

COLLOQUE SUR LA PRODUCTION PORCINE

Savoir pour mieux planifier l'avenir !

4 novembre 2003, Saint-Hyacinthe

Une initiative du
Comité production porcine

Évaluation de l'efficacité technique et économique d'un mur solaire dans un bâtiment d'élevage porcin

Francis POULIOT, ingénieur
Responsable du domaine des bâtiments et de l'environnement

Centre de développement du porc du Québec (CDPQ) inc.
Sainte-Foy (Québec)

Conférence préparée avec la collaboration de

Henri GUIMONT, agronome, **Réjean LEBLANC**, agronome, **Joël RIVEST**, M.Sc.
Centre de développement du porc du Québec (CDPQ) inc.

Stéphane GODBOUT, ingénieur et agronome, Ph.D.
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

Réal SAVARIA, diplômé en génie rural, M.Sc.
Énerconcept

Autres collaborateurs impliqués dans le projet :

Isabelle LACHANCE, CDPQ
François LÉVEILLÉ, **Frédéric PELLETIER**, M.Sc., **Rock JONCAS**, ing., IRDA



Note : Cette conférence a été présentée lors de l'événement et a été publiée dans le cahier des conférences.

Pour commander le cahier des conférences, consultez
[le catalogue des publications du CRAAQ](#)

ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE D'UN MUR SOLAIRE DANS UN BÂTIMENT D'ÉLEVAGE PORCIN

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce au support financier du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Nous tenons à remercier M. Mario Berthiaume, propriétaire de la Ferme Marisol qui a été l'hôte de ce projet. Merci également à M. Francis Blouin, gérant de la ferme, pour son implication au projet et sa contribution dans la cueillette des données.

INTRODUCTION

Avec l'augmentation des coûts de l'énergie fossile, les producteurs de porcs cherchent à optimiser leurs coûts de chauffage pour demeurer compétitifs. Pour répondre à ce besoin, il est important d'apporter des solutions pour réduire ces coûts. Le climat froid et rigoureux du Québec impose l'utilisation d'un système de chauffage d'appoint dans les bâtiments porcins durant la saison froide.

Selon Pouliot (2001), la consommation d'énergie reliée au chauffage représente environ 10,27 \$ par truie en maternité, 0,58 \$ par porcelet produit en pouponnière et 0,66 \$ par porc produit en engraissement, selon les modèles de l'ASRA 1998-1999. La rationalisation des coûts de chauffage implique, entre autres, une gestion accrue de la ventilation minimum par temps froid, un choix judicieux de la température de consigne, une étanchéité et une isolation adéquates du bâtiment, ainsi que des sources d'énergie alternatives plus économiques.

Compte tenu des conditions locales prévalant au Québec et des coûts sans cesse croissants des combustibles, l'énergie solaire semble être une alternative intéressante pour combler, du moins en partie, les besoins de chauffage dans les bâtiments porcins.

Le mur solaire constitue un type de chauffage connu dans le milieu industriel et institutionnel au Québec depuis environ une dizaine d'années (Savaria, 2003). Toutefois, les stratégies de contrôle issues du milieu industriel sont très différentes comparativement aux bâtiments porcins. Ces différences sont occasionnées par les méthodes de construction, les débits de ventilation, les besoins en chauffage, les stratégies de contrôle de la ventilation et du chauffage variant en fonction du poids des animaux, les objectifs de production et les conditions d'ambiance.

Selon le manufacturier du système « SOLARWALL® » (voir figure 3), système évalué dans le cadre de ce projet, les performances techniques et économiques attendues dans le milieu industriel pour ce type de mur solaire sont les suivantes (Solarwall, 2003) :

- Pour ce qui est de la transformation du rayonnement solaire en chaleur, l'efficacité du système est évaluée à plus de 75 % par temps ensoleillé;

- Durant une journée ensoleillée, la température de l'air à la sortie du mur solaire peut être augmentée de 16 à 40 °C selon le débit d'air;
- Durant les journées nuageuses, le mur solaire engendre des économies d'énergie significatives;
- Une installation typique produit de 500 à 700 kwh/m² d'énergie;
- Les économies d'énergie vont de 10 \$ à 60 \$/m² de surface de mur durant la saison au cours de laquelle le chauffage est requis; si le mur solaire est utilisé pour le chauffage de l'air, les économies sont encore plus grandes;
- Le retour sur l'investissement se réalise sur une période variant de 1 à 6 ans pour la plupart des installations.

Dans le milieu agricole, peu d'informations ont été trouvées dans la littérature au sujet des murs solaires. Certaines recherches américaines ont été effectuées sur le sujet, mais elles sont difficilement applicables au système de mur solaire étudié dans ce projet.

De plus, l'utilisation d'une technologie solaire pour le préchauffage de l'air entrant dans les bâtiments pourrait réduire les émissions de CO₂, qui est un GES, engendrées par le secteur porcin. En effet, le propane est principalement utilisé pour chauffer les bâtiments porcins. La combustion, même parfaite, de ce combustible génère une quantité importante de gaz carbonique.

Par conséquent, l'objectif général du projet est d'évaluer l'efficacité technique et économique d'un concept de mur solaire installé dans une pouponnière en production porcine. Les objectifs spécifiques du projet étaient :

- D'établir un bilan de chaleur pour un mur solaire dans des conditions d'opération hivernales;
- D'évaluer l'apport de chaleur utile pour préchauffer l'air en ventilation hivernale;
- D'évaluer l'impact économique sur le coût de chauffage et le seuil de rentabilité économique;
- D'évaluer l'impact dans une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre;
- De recommander des adaptations possibles afin d'optimiser le système.

DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS ET DE LA MÉTHODOLOGIE

Bâtiment et animaux

La période d'expérimentation a eu lieu du 1^{er} novembre 2002 au 1^{er} mai 2003, dans une pouponnière construite en 2001, située à Saint-Sylvestre-de-Beaurivage à la Ferme Marisol senc. Le bâtiment a les dimensions suivantes : 28,6 m de long et 14,6 m de large (figure 2). Il a une capacité totale de 1000 porcelets répartis dans quatre chambres indépendantes contenant chacune 12 parcs de 2,13 m × 3,05 m. Chaque chambre, contenant 250 porcelets, fonctionne en tout plein/tout vide.

La ventilation minimum est de type « extraction basse » et les entrées d'air sont de type « plafond diffuseur », lesquelles communiquent avec un corridor de préchauffage de l'air situé dans l'entretoit. Il s'agit d'une pouponnière chaude dont la consigne de température variait avec l'âge des porcelets, selon la charte d'ajustement fournie par le conseiller technique de la ferme. Le débit minimum de ventilation était ajusté de façon à maintenir une bonne qualité d'air par temps froid. Chaque chambre avait comme chauffage d'appoint un aérotherme de 17,6 kW afin de maintenir la température désirée dans la pièce par temps froid.

Dans le cadre du projet, les porcelets entraient à un poids moyen de 5,3 kg et ils étaient transférés en engraissement à 25,3 kg de moyenne. Trois lots de porcelets ont été introduits dans la pouponnière et la durée de croissance des porcelets était de 50 jours en moyenne.



Figure 1. Intérieur d'une chambre de pouponnière

Le bâtiment possède un corridor de préchauffage au niveau de l'entretoit sur toute sa longueur (28,6 m), dont la largeur est de 1,21 m et la hauteur de 1,82 m. Il est isolé avec une épaisseur de 0,102 m de laine minérale (figure 3). Dans le corridor, étaient installés deux aérothermes de 17,6 kW qui ne furent pas utilisés durant l'expérimentation à la demande du producteur. Deux portes de 0,38 m par 1,22 m permettaient à l'air passant par le mur solaire d'entrer dans le corridor de préchauffage durant les périodes froides. Durant l'été, ces portes sont fermées afin d'éviter l'entrée d'air chaud provenant du mur solaire dans le bâtiment. Par la suite, l'air circule du corridor de préchauffage vers les chambres par un plafond diffuseur.

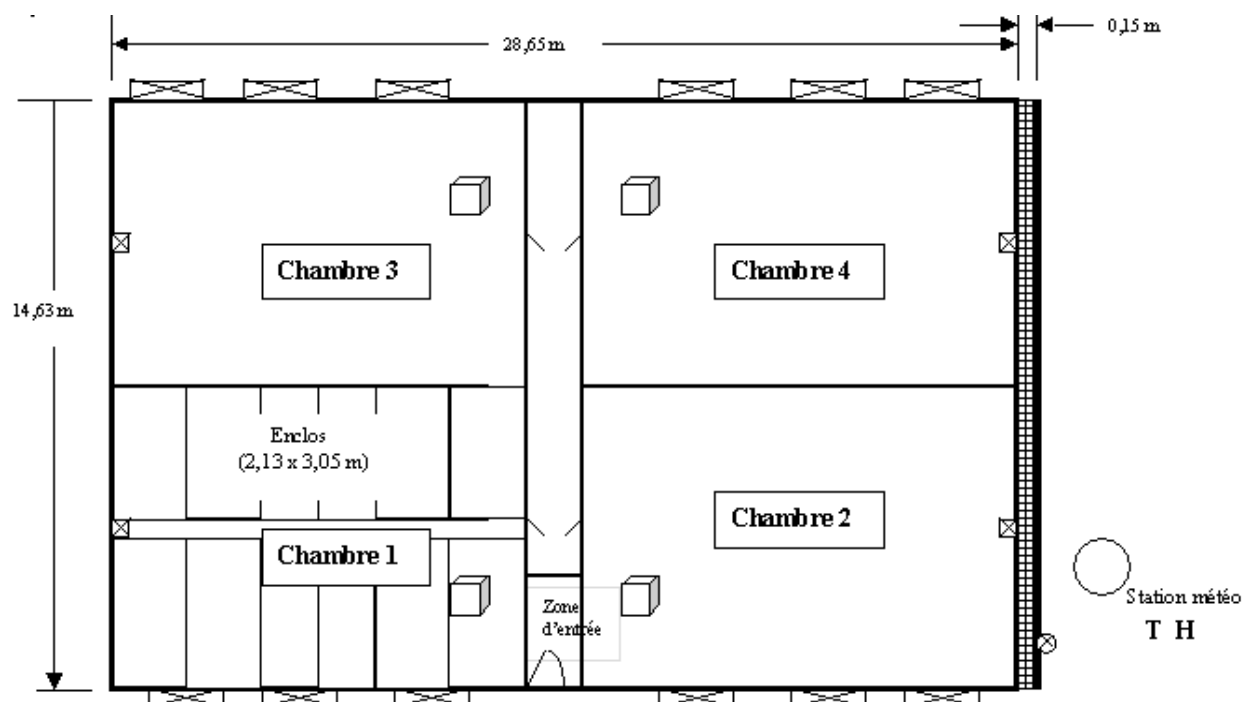


Figure 2. Plan de plancher de la pouponnière de la ferme Marisol

Description du mur solaire sur le site expérimental

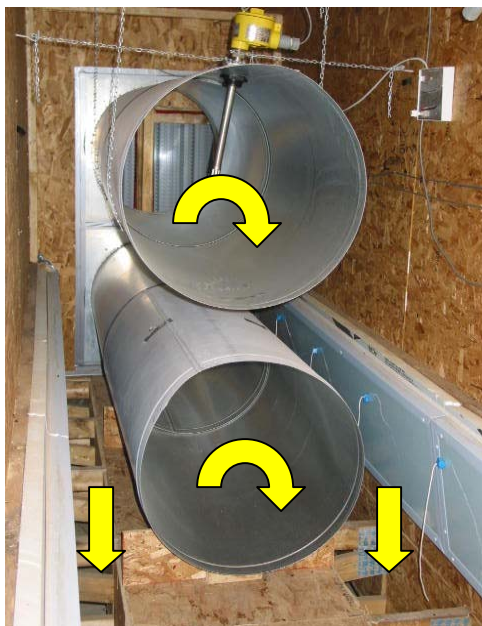
La technologie étudiée dans ce projet permet de récupérer l'énergie solaire en utilisant l'effet de la convection et du rayonnement solaire sur une tôle noire perforée. Le mur solaire consiste en un mur à double paroi en tôle. Le mur solaire (système SolAgra) a été installé sur toute la superficie (60 m^2) de l'extrémité sud, sud-est de la pouponnière. Son fonctionnement est présenté à la figure 3.



1. L'air extérieur entre par les perforations du revêtement (noir) du mur solaire; l'air se réchauffe en raison du contact avec le métal chauffé par la radiation solaire.



2. L'air issu du plénum du mur solaire entre par l'ouverture qui donne accès au corridor de préchauffage.



3. Deux tuyaux de 0,61 m de diamètre, installés à l'entrée du corridor de préchauffage, permettent de mesurer le débit d'air issu du mur solaire.



4. L'air réchauffé est distribué dans les chambres par des plafonds diffuseurs.

Figure 3. Circulation de l'air de l'extérieur du bâtiment vers une chambre de la pouponnière à la Ferme Marisol durant la saison froide

Dispositif expérimental

Afin d'établir le bilan de chaleur du mur solaire, les instruments de mesure suivants ont été requis :

- 1- À l'extérieur du bâtiment, une station météo équipée d'une sonde de température et d'humidité relative combinées permettait de mesurer les conditions extérieures;
- 2- À l'entrée du corridor de préchauffage, un débitmètre et une sonde mesurant à la fois la température et l'humidité relative de l'air étaient installés.

Ces instruments ont permis de calculer l'apport de chaleur issue du mur solaire. Il est important de noter que le système d'acquisition de données prenait des lectures aux 10 secondes, mais qu'il enregistrait la moyenne de ces lectures pour chaque période de 10 minutes. De plus, afin de mesurer la quantité de propane réelle utilisée par les aérothermes dans les chambres, un compteur mesurant la consommation de gaz propane était installé sur la conduite de gaz principale alimentant le bâtiment. En outre, un capteur a été fixé sur le mur solaire dans le but de mesurer l'intensité du rayonnement solaire. Ce capteur a permis de faire un lien entre l'intensité du rayonnement solaire et l'apport de chaleur par le mur solaire. Par ailleurs, il permettait d'évaluer la durée de l'ensoleillement et de comparer l'intensité du rayonnement solaire entre diverses journées.

Méthodes de calcul utilisées

Afin de quantifier l'apport énergétique du mur solaire, un bilan de chaleur a été réalisé en tenant compte des propriétés de l'air extérieur et de l'air à la sortie du mur solaire. Par conséquent, l'énergie fournie est calculée selon l'équation générale suivante (Marquis et Désilets, 2000) :

$$Q_{\text{Solaire}} = D_{\text{Plénum}} \times (1 / V_{\text{Solaire}}) \times C_p \times (T_{\text{Plénum}} - T_{\text{EXT}}) \quad (1)$$

où :

Q_{Solaire} :	énergie fournie par le mur solaire (kJ)
$D_{\text{Plénum}}$:	débit d'air à la sortie du mur solaire (m^3/sec)
V_{Solaire} :	masse volumique de l'air à la sortie du mur solaire (kg / m^3)
C_p :	chaleur spécifique de l'air ($1,005 \text{ kJ} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$)
T_{EXT} :	température de l'air extérieur ($^\circ\text{C}$)
$T_{\text{Plénum}}$:	température de l'air à la sortie du mur solaire ($^\circ\text{C}$)

De plus, la contribution énergétique du mur solaire au chauffage du bâtiment est définie par l'équation suivante :

$$\text{Contribution énergétique (\%)} = [Q_{\text{Solaire}} (\text{MJ}) / (Q_{\text{Solaire}} (\text{MJ}) + E_{\text{propane}} (\text{MJ}))] \times 100 \quad (2)$$

où :

Q_{Solaire} :	énergie utile sous forme de chaleur, fournie par le mur solaire (MJ)
E_{propane} :	énergie provenant du gaz propane pour le chauffage du bâtiment (MJ)

Notion d'énergie utile fournie par le mur solaire

Théorie de base en ventilation et chauffage

Lors de la conception d'un système de ventilation, il est important de déterminer les besoins en débits de ventilation minimum et maximum en fonction du stade physiologique des porcs (pouponnière, engraissement, mise bas et gestation) et selon les saisons. À la suite des calculs des besoins en débit d'air, les besoins en chauffage doivent être calculés afin de pallier au manque de chaleur durant les périodes froides.

Voici l'équation du bilan de chaleur sensible utilisée pour calculer les besoins de chauffage (Marquis et Desilets, 2000) :

$$\mathbf{Qch = Qb + Qv + Qe - Qs - Qm} \quad (3)$$

Où

Qs = chaleur sensible produite par les animaux, kW

Qm = chaleur produite par les ampoules électriques et par les moteurs, kW

Qch = chaleur produite par les installations de chauffage d'appoint (mur solaire et aérothermes), kW

Qb = chaleur évacuée par les portes, fondation, murs, plafonds, planchers, kW

Qv = chaleur évacuée par le système de ventilation, kW

Qe = chaleur absorbée par l'eau qui s'évapore sur les surfaces, kW

De plus, il est important de bien saisir la notion de température de déficit thermique ($T^{\circ}_{\text{déficit}}$). En effet, celle-ci correspond à la température extérieure à partir de laquelle les animaux ne produisent plus suffisamment de chaleur sensible afin de maintenir la température de consigne dans leur pièce. Ainsi, le chauffage d'appoint (Qch) commencera à chauffer sporadiquement à la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ et son fonctionnement s'intensifiera par la suite avec l'abaissement de la température extérieure. Il faut noter que la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ varie en fonction de type d'élevage, de la température de consigne désirée dans la chambre, du poids et du nombre de porcs par superficie de plancher.

Dans le cadre du projet (pouponnière), la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ variait en fonction du poids des porcelets et de la température de consigne. En effet, plus les porcelets sont jeunes, plus ils sont légers et plus chaude sera la consigne de température, augmentant ainsi la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$. Par conséquent, le chauffage démarrera plus rapidement, c'est-à-dire à une température plus chaude à l'extérieur pour pallier au manque de chaleur. Par ailleurs, lorsque le poids des animaux augmentera, la température de consigne diminuera tout comme la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$. Ainsi, le chauffage démarrera plus tardivement, soit à une température plus froide à l'extérieur.

Afin d'établir la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ dans le cadre du présent projet, une simulation a été effectuée. Afin de déterminer la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$, les données suivantes, issues du tableau 2, ont été utilisées : un inventaire moyen de 860 porcelets, un poids moyen de 14,3 kg et une température de consigne dans la chambre de 23 °C. Ainsi, la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ moyenne pour les six mois de test a été évaluée à environ 5 °C (Pouliot, 2003). Étant donné que le bâtiment étudié était en rotation, c'est-à-dire que les

porcelets ont des âges différents d'une chambre à l'autre, c'est la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ moyenne pour les six mois qui sera considérée. La $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ aura comme point de référence l'intérieur du corridor de préchauffage. Toutefois, il faut noter que la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ peut varier selon les cas (bâtiment « tout plein/tout vide » au lieu de rotation, débit de ventilation, etc.).

Dans le présent projet, l'énergie utile est définie comme la quantité d'énergie apportée par le mur solaire permettant de réduire la consommation de gaz propane par temps froid dans un bâtiment. Prenons le cas dans lequel la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ est de 5 °C alors que la température extérieure est de -10 °C et que la température réelle dans le corridor de préchauffage est de 4 °C. Ainsi, la température réelle dans le corridor (4 °C) est inférieure à la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ (5 °C). Par conséquent, l'énergie fournie par le mur solaire permet de diminuer la consommation de propane et de faire des économies.

Par contre, avec les mêmes conditions de température extérieure (-10 °C) et de $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ (5 °C), si la température réelle dans le corridor de préchauffage est égale à 9 °C, celle-ci sera de 4 °C supérieure à la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$. Ainsi, ce surplus de 4 °C ne sera pas considéré comme de l'énergie utile, car le système de chauffage d'appoint (propane) n'aurait pas besoin de fonctionner. Pour cet exemple, les économies de propane seront engendrées si le mur solaire fait augmenter la température de -10 °C jusqu'à 5 °C à l'entrée du corridor.

La température du corridor de préchauffage dans la pouponnière n'était pas contrôlée pendant l'expérimentation car le chauffage d'appoint, alimenté au propane, n'était pas en fonction. Différentes $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ ont été assumées afin de déterminer l'énergie utile provenant du mur solaire pour préchauffer le corridor dans l'entretoit. Pour étudier l'apport de chaleur du mur solaire dans ce projet, et afin de pouvoir couvrir les différentes conditions rencontrées chez les producteurs du Québec, différentes $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ ont été assumées, soit les suivantes : 10 °C, 5 °C et 0 °C.

LES RÉSULTATS OBTENUS

Relevé des données climatiques régionales de température extérieure et de rayonnement solaire

Un relevé des données climatiques de la région de Québec (aéroport de Québec) a été obtenu d'Environnement Canada pour les cinq dernières années, de 1998 à 2003. Selon la figure 4, les températures moyennes mensuelles entre les mois de novembre 2002 et d'avril 2003 ont eu tendance à être légèrement inférieures à la moyenne des cinq dernières années (1998-2003), mais elles se retrouvent à l'intérieur de l'écart type des températures de 1998 à 2003. De plus, pour les mêmes mois, le rayonnement solaire de 2002-2003 avait tendance à être plus faible que les cinq dernières années: il se trouvait à l'intérieur de l'écart type du rayonnement pour ces cinq années (figure 5).

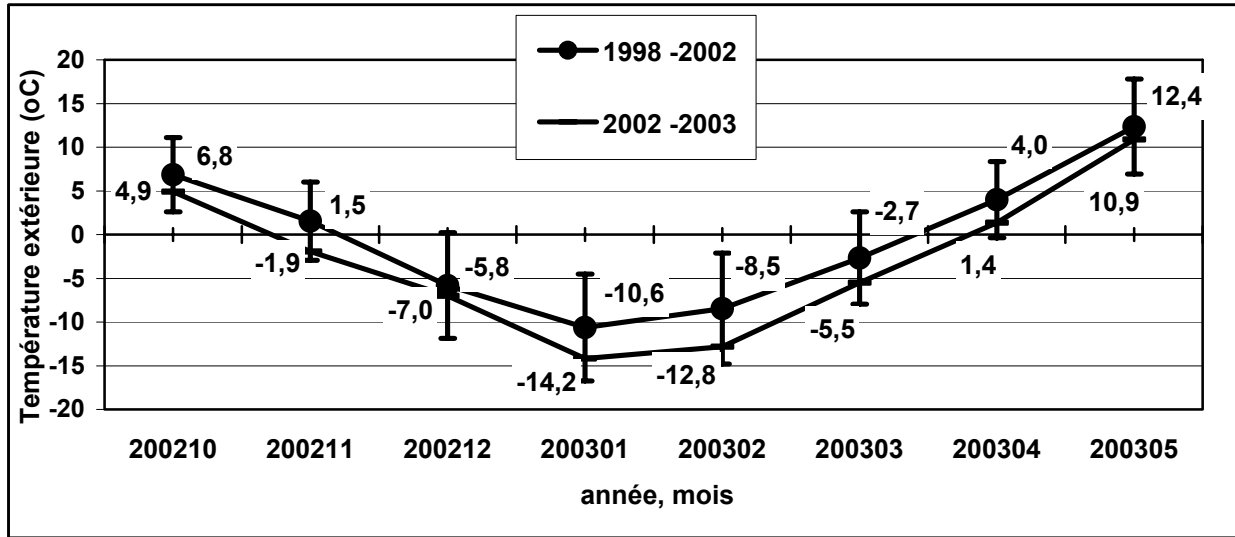


Figure 4. Température mensuelle moyenne extérieure (1998-2003)
Adapté d'Environnement Canada, 2003

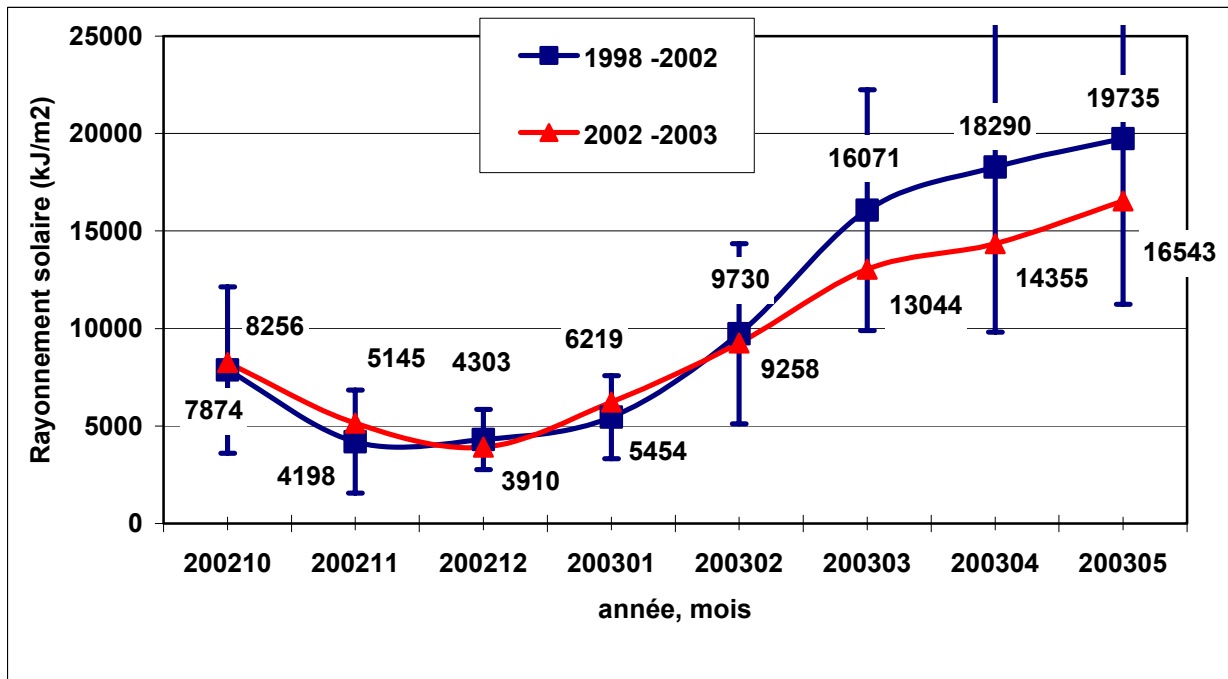


Figure 5. Rayonnement solaire mensuel moyen (1998-2003)
Adapté d'Environnement Canada, 2003

Impact du mur solaire sur l'apport de chaleur pour une journée typique

Une journée type a été choisie afin d'expliquer les divers phénomènes physiques autour du fonctionnement du mur solaire : température extérieure, température à la sortie du mur solaire et le rayonnement solaire en fonction de l'heure de la journée. La journée choisie est le 2 janvier 2003. Les résultats de cette journée sont illustrés à la figure 6. Pendant cette période de 24 heures, 144 mesures de chaque variable ont été enregistrées, soit à des intervalles de 10 minutes.

Durant la première partie de la journée, soit de minuit jusqu'à 7 h 30, la température de l'air à la sortie du mur solaire est supérieure de 0,5 °C en moyenne comparativement à la température ambiante extérieure (figure 6). La température de l'air extérieur se situait alors autour de -14 °C. Cet écart de température peut s'expliquer par la perte de chaleur du mur de la pouponnière récupérée par le plénum du mur solaire (la précision de la sonde de température est de $\pm 0,3$ °C).

À partir de 7 h 30, le rayonnement solaire a débuté et son intensité a augmenté rapidement pour atteindre son intensité maximale vers 10 h. Avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire, il y a augmentation, presque instantanément, de la température de l'air à la sortie du mur solaire. La température à la sortie du mur était à son maximum à 11 h, soit un gain de 25,9 °C depuis 7 h 30. Entre 7 h 30 et 10 h, la température extérieure a beaucoup moins augmenté comparativement à la température à la sortie du mur solaire. C'est à 11 h que l'écart de température entre l'extérieur et la sortie du mur solaire est le plus grand avec environ 21 °C. Toutefois, à partir de 10 h, le rayonnement solaire et la température à la sortie du mur solaire ont diminué graduellement.

De plus, entre 10 h et 16 h on peut observer qu'il y avait un décalage entre l'intensité du rayonnement solaire et la température à la sortie du mur solaire. C'est-à-dire que la température à la sortie du mur diminuait quelque temps après que le rayonnement ait diminué. Ce phénomène peut s'expliquer par l'inertie du système à emmagasiner la chaleur et par le fait que le rayonnement n'est pas en régime permanent. Même en l'absence de rayonnement solaire, entre 16 h et 20 h 30, la température du plénum est plus grande que la température extérieure. Ceci peut s'expliquer par la capacité d'emmagasiner de l'énergie par le mur solaire et le mur du bâtiment et/ou par la précision de la sonde de température ($\pm 0,3$ °C).

Par ailleurs, pour la durée de la période (8 h 30) pendant laquelle il y a un rayonnement solaire enregistré par le capteur solaire, la différence de température moyenne entre la sortie du mur et l'air extérieur était de 11,6 °C.

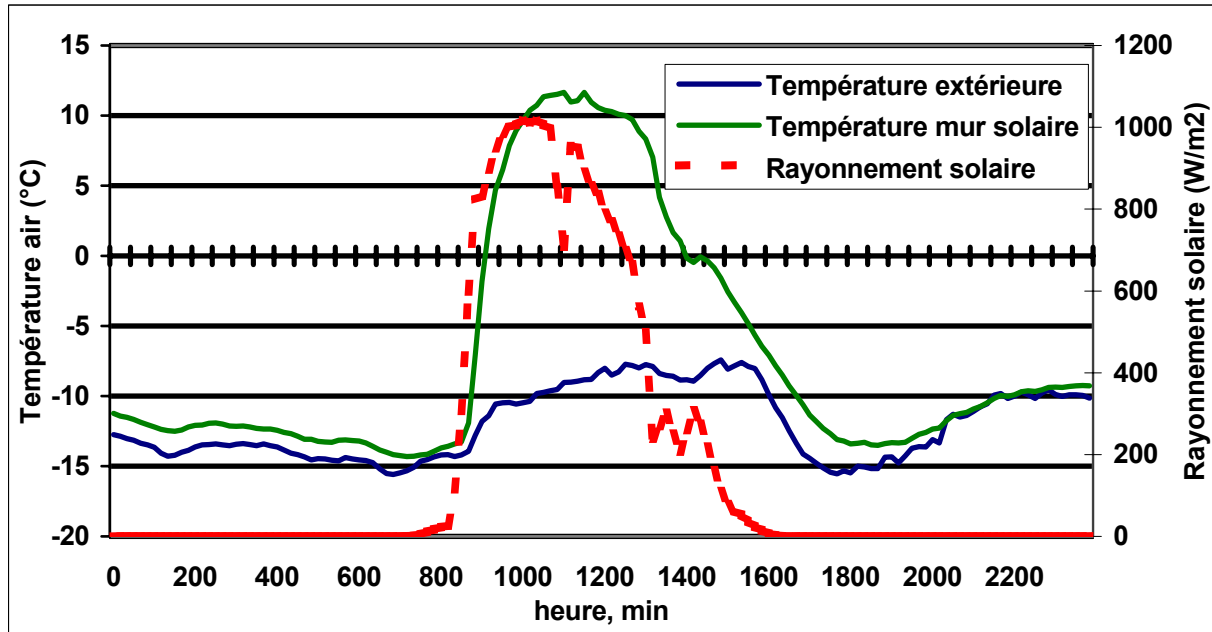


Figure 6. Fonctionnement du mur solaire : température extérieure, température à la sortie du mur solaire et intensité du rayonnement solaire durant une journée typique (2 janvier 2003)

Le tableau 1 montre l'apport d'énergie utile du mur solaire pour la journée du 2 janvier 2003 en fonction de différentes $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ (équation 1). La contribution énergétique du mur solaire est calculée à partir de l'équation 2. Selon les observations effectuées, plus la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ sera élevée, supérieure sera la contribution énergétique du mur solaire.

Tableau 1. Apport d'énergie utile du mur solaire pour la journée du 2 janvier 2003*

	Apport énergie totale : $T^{\circ}_{\text{déficit}} = \text{illimitée}$	Apport énergie utile à : $T^{\circ}_{\text{déficit}} = 10^{\circ}\text{C}$	Apport énergie utile à : $T^{\circ}_{\text{déficit}} = 5^{\circ}\text{C}$	Apport énergie utile à : $T^{\circ}_{\text{déficit}} = 0^{\circ}\text{C}$
Énergie issue du mur solaire (MJ)	432,2	422,5	349,8	257,5
Propane consommé dans le bâtiment (MJ)	516,0	516,0	516,0	516,0
Contribution énergétique (%)	45,6	45,0	40,4	33,3

* Température moyenne extérieure de la journée : $-11,9^{\circ}\text{C}$ (min : $-15,6^{\circ}\text{C}$, max : $-7,4^{\circ}\text{C}$)

Apport de chaleur mensuel du mur solaire

Les résultats de l'apport de chaleur mensuel du mur solaire pour les mois de novembre 2002 à avril 2003 sont présentés au tableau 2. Dans ce tableau, il est possible de constater que l'apport d'énergie utile mensuel varie selon la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$. Ainsi, l'apport d'énergie totale représente la quantité d'énergie apportée la plus élevée puisqu'il n'y a pas de $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ lui étant assignée. L'impact du mur solaire sur l'apport d'énergie utile diminue progressivement avec la diminution de la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$. Par exemple, pour une $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ de 5 °C, l'apport d'énergie utile est inférieur par rapport à une $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ de 10 °C.

Ainsi, l'apport d'énergie totale du mur solaire le plus faible est en novembre (2650 MJ) et il augmentera les mois suivants pour atteindre un maximum en avril (8602 MJ) (tableau 2). Le tableau 2 suggère par ailleurs que l'apport de chaleur solaire est directement relié à la durée d'ensoleillement. Plus elle sera longue, plus il y aura d'apport de chaleur.

Le tableau 2 montre que l'énergie utile du mur solaire diminue au fur et à mesure que la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ diminue (de illimitée à 0 °C). En outre, la contribution énergétique du mur solaire diminue de la même façon. L'énergie utile est supérieure pour une $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ élevée parce qu'il y a moins de probabilité que la température à la sortie du mur solaire soit supérieure à la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$. Ainsi, la contribution énergétique du mur solaire (équation 2) pour l'apport d'énergie totale, varie de 18,1 à 46,1 % de novembre à avril pour une $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ illimitée.

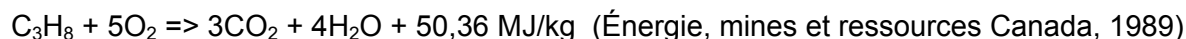
Tableau 2. Apport de chaleur du mur solaire de novembre 2002 à avril 2003

	Nov. 02	Déc. 02	Janv. 03	Fév. 03	Mars 03	Avril 03
Inventaire moyen (porcelets)	966	838	902	728	818	911
Poids moyen (kg/porcelet)	11	18	12	18	11	16
Ensoleillement moyen ¹ (h/j)	2,40	2,14	4,34	5,13	4,47	5,82
E_{propane} (MJ)	11 695	9 545	15 221	8 341	15 565	9 545
Contribution mur solaire (MJ) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	2 650	3 894	5 247	6 940	4 916	8 602
Contribution mur solaire (%) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	18,1	28,3	27,5	46,1	23,5	45,8
Contribution mur solaire (MJ) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 10 °C	2 133	3 719	4 870	6 669	4 154	4 541
Contribution mur solaire (%) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 10 °C	15,2	27,9	26,7	45,3	20,7	28,7
Contribution mur solaire (MJ) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	1 623	3 153	4 380	6 167	3 153	2 694
Contribution mur solaire (%) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	11,8	25,6	25,3	43,7	16,0	18,8
Contribution mur solaire (MJ) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 0 °C	798	2 275	3 634	5 068	1 950	1 060
Contribution mur solaire (%) $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 0 °C	5,3	19,8	22,2	38,9	9,4	8,6

¹adapté d'Environnement Canada (2003)

Réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) avec le mur solaire

Afin d'évaluer l'impact de la combustion du propane sur les gaz à effet de serre, il est important de comprendre l'équation stœchiométrique suivante, qui explique la réaction chimique liée à la combustion du propane. Comme on peut le constater, la combustion du propane engendre une production de CO₂, qui est un gaz contribuant à l'effet de serre (GES).



Pour évaluer la diminution de production de CO₂ en utilisant l'énergie solaire comme alternative au propane, la formule suivante est requise :

$$\text{kgCO}_2 = Q \times (1/\text{VCAL}) \times (1\text{m}^3/1000\text{L}) \times \text{PCO}_2 \text{ (Environnement Canada, 2002)}$$

Où:

kgCO₂ = quantité de CO₂ économisée par le mur solaire (kg)

Q = énergie fournie par le mur solaire (kJ)

VCAL = valeur calorifique du propane en tenant compte de l'efficacité de combustion à 90% = 22 976 kJ/l_{liquide} (CRÉAQ, 1995)

PCO₂ = quantité de CO₂ produit par m³ de propane brûlé = 1500 kg/m³ (Environnement Canada, 2002)

La réduction des émissions de gaz à effet de serre est montrée au tableau 3 pour une T°_{déficit} illimitée et de 5 °C. La réduction des émissions de gaz en équivalent de dioxyde de carbone (CO₂) variait mensuellement entre 106,0 et 561,6 kg de novembre à avril. Pour toute la durée de l'expérimentation, la réduction des émissions de CO₂ a été de 1382 kg pour T°_{déficit} = 5 °C, soit une réduction de 23,3 %. Dans le cas d'une T°_{déficit} illimitée, la réduction de CO₂ a été de 2105 kg, soit une réduction de 31,6 %.

Tableau 3. Émissions de gaz à effet de serre (GES) avec le système du mur solaire pour T°_{déficit} illimitée et de 5 °C

	Nov. 2002		Déc 2002		Janv. 2003		Fév. 2003		Mars 2003		Avril 2003		Total novembre-avril	
	T° _{déficit} illimitée	T° _{déficit} 5 °C	T° _{déficit} illimitée	T° _{déficit} 5 °C	T° _{déficit} illimitée	T° _{déficit} 5 °C	T° _{déficit} illimitée	T° _{déficit} 5 °C	T° _{déficit} illimitée	T° _{déficit} 5 °C	T° _{déficit} illimitée	T° _{déficit} 5 °C	T° _{déficit} illimitée	T° _{déficit} 5 °C
Équivalent CO ₂ économisé par le mur solaire (kg)	173,0	106,0	254,2	205,9	342,6	286,0	453,1	402,6	320,9	205,8	561,6	175,9	2105	1382
CO ₂ produit par propane (kg)	763,6	763,6	623,2	623,2	993,7	993,7	544,6	544,6	1016,2	1016,2	623,2	623,2	4564	4564
Réduction émission CO ₂ par mur solaire (%)	18,5	12,2	29,0	24,8	25,6	22,3	45,4	42,5	24,0	16,8	47,4	22,0	31,6	23,3

Impact économique du mur solaire installé en pouponnière

La première partie du tableau 4 présente la quantité totale de propane utilisée chaque mois (en Kw.h et litre) pour la pouponnière étudiée. Par ailleurs, le prix mensuel réel du propane payé par la Ferme Marisol y est présenté ainsi que le coût total pour chaque mois. Finalement, la deuxième partie du tableau présente la quantité d'énergie économisée avec l'apport du mur solaire dans le cas d'une $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ illimitée et de 5 °C, avec une évaluation de l'économie basée sur le prix moyen de propane payé du mois de novembre 2002 à avril 2003.

Tableau 4. Quantité de propane utilisée et coût mensuel du propane pour la pouponnière étudiée ainsi que l'énergie fossile économisée par le mur solaire pour des $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ illimitées et de 5 °C

	Nov. 2002	Déc. 2002	Janv. 2003	Fév. 2003	Mars 2003	Avril 2003	Total							
Qté mensuelle propane														
Énergie utilisée (Kw.h)	3249	2652	4229	2317	4324	2652	19423							
Quantité (l)	509	415	662	363	677	415	3043							
Coût (\$)	158,13	138,43	235,70	166,60	367,46	147,38	1214,00							
Coût (\$/l)	0,31	0,33	0,36	0,46	0,54	0,36	0,39							
Qté mensuelle d'énergie solaire	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C						
Apport énergie solaire utile (Kw.h)	736	451	1082	876	1458	1217	1928	1713	1366	876	2390	748	8960	5881
Équivalent en quantité de propane (l)	115,2	70,6	169,4	137,1	228,2	190,7	301,8	268,4	198,5	137,2	374,1	117,1	1387	921,1
Économie propane* (\$)	44,93	27,53	66,07	53,47	89,00	74,37	117,7	104,68	77,42	53,51	145,9	45,67	540,9	359,20

* Économie de propane basée sur le prix moyen (novembre 2002 à avril 2003) de propane de 0,39 \$/L payé par ferme Marisol

Le tableau 5 présente les économies de propane mensuelles obtenues dans le cas particulier d'une $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ illimitée et de 5 °C, pour différents prix de propane. Pour les mois de mai à octobre, aucune donnée n'est disponible, car il n'y a pas eu prises de mesures. Néanmoins, il pourrait y avoir une économie avec le mur solaire pour les autres mois de l'année, quoique celle-ci sera inférieure à celles des mois de la période froide. Ainsi, dans le cadre du projet, les économies apportées par le mur solaire sont considérées uniquement pour les mois de novembre 2002 à avril 2003.

Tableau 5. Économies de propane obtenues avec le mur solaire pour une $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ illimitée et de 5 °C

	Nov-02		Déc-02		Jan-03		Fév-03		Mars-03		Avril-03		Total	
	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée	$T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C
Énergie solaire utile (Kw.h)	736	451	1082	876	1458	1217	1928	1713	1366	876	2390	748	8960	5881
Équivalent en quantité de propane (L)	115,2	70,6	169,4	137,1	228,2	190,7	301,8	268,4	198,5	137,2	374,1	117,1	1387	921,1
Économie selon différents prix moyens de propane (\$)														
0,30 \$/L	34,56	21,18	50,82	41,13	68,46	57,21	90,51	80,54	59,55	41,16	112,2	35,13	416,0	276,3
0,35 \$/L	40,32	24,71	59,29	47,99	79,87	66,74	105,6	93,96	69,48	48,02	130,9	40,99	485,4	322,4
0,39 \$/L (ferme étudiée)	44,93	27,53	66,07	53,47	89,00	74,37	117,7	104,7	77,42	53,51	145,9	45,67	540,9	359,2
0,45 \$/L	51,84	31,77	76,23	61,70	102,7	85,81	135,8	120,8	89,33	61,74	168,4	52,70	624,1	414,4
0,50 \$/L	57,60	35,29	84,71	68,55	114,1	95,35	150,9	134,2	99,26	68,60	187,2	58,55	693,5	460,5

Pour ce qui est de la pouponnière étudiée de novembre 2002 à avril 2003, l'économie d'énergie obtenue avec le mur solaire selon le prix moyen de propane de celle-ci (0,39 \$/L) est de 540,90 \$ pour $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée et de 359,20 \$ pour $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C. Pour ce qui est des autres prix moyens de propane et des deux conditions de déficit thermique, les économies d'énergie qu'apporte le mur solaire varient de 276,30 \$ (prix de propane moyen de 0,30 \$/L et $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = 5 °C) à 693,50 \$ (prix de propane moyen de 0,50 \$/L et $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ = illimitée).

Comme on peut le constater, plusieurs paramètres influencent la consommation de propane par le système de chauffage. Par conséquent, il est difficile d'appliquer systématiquement les résultats issus de ce projet à l'ensemble des bâtiments du Québec.

En outre, les performances du mur solaire varient en fonction de plusieurs paramètres. Entre autres, la surface du mur influencera la quantité d'énergie absorbée, plus la surface sera grande, supérieure sera l'apport de chaleur. De plus, l'orientation et la couleur du mur influenceront son efficacité. Finalement, l'exposition du bâtiment au vent, ayant un effet de refroidissement du mur, et la présence d'obstacles projetant de l'ombre, en diminueront aussi son rendement. En bref, pour bien installer le mur solaire et maximiser le captage du rayonnement solaire, il est recommandé de s'informer auprès d'un spécialiste en énergie solaire thermique, car plusieurs paramètres de conception sont à considérer.

Étude économique (budget partiel)

Dans la présente étude économique, la construction d'une pouponnière de 1000 places a été considérée. Le coût de construction de cette pouponnière est estimé à 230,00 \$/place ou 230 000 \$ (Nadeau et Levallois, 2003). De ce coût de 230,00 \$/place, le coût de la portion du bâtiment (mur solaire, structure de la bâtisse, mur, fondation, fosse, etc.) est estimé à 115 \$/place. Pour ce qui est de la portion des équipements (trémies, parcs, ventilation, etc.), le coût est également estimé à 115 \$/place.

Dans cette étude, deux scénarios sont présentés pour déterminer le seuil de rentabilité à l'achat du mur solaire. Premièrement, le besoin en financement, dans le cas où il n'y aurait aucun mur solaire ajouté, sera établi. Le deuxième scénario présente le financement d'un bâtiment avec l'ajout d'un mur solaire en considérant le prix moyen de propane de novembre 2002 à avril 2003 de la pouponnière étudiée, soit 0,39 \$/L et par rapport à une $T^{\circ}_{\text{déficit}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $T^{\circ}_{\text{déficit}} = \text{illimitée}$.

Dans le premier scénario, les résultats démontrent que les frais de financement mensuels d'une pouponnière neuve de 230 000 \$, **sans mur solaire**, avec un amortissement sur quinze ans à un taux fixe de 7 % sont de 2 368,90 \$/mois (tableau 5).

Dans le deuxième scénario, soit dans le cas de la pouponnière étudiée, les frais de financement annuels du mur solaire, au seuil de la rentabilité, (capital + intérêt) ne doivent pas excéder 359,20 \$. Ce montant représente l'économie de propane annuelle lorsque le prix du propane moyen est de 0,39 \$/L. Pour ce scénario, l'économie de propane de 359,20 \$ ($T^{\circ}_{\text{déficit}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) correspond à un financement pour l'achat d'un mur solaire au coût de 3325,00 \$. Cet achat est amorti sur quinze ans à un taux d'intérêt constant de 7 %. Cela représente des versements mensuels de 29,89 \$. Pour ce même scénario, les frais de financement mensuels, pour une pouponnière neuve munie d'un mur solaire, passent alors à 2 398,79 \$/mois (2368,90 \$/mois + 29,89 \$/mois) (tableau 6). De plus, pour ce même scénario, si la $T^{\circ}_{\text{déficit}}$ est considérée comme illimitée, l'économie de propane de 540,90 \$ permet un financement pour l'achat d'un mur solaire au coût de 5 013,00 \$, aux mêmes conditions de financement citées ci-haut.

Tableau 6. Budget partiel pour une pouponnière neuve de 1000 places avec ou sans mur solaire

	Pouponnière sans mur solaire	Pouponnière avec mur solaire et prix de propane à 0,39 \$/L et économie d'énergie annuelle de 359,20 \$	Pouponnière avec mur solaire et prix de propane à 0,39 \$/L et économie d'énergie annuelle de 540,90 \$	Différence de coûts (b-a)	Différence de coûts (c-a)
Données	\$	\$	\$	\$	\$
Coût du bâtiment	115 000 (a)	118 325 (b)	120 136 (c)	+ 3325	+ 5013
Coût des équipements	115 000	115 000	115 000		
Investissement total	230 000	233 325	235 013		
Taux d'intérêt	7 %	7 %	7 %		
Amortissement bâtiment (durée d'emprunt)	15 ans	15 ans	15 ans		
Amortissement des équipements (durée de l'emprunt)	10 ans	10 ans	10 ans		
Coût de financement mensuel Bâtiment seulement (capital et intérêt)	1033,65 (a)	1063,54 (b)	1078,71 (c)	+ 29,89	+ 45,06
Coût de financement mensuel Équipements seulement (capital et intérêt)	1335,25	1335,25	1335,25		
Coût de financement mensuel total bâtisse + équipements (capital et intérêt)	2368,90 (a)	2398,79 (b)	23413,96 (c)	+ 29,89	+ 45,06

Évaluation économique du mur solaire selon différents prix de propane

Dans le tableau 6, l'évaluation du seuil de rentabilité d'un mur solaire a été présentée. Cet exemple était basé sur un prix moyen de propane, soit celui payé par la ferme étudiée (0,39 \$/L). Le tableau 7 présente un résumé du seuil de rentabilité approximatif du mur solaire à son achat, et ce, pour différents prix de propane. Le lecteur doit prendre note que pour chaque scénario est assumé un prix moyen fixe du propane pendant toute la durée du prêt de quinze ans. Il faut également noter que le taux d'intérêt est aussi fixe à 7 % pour la période de quinze

ans. Ces deux derniers éléments sont nécessairement variables et peuvent donc modifier les résultats obtenus.

Tableau 7. Économies de chauffage et seuil de rentabilité à l'achat d'un mur solaire pour $T^{\circ}_{\text{déficit}} = \text{illimitée}$ et $T^{\circ}_{\text{déficit}} = 5^{\circ}\text{C}$

Prix de propane (\$)	Économie qu'apporte le mur solaire selon différents prix de propane pour les mois de novembre 2002 à avril 2003.		Coût d'investissement supplémentaire lié à l'achat du mur solaire pour atteindre le seuil de rentabilité avec un financement sur quinze ans à un taux d'intérêt de 7 %	
	$T^{\circ}_{\text{déficit}} = \text{illimitée}$	$T^{\circ}_{\text{déficit}} = 5^{\circ}\text{C}$	$T^{\circ}_{\text{déficit}} = \text{illimitée}$	$T^{\circ}_{\text{déficit}} = 5^{\circ}\text{C}$
0,30 \$/l	416,0	276,3	3855,0	2550,0
0,35 \$/L	485,4	322,4	4500,0	2975,0
0,39 \$/L	540,9	359,2	5013,0	3325,0
0,45 \$/L	624,1	414,4	5785,0	3825,0
0,50 \$/L	693,5	460,5	6429,0	4250,0

Commentaires sur l'impact économique du mur solaire d'une pouponnière

Les calculs économiques ont été effectués à partir des résultats techniques obtenus à la Ferme Marisol. Ces résultats peuvent varier d'une ferme à l'autre : il faut donc être prudent dans l'utilisation de ces chiffres. Pour ce qui est de l'évaluation du coût de financement d'un mur solaire, les calculs ont aussi été effectués selon des paramètres précis et spécifiquement dans l'optique d'atteindre le seuil de rentabilité. Naturellement, l'objectif de l'ajout d'un mur solaire est d'obtenir une économie, même après avoir couvert le coût du financement de celui-ci. L'évaluation économique du mur solaire a été effectuée sans tenir compte des subventions possibles associées à cette technologie. Toute subvention possible devrait être considérée afin de réduire le coût de financement du mur solaire.

CONCLUSION

L'évaluation du mur solaire dans le présent projet a permis de constater les impacts économiques et environnementaux d'une telle technologie. En bref, dans les conditions de la Ferme Marisol, soit une pouponnière de 1000 places située à Saint-Sylvestre-de-Beaurivage et un coût de propane moyen de 0,39 \$/L, en supposant une température de déficit thermique illimitée et de 5°C au niveau du corridor de préchauffage, les résultats sont les suivants :

- Une économie annuelle de propane se situant, environ entre 360 \$ à 540 \$, représentant de 0,12 \$ à 0,18 \$ par porcelet produit pour les trois lots issus de l'expérimentation (3000 porcelets);
- Le seuil de rentabilité quant à l'investissement supplémentaire, en considérant un amortissement de 15 ans à un taux d'intérêt de 7 %, varie entre 3325 \$ et 5013 \$;
- Une réduction d'émission annuelle de CO₂ (GES) de 1380 à 2100 kg.

Enfin, dans le cadre de travaux futurs, il serait intéressant d'évaluer la possibilité d'installer des murs solaires dans divers concepts de bâtiments (ex : entrée d'air centrale avec prise d'air dans l'entree sans corridor de préchauffage). De plus, il serait opportun de comparer les émissions de CO₂ entre des fermes identiques, avec et sans mur solaire, afin de vérifier la réduction d'émissions de GES. Enfin, il y aurait un intérêt afin d'évaluer la possibilité de développer des accumulateurs de chaleur, ayant un bon ratio coût/bénéfice, dans le but d'emmagasiner la chaleur issue du rayonnement solaire du jour et de l'utiliser durant la nuit.

RECOMMANDATIONS PRATIQUES

Avant tout, un bâtiment qui intègre un système de mur solaire doit être conçu pour optimiser les économies de chauffage. L'étanchéité et l'isolation du bâtiment, tout comme le système de ventilation doivent être contrôlés adéquatement quant au nombre et aux types d'animaux présents pour optimiser la réduction des pertes de chaleur.

À l'heure actuelle, les entreprises pouvant bénéficier de ce type de système de chauffage sont celles utilisant des conduits de préchauffage ou bien des systèmes d'entrées d'air latéraux, étant donné la facilité à intégrer efficacement la technologie du système du mur solaire au système de ventilation du bâtiment. Bien entendu, l'orientation du bâtiment est très importante afin d'optimiser l'efficacité du mur solaire. Il est important de consulter votre conseiller en énergie solaire thermique à ce sujet. Ce système peut s'intégrer dans le cadre d'une rénovation de bâtiment ou d'une construction neuve. Par ailleurs, ce système peut aussi être utilisé pour d'autres types de production animale, pour lesquels un système de chauffage est requis, comme dans la production de volailles ou de veaux.

Voici, en résumé, les diverses recommandations issues du présent projet :

- Durant les périodes froides, l'air de la ventilation doit provenir au maximum par le mur solaire et non par d'autres sources d'infiltration (portes non étanches) afin d'optimiser la récupération de chaleur au niveau du mur solaire;
- Par ailleurs, il est important de mettre des capots isolés sur les ventilateurs de palier d'été, ne servant pas l'hiver, afin de diminuer les infiltrations d'air indésirables. L'installation des

capots de polystyrène sur ces ventilateurs permettra de diminuer ces inconvénients et en même temps de maximiser le débit d'air circulant au travers du mur solaire;

- Bien choisir la température dans le corridor de préchauffage en fonction du poids et du nombre d'animaux pour éviter de surchauffer inutilement et d'optimiser la consommation de propane;
- Bien ajuster le débit minimum de la ventilation ainsi que les paramètres liés au chauffage d'appoint;
- Pour des raisons sanitaires et faciliter le contrôle de la température dans les chambres, éviter de transférer l'air d'une chambre à l'autre;
- Afin de bien installer le mur solaire pour maximiser le captage du rayonnement solaire, s'informer auprès d'un spécialiste en énergie solaire thermique, car plusieurs paramètres de conception sont à considérer (orientation, couleur du mur, type d'utilisation, durées d'opération, type d'élevage, besoins en chauffage, débits de ventilation etc.).

RÉFÉRENCES

CRÉAQ, 1995, Énergie, AGDEX 760/821, août, Comité de références économiques en agriculture du Québec, Groupe GÉAGRI inc.

Énergie, mines et ressources Canada. 1989. Combustion, energy management series. Canadian Government Publishing Centre. 36 p.

Environnement Canada. 2002. Inventaire canadien des gaz à effet de serre 1990-2000 Division des gaz à effet de serre(GES).

Environnement Canada (a). 2003. Ressources naturelles du Canada. Pages consultées le 19 septembre 2003. Adresse ULR : http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/1990_00_report/appd_f.cfm

Environnement Canada (b). 2003. Ressources naturelles du Canada. Pages consultées le 19 septembre 2003. Adresse ULR : http://www.canren.gc.ca/prod_serv/index_f.asp?Cald=101&Pgld=588

Marquis, A. et Desilets, D., 2000. D GAE-12358 - *Systèmes environnementaux*. Notes de cours, septembre 2000.

Nadeau, G. et Levalleois, R. 2003. Le Coopérateur agricole. Juillet – août 2003. p. 32.

Pouliot, F. 2001. Maîtriser la ventilation minimum pour diminuer les coûts de chauffage. Porc Québec –Août, Vol. 12, No 3, pp. 49-52.

Pouliot, F. 2003. Communications personnelles.

Savaria, R. 2003. Communications personnelles.

Solarwall. 2003. **Solarwall** ©. Pages consultées le 19 septembre.

Adresse ULR : <http://www.solarwall.com/sw/solarwall.html>