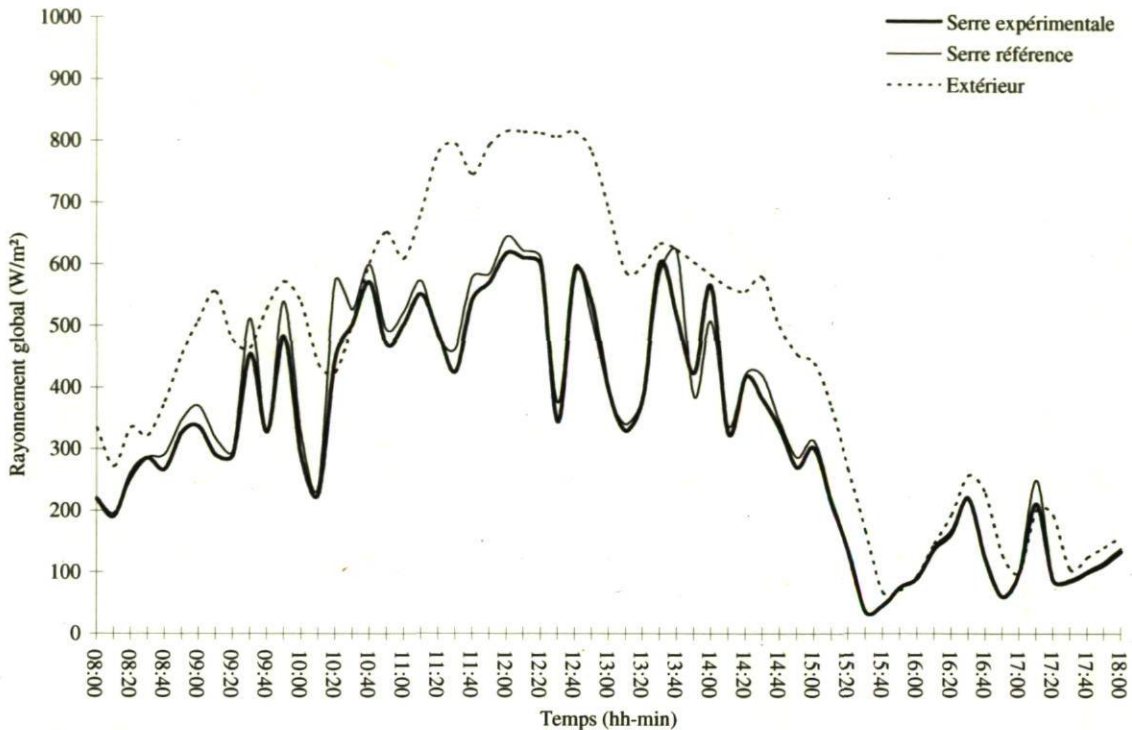


Figure 17 Rayonnement global (W/m^2) le 9 juin 2005 (système éteint)

3.5.3 Mesure de température avec et sans le système en fonction

Température de l'air lorsque le système est en fonction

La figure 18 présente la température de l'air pour la journée du 6 juillet 2005. La température de l'air de la serre expérimentale est inférieure de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ comparativement à celle de la serre référence. La serre expérimentale parvient à maintenir la température de consigne de la serre toute la journée. L'utilisation de la mousse liquide comme matériau ombrageant sur mesure permet de limiter l'augmentation de la température dans la serre et d'avoir une gestion améliorée sur le microclimat.

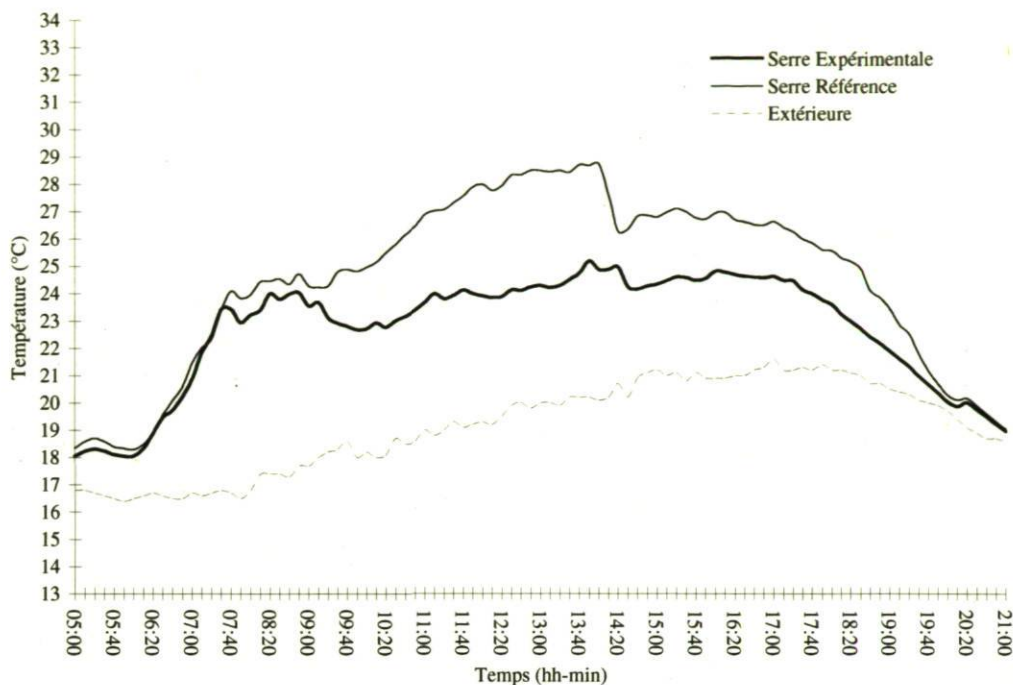


Figure 18 Température de l'air le 6 juillet 2005 (système en fonction)

Température de l'air, lorsque le système n'est pas en fonction

La figure 19 présente la température de l'air pour la journée du 9 juin 2005. Les températures de l'air de la serre expérimentale et de la serre de référence sont similaires tout au long de la journée. De plus, la température de l'air à l'intérieur de la serre demeure à près de 26 °C, soit la température de consigne du système de ventilation mécanique. Le maintien de la température est possible via la ventilation mécanique, car la température extérieure maximum atteinte dans la journée est de 23 °C.

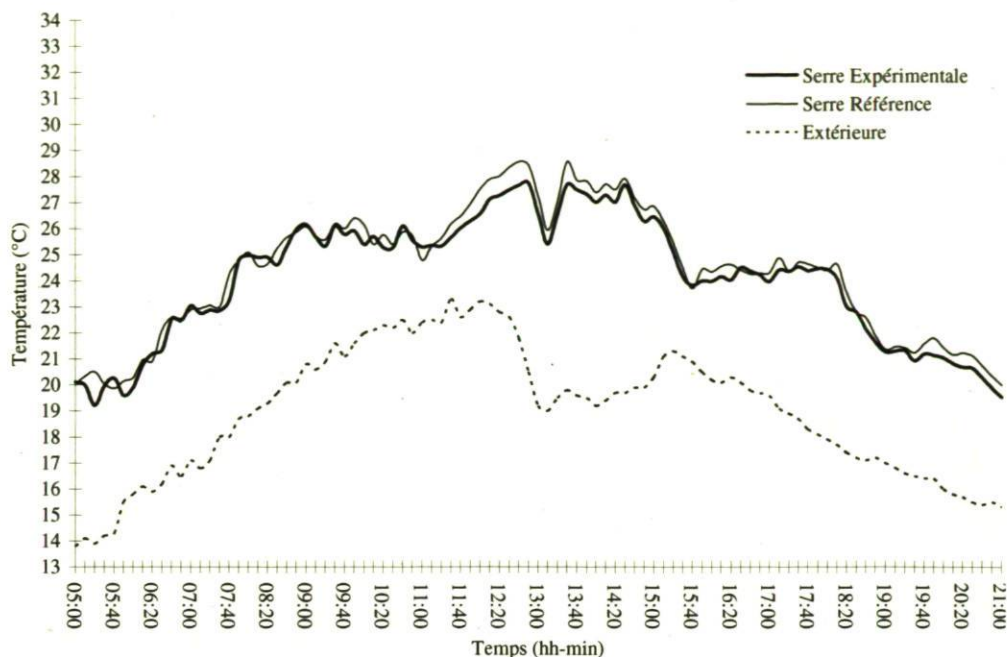


Figure 19 Température de l'air le 9 juin 2005 (système éteint)

3.5.4 Analyse et discussion des résultats de l'été 2005

La démonstration de l'injection de mousse liquide durant l'été 2005 a permis d'améliorer les résultats obtenus à l'été 2004. Le fait d'avoir des résultats pour deux étés permet de conclure que l'utilisation de la mousse liquide entre les parois d'une serre durant le jour contribue à faciliter la gestion du climat de la serre ce qui peut éventuellement hausser les rendements des cultures de tomates.

Lumière

Des données de rayonnement global (W/m^2) et de température moyenne de l'air dans les serres pour la période du 31 mai au 18 août 2005 ont été enregistrées. Le système a fonctionné de façon continue sans interruption sur cette période à l'exception du 9 juin 2005 (journée type utilisée pour comparer les serres lorsque le système n'était pas en fonction).

Le pourcentage d'ombrage est en moyenne de 22 % dans la serre expérimentale lorsque comparé à la serre référence. L'utilisation des gicleurs combinée avec la mousse liquide permet de créer une couverture d'ombrage plus importante dans la serre expérimentale

que dans la serre référence. Cela peut être expliqué par le fait que l'intensité de l'ombrage est modulée en fonction de l'intensité du soleil. Le matin, seuls les gicleurs sont en fonction et ces derniers créent une couverture d'ombrage sans mousse. À partir de 11 h, 60 à 70 % de la paroi est remplie de mousse liquide et le système s'arrête à 13 h, mais cette mousse ne disparaît pas instantanément. Les gicleurs prennent la relève et (13 h à 18 h) contribuent à maintenir l'humidité élevée entre les deux membranes. Cela a pour effet de maintenir la présence de la mousse sur une plus longue période et ainsi de créer une couverture d'ombrage plus importante en après-midi lorsque le rayonnement solaire est plus important.

Température

En ce qui a trait à la température de l'air dans la serre, la prise de données est faite à la même fréquence que pour la lumière. Les résultats obtenus démontrent que la température est inférieure dans la serre expérimentale, jusqu'à 4,0 °C. Une réduction de la température de l'air de 4,0 °C est considérable et possible lorsque les gicleurs sont combinés avec l'injection de mousse. La combinaison de liquide et de mousse permet donc de bloquer une grande partie de l'énergie pénétrant normalement dans la serre expérimentale.

Le système d'injection de mousse liquide permet de maintenir des niveaux de lumière constants le jour. Cela a pour effet de contribuer à la diminution de la température dans la serre et à une réduction des effets néfastes que peut avoir la température sur les cultures de tomates. L'utilisation d'une combinaison de gicleurs et d'injection de mousse liquide permet donc d'atteindre l'objectif de réduire la quantité d'énergie qui entre dans la serre de l'ordre de 20 et 30 % par rapport à la serre référence.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Il est très important de reproduire, avec le plus de précision possible, les climats intérieurs des deux serres. Le suivi constant du micro climat des serres (expérimentale et de référence) sur une période de 2 ans permet de comparer les deux serres entre elles de façon juste sur une période prolongée.

L'expérience menée à l'Université Laval a permis de déterminer une gamme de valeur du coefficient d'échange de chaleur global de la mousse liquide qui varie de 1.11 à 2.42 W/m²°C. La technologie d'injection de mousse liquide à l'étude est un produit qui permet d'obtenir des économies d'énergie en échange d'une dépense énergétique minimale pour le fonctionnement du système. Le fonctionnement du système sur une période de deux hivers consécutifs (2004-2005) a permis de réaliser des économies d'énergies importantes durant la nuit lorsque le système est en fonction (49 % en 2004 et 60 % en 2005).

La technologie permet aussi d'avoir un certain contrôle sur le microclimat de la serre en période estivale. Les mesures de lumière et de température prises dans la serre pour la période estivale permettent de constater qu'il est possible de modifier voire même d'exercer une certaine maîtrise sur le climat de la serre en été. L'avantage de pouvoir contrôler le climat d'une serre l'été comme l'hiver permet de choisir le type de culture qui est le plus favorable à la production en serre, en fonction de chaque région, basée sur la croissance de plantes, la qualité, mais aussi sur le prix de vente possible. Les recherches effectuées à l'Université Laval permettent de conclure sur les avantages que peut apporter l'ombrage sur mesure durant l'été. C'est-à-dire, une capacité de réduire la quantité totale d'énergie qui entre dans la serre par rayonnement de l'ordre de 22 %. L'utilisation d'une combinaison de gicleurs et d'injection de mousse liquide a permis de réduire la température de l'air de la serre expérimentale de l'ordre de 0,5 à 4,0 °C.

Les expériences menées sur une période de deux ans ont permis de conclure que l'utilisation de la mousse liquide comme matériau isolant la nuit n'a pas réduit la

pénétration de la lumière naturelle le jour dans la serre. La mousse liquide ne laisse donc aucune trace permanente sur la membrane de polyéthylène intérieure qui recouvre la serre expérimentale.

De plus, la mousse liquide, lorsque utilisée en combinaison avec l'éclairage artificiel permet d'augmenter la quantité de lumière artificielle utile à la plante en réfléchissant une partie de cette lumière vers l'intérieur de la serre. L'augmentation de la quantité de lumière a été de l'ordre de 6 %. En temps normal, cette lumière est perdue, car les membranes qui recouvrent la serre sont transparentes et ne permettent pas de réfléchir la lumière artificielle vers l'intérieur de la serre.

Le fait d'avoir deux saisons hivernales de mesures d'économie d'énergie (hivers 2004 et 2005) ainsi que deux saisons estivales (étés 2004 et 2005) de mesures d'ombrage et de température dans les serres, permet de conclure que l'utilisation de la mousse liquide entre les parois d'une serre lors de périodes nocturnes contribue à diminuer les besoins en chauffage et de faire de l'ombrage sur mesure dans la serre expérimentale sans effets négatifs sur les rendements des cultures de tomates.

La technologie d'injection de mousse liquide pour les serres agricoles peut s'adapter à une multitude de structures existantes. Cette technologie permet d'avoir un meilleur contrôle sur le microclimat de la serre en réduisant la consommation d'énergie la nuit l'hiver et en réduisant la température le jour l'été.

Pour donner suite aux expériences menées avec cette technologie sur les serres expérimentales de l'Université Laval à Québec en 2004 et 2005, plusieurs autres travaux de recherches sur la technologie ont été menés au Québec et en Ontario. Une brève description de ces travaux est détaillée en annexe.

BIBLIOGRAPHIE

- Aberkani, K., 2009, Étude des effets d'une mousse isolante et ombrageante placée entre les deux films de polyéthylène d'une serre sur la transmission lumineuse et la qualité spectrale, le microclimat, la physiologie d'une culture de tomate et de poivron et l'économie d'énergie, Département de phytologie, Faculté de sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval.
- Both, A.J., 2008, Greenhouse Temperature Management, New Jersey Agricultural Experiment Station.
- ASABE, 2003a, Standards 50th Edition (EP406,4 JAN03), Greenhouses, Heating, Ventilating and Cooling, St-Joseph, MI, USA.
- ASABE, 2003b, Standards 50th Edition (EP460 FEB 03), Commercial Greenhouse Design and Layout, St-Joseph, MI, USA.
- ASHRAE, 1993, Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta GA, USA.
- ASTM, 2003, Standard Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box. American Society for Testing Materials.
- Bakker, et al, 1995, Greenhouse Climate Control: an Integrated Approach, Les Pays-Bas, 279p.
- Brau, J., 2006, Transferts de chaleur « multimodes », INSA de Lyon, 105p.
- Brumfield, R.G., 2007, The Impact of High Energy Costs and What to do About It?, Farm Management News & Views (Mars, Vol. 9, No. 1).
- De Herde, 2004, Architecture et Climat - Place du Levant, Louvain-La-Neuve, www-energie.arch.ucl.ac.be.
- Environnement Canada, 2005, Service météorologique du Canada, Sciences atmosphériques et enjeux environnementaux – CRIACC.
- Faust, J., 2004, Managing Retractable Shade Curtains, Greenhouse Product News (Volume: 14 Number: 7).
- Gosselin, A. et Dansereau, B., 2001, Cultures en serre, Notes de cours, 397p.
- Le Cadre, S., 2006, Alternatives au gaz pour le chauffage des serres, INP-ENSAT, 7p.

- Papadopoulos, A.P. et Hao, X.M., 1997, Effects of Three Greenhouse Cover Materials on Tomato Growth, Productivity, and Energy use. *Scientia-Horticulturae* (70:2-3).
- Statistique Canada, 2007, Industries des cultures de serre, des gazonnières et des pépinières (N°22-202-XIB), 30p.
- Swinton, M.C., et al., 2004, Determination of the Thermal Resistance of Three Sunarc Dynamic Foam Insulations (B-1235,1). Conseil national de recherches du Canada.
- Turcotte, G., 2007, Tom'Pousse No 12, www.agrireseau.qc.ca, 4p.
- Turcotte, G., 2008, La culture en serre du poivron, ISBN 978-2-7649-0204-2, 90p.
- Villeneuve, J. et al., 2005, Concept of Dynamic Liquid Foam Insulation for Greenhouse Insulation and the Assessment of its Energy Consumption and Agronomic Performances. *Acta Horticulturae* (691: 605-610).
- WTI, 2009, West Texas Intermediate Historical Data, www.nymex.com.
- Wijnands, J., 2001, The Product Chain of Fresh Tomatoes, Peppers, Cucumbers. ISHS, Leuven. *Acta Horticulturae* (no 611: 79-90).
- Wuillays, D., 2007, Le défi de l'énergie dans les serres, Le conseil régional du centre, 27p.
- Zhang, Y., et al., 1996, Effect of Covering Materials on Energy Consumption and Greenhouse Microclimate, *Agricultural and Forest Meteorology* ISSN 0168-1923, CODEN AFMEEB (vol. 82, n°1-4).

ANNEXE I

RESUMÉ DU MÉMOIRE DE SOPHIE MASSIE SUR LES TRAVAUX RÉALISÉS DANS UNE SERRE DE BLAINVILLE.

L'expérience réalisée durant l'été 2007 à Blainville a pu mettre en évidence les impacts de la technologie ombrageante de Sunarc sur le rendement de trois espèces horticoles (roquette, betterave et chicorée). Cette étude a également permis de comparer la technologie Sunarc avec deux autres technologies ombrageante, soit les écrans thermiques et les bandes ombrières fixes. Les écrans thermiques ainsi que la technologie Sunarc ont donné de bons rendements chez les trois espèces, entre autres à cause de l'application de l'ombrage sur demande. La technologie Sunarc a permis une plus grande transmittance dans le rayonnement global et dans le rayonnement photosynthétique (PAR). En revanche, les écrans tendaient à accumuler beaucoup de poussière ce qui a eu pour effet de diminuer significativement la transmittance. Pour leur part, les bandes ombrageantes appliquées en permanence ont permis de diminuer significativement le rayonnement global lorsque les plantes avaient intérêt à bénéficier de plus de lumière, c'est-à-dire par temps nuageux et en matinée. Par conséquent, les espèces ont donné moins de rendement sous ce traitement. Le détail de ces résultats sera disponible une fois le mémoire officiel déposé et rendu public.

ANNEXE II

SOMMAIRE EXÉCUTIF DES TRAVAUX RÉALISÉS AU CENTRE DE RECHERCHES SUR LES CULTURES ABRITÉES ET INDUSTRIELLES À HARROW EN ONTARIO.

Le climat de l'Ontario est un climat continental caractérisé par des hivers froids et des étés chauds. Pour produire des légumes en serres avec succès, une quantité significative de chauffage est requise l'hiver, de plus l'été la charge de refroidissement / ombrage / ventilation est considérable dans le but de maintenir un microclimat favorable dans la serre. Un système d'injection de mousse liquide fut développé par Sunarc du Canada. L'utilisation de cette technologie permet l'injection d'une mousse liquide dans l'espace entre les deux parois de polyéthylène dans but d'augmenter l'isolation la nuit l'hiver pour réduire les pertes de chaleur et l'été pour faire de l'ombrage dans but de l'améliorer le micro climat de la serre. Avec le support de Sunarc du Canada, Ontario greenhouse

vegetable growers (OGVG), Union Gas et le programme de partage des frais pour l'investissement (PPFI) de Agriculture et Agroalimentaire Canada, le projet a débuté au mois de mars 2006 dans le but d'évaluer les performances du système et de développer de nouvelles stratégies d'ombrage.

Trois serres identiques (6,4 m x 7,3 m) et indépendantes au centre de recherche ont été modifiées et équipées de système d'isolation et d'ombrage par mousse liquide de Sunarc du Canada. Trois systèmes de suivi du microclimat et de la consommation d'énergie ont été développés et installés dans les serres. Le fonctionnement du système fut intégré à l'ordinateur de contrôle du climat de marque « Priva ». Une première expérience sur les tomates et les poivrons a eu lieu de juin à septembre 2006 dans les trois serres dans le but de développer des nouvelles stratégies d'ombrages. Une serre de référence est comparée à deux stratégies d'ombrage (Ombrage 1 et Ombrage 2) qui sont contrôlées en fonction de la température de l'air de la serre et du rayonnement solaire extérieur. Le système entre en fonction uniquement lorsque le rayonnement solaire excède 800W/m² (avant 13 h heure l'été) ou 700W/m² (après 13 h). Pour la stratégie d'ombrage 1 le système de rinçage était activé dans le but d'offrir 5 à 10 % d'ombrage lorsque la température de serre excédait 24 °C, et la mousse était injectée, dans le but de fournir 50 % d'ombrage, lorsque la température excédait 27 °C. Pour la stratégie d'ombrage 2, le système de rinçage était activé dans le but d'offrir 5 à 10 % d'ombrage lorsque la température de serre excédait 27 °C, et la mousse était injectée, dans le but de fournir 50 % d'ombrage, lorsque la température excédait 30 °C.

ANNEXE III

PROJET DE DÉMONSTRATION COMMERCIALE EN ONTARIO

Serre à Chatham, Ontario : Serre agricole en production de poivrons dans la région de Leamington. Le projet a eu lieu sur 2 chapelles (6,4 m x 107,9 m) sur une période de 18 mois avec une section de taille identique à titre de référence. L'entreprise Agviro s'est chargée de l'analyse et la publication des données qui sont disponibles dans les archives de Sunarc du Canada.

Serre à Leamington, Ontario : Serre agricole en production de tomates dans la région de Leamington. Le projet a eu lieu sur 7 chapelles (7,3 m x 68,3 m) sur une période de 12 mois avec une section de taille similaire à titre de référence.

ANNEXE V: ISHS ACTA HORTICULTURAE 691

CONCEPT OF DYNAMIC LIQUID FOAM INSULATION FOR GREENHOUSE INSULATION AND THE ASSESSMENT OF ITS ENERGY CONSUMPTION AND AGRONOMIC PERFORMANCES

J. Villeneuve¹, D. de Halleux¹ and A. Gosselin²
¹Département des Sols et de Génie Agroalimentaire
²Département de Phytologie
Université Laval
Québec, Canada

D. Amar
Research and development
SUNARC of Canada
Montréal, Canada

Keywords: Greenhouse, Energy saving, Cover material, Insulation, Foam

ABSTRACT

Energy savings have always been a major concern in the greenhouse industry, particularly for northern tier growers. Better greenhouse insulation delivers an efficient method for energy savings. The injection of dynamic liquid foam insulation between two greenhouse membranes is a technology leading to significant increase in greenhouse insulation. The objective of this paper is to demonstrate the feasibility of this technology in a pre-commercialisation environment and to present its performances in energy savings and plant growth. Laboratory testing has demonstrated that the foam produces an increasing insulation factor which is proportional to the thickness of the foam injected between the two membranes. Results recorded during the winter season include comparative studies of climate conditions and energy savings of the prototype and non-retrofitted greenhouse.

Within a full season of production, it would be possible to confirm the technical feasibility of injecting and circulating liquid foam between two greenhouse film membranes. Energy savings results predicted in laboratory conditions and scientific models are confirmed by this experiment in pre-commercialisation settings. Current data, collected in winter season, suggest energy savings of over 50%. Also, the impact of the use of such technology on plant growth would be obtained with a plantation of Tomato (*Lycopersicum esculentum*).

INTRODUCTION

Maintaining an adequate temperature within commercial greenhouses requires large amounts of energy during the winter in northern latitude. In many cases the amounts of energy used to heat a greenhouse year round represents the main component of total production cost. With rising prices of fossil fuels, reduction of energy consumption is vital in order for producers to remain competitive. According to published research improving the insulation values of cover materials is one of the most efficient methods to conserve energy in greenhouses. Many technologies have been developed to lower energy consumption within commercial greenhouses (Papadopoulos and Hao, 1997, Bakker et al., 1995, Oliveira et al., 2001) with the most common being used in cold regions is the double infrared polyethylene covers. Using a double infrared polyethylene

and thermal screen in combination with single glass will reduce heat loss, but more can be done.

A dynamic liquid foam insulation system can be adapted to an existing greenhouse structure with little difficulty. This type of system has the potential to become an excellent solution for growers who have high energy bills. Further more, when used on sunny days during summer time liquid foam is a solution for shading inside the greenhouse.

The objective of this work is to compare two single gothic type greenhouses, one equipped with a dynamic liquid foam system (prototype greenhouse) and one without (reference greenhouse), and to measure energy saving potential as well as agronomic performances.

MATERIALS AND METHODS

Experimental setup

A conventional Nordic type greenhouse (24,4 m long x 6,4 m wide x 3.05 m gutter) covered with double infrared polyethylene film (PE) was modified to accommodate the installation of a dynamic liquid foam generating system (figure 1). This prototype greenhouse and a second identical greenhouse are equipped with natural gas furnaces and two forced air circulation fans. High-pressure sodium lamps of 470 W are used to assure an adequate photoperiod. Liquid foam is injected just before nightfall and removed early the next day immediately after sunrise.

A hydroponic culture of tomatoes was sowed on February 24th, 2004 in a nursery greenhouse and was planted in each of the test greenhouses a month later on March 24th, to reproduce typical commercial growing conditions. Before planting the tomatoes plants in the greenhouses the heating units were set to maintain temperatures of 21°C at night and 24°C during light hours (sunlight + artificial lighting). After March 24th, temperatures were maintained at 18°C at night and 24°C during sunlight. Agronomic parameters of tomato production such as tomato yield, fruit number, the number of clusters, the distance between cluster (cm), the distance between internodes (cm) and the plant growth (cm) in both greenhouses were recorded in order to complete the comparative study of the two plantations.

To monitor the inside climate, three temperature sensors ($\pm 0.2^\circ\text{C}$ from 0° to $+50^\circ\text{C}$) and one relative humidity ($\pm 3\%$) sensor were placed in aspiration cages. A quantum sensor was used to measure photosynthetically active radiation (PAR, $\pm 5 \mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$) and a pyranometer used to measure solar global radiation ($\pm 5 \text{W/m}^2$). During winter months and when liquid foam is to be removed trough the day period, these measures are necessary to characterise and compare solar transmission in both greenhouses. For the summer period these measure are used to evaluate the effects of creating shade with liquid foam.

The amount of consumed natural gas, in cubic meters, was carefully measured independently in each greenhouse before injection of liquid foam and again after its removal at sunrise. Energy used by the dynamic liquid foam system in the generation of the liquid foam was also recorded. The level of liquid foam remaining inside cavity before its removal, at sunrise, was observed and noted.

One temperature ($^{\circ}\text{C}$) sensor, a pyranometer to measure solar radiation (W/m^2) and an anemometer for wind speed (m/s) were used to monitor external climate.

Heat transfer coefficient (R-value)

1. Test description, To determine the heat resistance of the dynamic liquid foam insulation, measurements were made in controlled laboratory conditions (Swinton, 2004) by the Institute for Research in Construction (a division of the National Research Council, in Ottawa, Canada). The standard test method for determining the thermal performance of walls is ASTM C-236 (ASTM, 2003). Given the variable nature of liquid foam over time, its R-value cannot be evaluated under steady state conditions. The test wall outer surfaces were instrumented with both thermocouples and heat flux transducers in order to aid, respectively, in the determination of the thermal resistance, and in the localized heat flux across the test wall during a 3-hour period, during which the wall was kept filled with foam and drained of liquid accumulation.

For this test, a 2.5 m x 2.5m perimeter-framed wall was built with 5 cm x 15 cm wood pine members. Room- and weather-side skins were of 0,6 cm thick Lexan polycarbonate sheathing clad over the perimeter frame. A foam generator was connected to a manifold placed in the top and centre of the wall cavity. A sloped drain was set up on the bottom to remove the excess liquid. The weather-side temperature was set at minus 18°C and the room side at $+20^{\circ}\text{C}$. Heat resistance (R-value) was measured and calculated from the room-side to the weatherside surface.

2. Results, the cumulative thermal resistances of the various surfactant tested over a three hour period were from 0.35 and $0.76 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

RESULTS AND DISCUSION

Energy saving, relative humidity and light transmission

1. Winter period, Energy consumption values were analysed for a number typical days of February and March when the system was operating at near 100% efficiency at nightfall.

Table 1 presents nocturnal temperatures as well as energy consumption and overall heat transfer coefficients (U) of the prototype and reference greenhouses. The calculation of the U-value considers the overall surface of the greenhouse (roof + side and end walls = 415m^2) and the average difference between the exterior temperature and temperature inside the greenhouse for the studied period. The coefficient (U) is calculated as follows:

$$U = \frac{\text{Energy Consumption}}{\text{Greenhouse surface} * \Delta T_{\text{average}}}$$

For the selected periods, the average U-Value when liquid foam was injected in the cavity was ($2.26 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$) 42.5% inferior to the average U-Value when there was no liquid foam present ($3.93 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$). It is important to acknowledge that the data was collected at nighttimes during the months of February and March. Consequently, the results do not take into account the coldest periods of the year in the months of December and January when average temperatures in the region of Quebec city often drop below -

15°C during the day and -20°C at night. The insulation performance measurements of liquid foam during these intense cold periods would only take place next winter. Additionally, because of the improved insulation of the prototype greenhouse, it was observed that when the set temperature is changed at nightfall from 22°C to 18°C, the temperature inside the reference greenhouse drops much faster than the temperature in the insulated prototype greenhouse.

For the winter period where no tomato culture was present, liquid foam had no noticeable effect on RH inside the prototype greenhouse. Therefore no significant difference between the two greenhouses was registered. With the presence of tomato culture in early April, higher RH values were measured in the prototype greenhouse when liquid foam was injected at night. This can be explained by the fact that the membranes surfaces in the insulated greenhouse are warmer therefore limiting condensation. These differences are no longer noticeable during warmer days.

Liquid foam can significantly influence the transparency of the prototype greenhouse cover materials; therefore the liquid foam insulation must be completely removed at sunrise and only be injected at sunset to avoid any light or heat loss. Figure 2 presents global radiation outside and inside the greenhouses on a typical day (March 13, 2004). It is noticed that the global radiation measured inside the prototype greenhouse is slightly lower (5.1 %) than in the reference greenhouse. This can possibly be explained by the presence of foam or solution residues on the membranes.

2. Summer period. Liquid foam can be very practical during summer months if used as a shading material. As a matter of fact aluminised thermal screens are not habitually used within double polyethylene greenhouses and liquid foam could present an alternative to fix shading. Preliminary experimentation with only a liquid film injected between the cavities has resulted in a 20 to 30% shading effect. When liquid foam is injected between the cavities of the greenhouse, the shading effect is of 60 to 75 %. The use of liquid foam to create shading could prolong the length of the period where carbon dioxide is used to enrich crop growth by diminishing the need for ventilation.

Agronomic aspects

As the tomato plantation took place in late March, conclusive results on the influence of the liquid foam on plant growth have not been reached. However, analysis of measured climatic parameters (temperatures, radiation, humidity...), as well as preliminary data collected during the first 4 weeks of crops suggests similar productivity rates in the two greenhouses. Nevertheless, only a study carried out over a complete season and using controlled optimization of foam insulation will validate the full benefits of the liquid foam insulation technology. Also, it should be noted that the use of this technology would require a control programme for plants and ventilation by adapting among others operation schedule for artificial lighting in winter or CO₂ enrichment in summer.

CONCLUSION

In times of rising energy costs it is important to find alternatives for reducing heating costs and increase productivity of greenhouse cultivation. The use of liquid foam insulation injected between two layers of PE film has demonstrated its energy savings

potential in lab testing by providing low thermal conductivity values. The feasibility and technical demonstration of this technology in a large-scale trial greenhouse are currently in progress. Already, energy savings potential were demonstrated this past winter. Liquid foam generated at night times, provided increased insulation resulting in energy savings of 42%. An improvement in the control of foam generation and removal could lead to energy savings of more than 50% at night. Also, it was discovered that when using liquid foam technology, relative humidity inside the prototype greenhouse, at the end of the winter period, was higher while light transmission was lower (< 5%). With regard to the tomato culture, it is still too early to assess crop production, which currently suggests no significant differences between the two greenhouses.

The continuation of these experiments with a greenhouse producer in a pre-commercialisation setting during a full year is the next step. This would enable us to better manage the deployment of the liquid foam generation so to precisely quantify the associated energy savings and its effects on yearly tomato plant yield in a commercial greenhouse setting. Finally, projected tests with a greenhouse producer could validate the technology for commercial use.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank The National Research Council with the Industrial Research Assistance Program (NRC-IRAP), the Agence de l'efficacité énergétique and Les serres Harnois for their technical and financial support.

Literature Cited

- ASTM, 2003. Standard Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box. American Society for Testing Materials.
- Bakker, J.C., Bot, G.P.A., Challa, H. and Braak (van de), N.J. 1995. Greenhouse climate control: an integrated approach. 1995, 279 pp.
- Papadopoulos, A.P. and Hao X.M., 1997. Effects of three greenhouse cover materials on tomato growth, productivity, and energy use. *Scientia-Horticulturae*.70:2-3, 165-178.
- Oliveira (de), C.E.L., Garcia, J.L., Navas, L.M., Munoz, M.A., Benavente, R.M. and Plaza (de la), S. 2001. Energy saving in greenhouses with plastic coverings. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current Trends for Sustainable Technologies, Cartagena-Almeria, Spain, Acta-Horticulturae* 559:239-242
- Swinton, M. 2004. Determination of the Thermal Resistance of Three Sunarc Dynamic Foam Insulations. Institute for Research in Construction.

Tables

Table 12: Energy consumption at night in the prototype and reference greenhouses

Date	Night temp (°C)	Consumption (KWh)		Heat transfer coefficient (W/m ² °C)	
		Prototype	Reference	Prototype	Reference
Febr. 6	-7.0	376	695	2.14	3.93
Febr. 25	-7.3	347	592	2.33	4.10
March 2	3.5	244	394	2.59	4.61
March 9	-7.6	301	526	1.99	3.60
March 10	-4.0	310	460	2.33	3.46
March 11	-0.6	225	469	1.92	4.10
March 14	-2.8	366	554	2.21	3.42
March 15	-6.7	376	601	2.55	4.18
Average U value (W/m²°C)				2.26	3.93

Figures

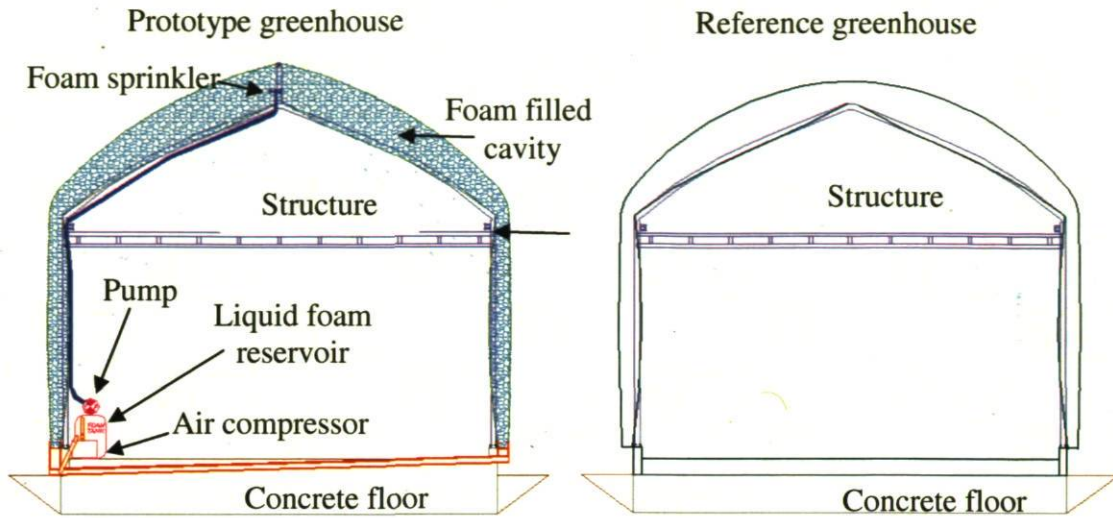


Fig. 1: Schematic view of the prototype and reference greenhouses

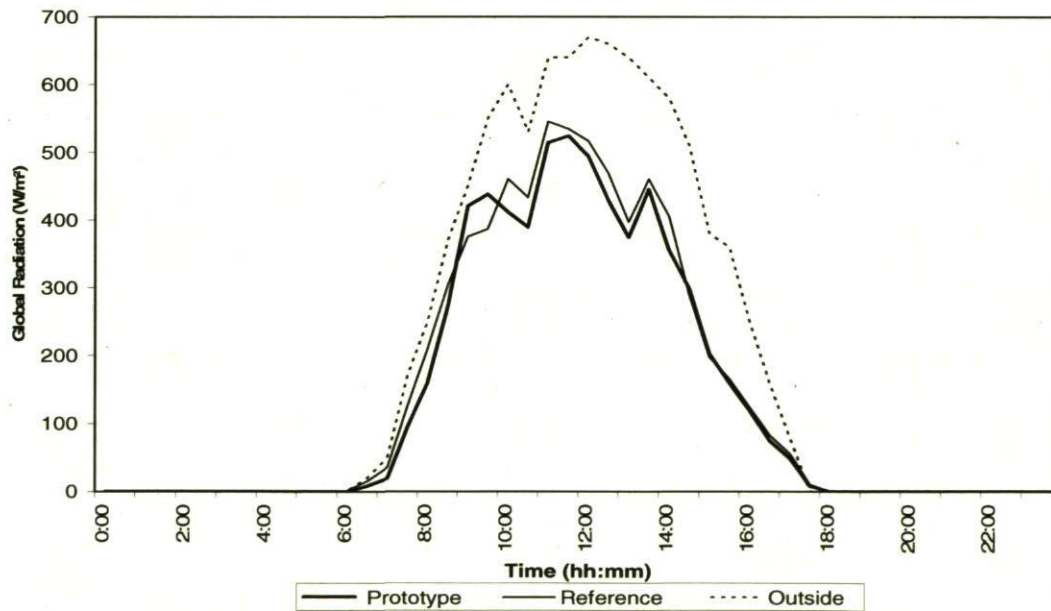


Fig. 2 : Global radiation outside and inside the prototype and reference greenhouses.