CONSEIL
POUR LE DÉVELOPPEMENT
DE L'AGRICULTURE DU QUÉBEC

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

Centre de développement du porc du Québec inc.

INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT

Solutions énergétiques Enerconcept inc.

Par

Henri Guimont[1], agr.
Francis Pouliot[1], ing.
Réjean Leblanc[1], agr.
Stéphane Godbout[2], ing., Ph.D., agr.

Avril 2004

[1] Centre de développement du porc du Québec inc.
[2] Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

COLLABORATEURS IMPLIQUÉS DANS LE PROJET

Requérant

Francis Pouliot, ing., Centre de développement du porc du Québec inc. (CDPQ)

Responsable scientifique

Stéphane Godbout, ing., Ph.D., agr.,

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

Collaborateurs

Du CDPQ

Henri Guimont, agr.,

Réjean Leblanc, agr.,

Isabelle Lachance, ing., stagiaire,

et Joël Rivest, M.Sc.

De l'IRDA

François Léveillée, dta,

Frédéric Pelletier, M.Sc.,

et Roch Joncas, ing., M.Sc.

D'Énerconcept

Réal Savaria, ing., M.Sc.

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. La contribution de François Léveillée et de Frédéric Pelletier a été très appréciée lors de l'installation des équipements de mesure et d'acquisition de données.

Table des matières

COLLABORATEURS IMPLIQUÉS DANS LE PROJET ..... **I**

REMERCIEMENTS ..... **I**

SOMMAIRE **1**

TITRE DU PROJET **1**

OBJECTIFS DU PROJET **1**

RÉSUMÉ **1**

1.0 CONTEXTE **2**

2.0 NOTIONS DE BASE **3**

2.1 BILAN DE CHALEUR EN VENTILATION ET CHAUFFAGE 3
2.2 LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE ET LE MUR SOLAIRE 5
2.2.1 Le principe général d'un mur solaire *5*
2.2.2 Les équations régissant le bilan thermique d'un mur solaire *6*
2.2.3 Température de déficit, notion d'énergie utile et contribution énergétique *7*

3.0 LES MURS SOLAIRES : PERFORMANCE ET RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE **9**

3.1 PERFORMANCE ATTENDUE D'UN MUR SOLAIRE 9
3.2 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE 10

4.0 DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS (MATÉRIELS) **12**

4.1 BÂTIMENT ET ANIMAUX 12
4.2 LE MUR SOLAIRE ET SON INSTALLATION SUR LE SITE 13
4.3 DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS DE MESURE 15
4.3.1 Mesure des caractéristiques de l'air dans le corridor de préchauffage et le débit *15*
4.3.2 Mesure des caractéristiques de l'air à la sortie du mur solaire et dans l'entretoit *16*
4.3.3 Mesure de la consommation de gaz propane *19*
4.3.4 Mesure des conditions climatiques extérieures *19*
4.3.5 Système d'acquisition de données *19*

5.0 MÉTHODOLOGIE **21**

5.1 PÉRIODE D'EXPÉRIMENTATION ET PRISE DE DONNÉES 21
5.2 CALCUL DE L'ÉNERGIE UTILE FOURNIE PAR LE MUR SOLAIRE 22
5.3 PARAMÈTRES POUR CALCULER L'APPORT DE CHALEUR FOURNI PAR LE MUR SOLAIRE 26

6.0 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS **28**

6.1 RELEVÉ DES DONNÉES CLIMATIQUES RÉGIONALES DE TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE ET DE RAYONNEMENT SOLAIRE 28
6.2 APPORT DE CHALEUR POUR UNE JOURNÉE TYPIQUE 30
6.3 APPORT DE CHALEUR GLOBAL DU MUR SOLAIRE 33
6.3.1 Apport de chaleur quotidien du mur solaire *33*

6.3.2 Apport de chaleur mensuel du mur solaire 39
6.4 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE AVEC LE SYSTÈME DU MUR SOLAIRE 42

7.0 IMPACT ÉCONOMIQUE D'UN MUR SOLAIRE INSTALLÉ DANS UNE POUPONNIERE 44

7.1 ÉTUDE ÉCONOMIQUE D'UN MUR SOLAIRE (BUDGET PARTIEL) 45
7.2 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE D'UN MUR SOLAIRE SELON DIFFÉRENTS PRIX DE GAZ PROPANE 48
7.3 COMMENTAIRES SUR L'IMPACT ÉCONOMIQUE D'UN MUR SOLAIRE INSTALLÉ DANS UNE POUPONNIÈRE 48

8.0 CONCLUSION 49

9.0 RECOMMANDATIONS PRATIQUES 50

10.0 RÉFÉRENCES 53

ANNEXE 1 : FORMULES POUR CALCULER LES FACTEURS COMPOSANT L'APPORT DE CHALEUR D'UN MUR SOLAIRE 55

ANNEXE 2 : RÉSULTATS DES MESURES DE LA VITESSE DE L'AIR DANS UN TUYAU A LA SORTIE DU PLÉNUM DU MUR SOLAIRE 57

ANNEXE 3 : EXEMPLE DE REGISTRE DES VISITEURS 59

ANNEXE 4 : TEMPÉRATURE DE L'AIR EXTÉRIEUR AVEC LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET L'HUMIDITE RELATIVE AVEC LE DÉBIT D'AIR POUR LA SEMAINE DU 21 AU 27 AVRIL 2003 (À TITRE D'EXEMPLE) 61

ANNEXE 5 : EXEMPLE DE FICHE DE RÉGIE D'ELEVAGE – TEMPÉRATURE JOURNALIÈRE MINIMUM ET MAXIMUM 63

ANNEXE 6 : EXEMPLE DE FICHE DE RÉGIE D'ÉLEVAGE – INVENTAIRE DES PORCELETS DANS LA POUPONNIERE 65

ANNEXE 7 : DONNÉES CLIMATIQUES RÉGIONALES (QUÉBEC) DE 1998 À 2003 67

ANNEXE 8 : COURBES MOYENNES DES TEMPÉRATURES ET DU RAYONNEMENT SOLAIRE 69

ANNEXE 9 : DONNÉES ET RÉSULTATS JOURNALIERS POUR LA DURÉE DE L'EXPÉRIMENTATION 71

ANNEXE 10 : FORMULES POUR LE CALCUL DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE (GES) 75

ANNEXE 11 : FORMULAIRE – ÉTUDES PRÉLIMINAIRE ET DÉTAILLÉE 77

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : NOMBRE MOYEN D'HEURES D'ENSOLEILLEMENT MAXIMAL PAR JOUR EN DÉCEMBRE AU CANADA (TIRÉ DE : ENVIRONNEMENT CANADA, 2003B) 3

FIGURE 2: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MUR SOLAIRE (SOLARWALL©) ADAPTÉ DE SOLARWALL, 2003 6

FIGURE 3: VUE EXTÉRIEURE D'UNE POUPONNIÈRE DE LA FERME MARISOL 12

FIGURE 4: INTÉRIEUR D'UNE CHAMBRE DE POUPONNIÈRE 12

FIGURE 5: VUE DE L'INTÉRIEUR DU CORRIDOR DE PRÉCHAUFFAGE 13

FIGURE 6: CIRCULATION DE L'AIR DE L'EXTÉRIEUR DU DE LA BÂTIMENT VERS UNE CHAMBRE POUPONNIÈRE À LA FERME MARISOL DURANT LA SAISON FROIDE. 14

FIGURE 7: PLAN DE PLANCHER DE LA POUPONNIÈRE ET SCHÉMA D'AMÉNAGEMENT DES APPAREILS DE MESURE 17

FIGURE 8: VUE EN PLAN DU CORRIDOR DE PRÉCHAUFFAGE ET SCHÉMA D'AMÉNAGEMENT DES APPAREILS DE MESURE 18

FIGURE 9: ÉQUIPEMENTS DE MESURE POUR ÉTABLIR LE BILAN DE CHALEUR DU MUR SOLAIRE 20

FIGURE 10 DIAGRAMME LOGIQUE PRÉSENTANT LES VALIDATIONS POUR LE CALCUL DE L'APPORT DE CHALEUR PAR LE MUR SOLAIRE. 27

FIGURE 11: TEMPÉRATURE MENSUELLE MOYENNE EXTÉRIEURE (1998-2003) (ADAPTÉ DE : ENVIRONNEMENT CANADA, 2003A). 28

FIGURE 12: RAYONNEMENT SOLAIRE MENSUEL MOYEN (1998-2003) (ADAPTÉ DE : ENVIRONNEMENT CANADA, 2003A) 29

FIGURE 13: COMPARAISON DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'AIR EXTÉRIEUR ENREGISTRÉES SUR LE SITE DES ESSAIS À ST-SYLVESTRE ET CELLES OBTENUES PAR ENVIRONNEMENT CANADA (ADAPTÉ DE : ENVIRONNEMENT CANADA, 2003A). 30

FIGURE 14: 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) 31

FIGURE 15: APPORT DE CHALEUR JOURNALIER DU MUR SOLAIRE DURANT LE MOIS DE NOVEMBRE 2002 POUR LES DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DÉFICIT ET L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ENTRE LE PLÉNUM ET L'AIR EXTÉRIEUR 35

FIGURE 16: APPORT DE CHALEUR JOURNALIER DU MUR SOLAIRE DURANT LE MOIS DE DÉCEMBRE 2002 POUR LES DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DÉFICIT ET L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ENTRE LE PLÉNUM ET L'AIR EXTÉRIEUR 35

FIGURE 17: APPORT DE CHALEUR JOURNALIER DU MUR SOLAIRE DURANT LE MOIS DE JANVIER 2003 POUR LES DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DÉFICIT ET L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ENTRE LE PLÉNUM ET L'AIR EXTÉRIEUR 36

FIGURE 18: APPORT DE CHALEUR JOURNALIER DU MUR SOLAIRE DURANT LE MOIS DE FÉVRIER 2003 POUR LES DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DÉFICIT ET L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ENTRE LE PLÉNUM ET L'AIR EXTÉRIEUR 36

FIGURE 19: APPORT DE CHALEUR JOURNALIER DU MUR SOLAIRE DURANT LE MOIS DE MARS 2003 POUR LES DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DÉFICIT ET L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ENTRE LE PLÉNUM ET L'AIR EXTÉRIEUR 38

FIGURE 20: APPORT DE CHALEUR JOURNALIER DU MUR SOLAIRE DURANT LE MOIS D'AVRIL 2003 POUR LES DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES DÉFICIT ET L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ENTRE LE PLÉNUM ET L'AIR EXTÉRIEUR 38

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : APPORT D'ÉNERGIE DU MUR SOLAIRE POUR LA JOURNÉE DU 2 JANVIER 2003[1] 33

TABLEAU 2 : APPORT DE CHALEUR (Q SOLAIRE) FOURNI PAR LE MUR SOLAIRE DE NOVEMBRE 2002 À AVRIL 2003 41

TABLEAU 3 : RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO_2 AVEC LE SYSTÈME DU MUR SOLAIRE POUR $T^{O}_{DÉFICIT}$ ILLIMITÉE ET $T^{O}_{DÉFICIT}$ $5^{O}C$ 43

TABLEAU 4 : RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE PAR LE MUR SOLAIRE POUR $T^{O}_{DÉFICIT}$ $5^{O}C$ 43

TABLEAU 5 : QUANTITÉ DE PROPANE UTILISÉE EN KW.H ET SON COÛT MENSUEL POUR LA POUPONNIÈRE AINSI QUE L'ÉNERGIE ÉCONOMISÉE PAR LE MUR SOLAIRE POUR $T^{O}_{DÉFICIT}$ ILLIMITÉE ET DE $T^{O}_{DÉFICIT}$ $5^{O}C$. 44

TABLEAU 6 : ÉCONOMIES DE PROPANE OBTENUES AVEC LE MUR SOLAIRE POUR $T^{O}_{DÉFICIT}$ ILLIMITÉE ET DE $T^{O}_{DÉFICIT}$ $5^{O}C$ 45

TABLEAU 7 : BUDGET PARTIEL POUR LE CALCUL DU SEUIL DE RENTABILITÉ D'UNE POUPONNIÈRE NEUVE DE 1000 PLACES AVEC OU SANS MUR SOLAIRE 47

TABLEAU 8 : ÉCONOMIES DE CHAUFFAGE ET SEUIL DE RENTABILITÉ À L'ACHAT D'UN MUR SOLAIRE POUR $T^{O}_{DÉFICIT}$ ILLIMITÉE ET $T^{O}_{DÉFICIT}$ $5^{O}C$. 48

SOMMAIRE

TITRE DU PROJET

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

OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif général 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 sont :

- d'établir un bilan de chaleur entre la psychrométrie de l'air extérieur et celle de l'air à l'entrée d'un corridor de préchauffage dans des conditions d'opération hivernales;
- d'évaluer l'apport de chaleur utile provenant d'un mur solaire pour préchauffer l'air entrant dans la pouponnière en ventilation hivernale;
- d'évaluer l'impact d'un mur solaire sur le coût de chauffage;
- d'évaluer le seuil de rentabilité économique du mur solaire pour le cas d'une pouponnière;
- d'évaluer l'impact de l'utilisation d'un mur solaire sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES);
- de recommander des adaptations possibles afin d'optimiser le système de mur solaire.

RÉSUMÉ

Reeder (1983), Ma et al., (1986) et Siebenmorgen et al. (1986) ont évalué l'efficacité des capteurs solaires dans des bâtiments porcins. Ils ont observé des rendements énergétiques jusqu'à 70%. Dans ce projet, l'évaluation d'un système de mur solaire a permis de constater les impacts économiques et environnementaux d'une telle technologie. L'expérimentation d'une durée de 6 mois a permis d'établir un bilan de chaleur précis et d'estimer l'efficacité du mur solaire. En bref, dans les conditions de la Ferme Marisol, soit une pouponnière de 1 000 places située à Saint-Sylvestre de Beaurivage ayant un prix de propane moyen annuel de 0,39 $/l et en supposant une température de déficit thermique illimitée et de 5°C au niveau du corridor de préchauffage, les résultats obtenus sont les suivants :

- une économie annuelle de propane se situant entre 359 $ à 541 $, (une réduction de 23 à 31 % au coût global du chauffage) représentant une économie de 0,12 à 0,18 $ par porcelet produit pour les trois lots d'élevage (3 000 porcelets) issus d'une expérience d'une durée de 6 mois;
- le coût des investissements supplémentaires pour atteindre le seuil de rentabilité, varie entre 3325 et 5 013 $, en considérant un amortissement de 15 ans à un taux d'intérêt de 7 %;
- une réduction annuelle des émissions de CO_2 de 1 382 à 2 105 kg.

Cette étude démontre qu'il est avantageux, sous certaines conditions, d'installer un mur solaire. Il y a plusieurs avantages tels que l'économie d'énergie fossile, le confort pour les animaux et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, lors de l'acquisition d'une telle technologie, il est important de consulter des experts et d'adopter une régie de ventilation et de chauffage adéquate pour tirer le maximum d'efficacité.

1.0 CONTEXTE

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 afin de réduire ces coûts. Le climat froid et rigoureux du Québec impose l'utilisation d'un système de chauffage dans les bâtiments porcins durant la saison froide.

En utilisant les modèles de l'ASRA 1998-1999, Pouliot (2001) a démontré que 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. La rationalisation des coûts de chauffage implique, un ajustement minutieux 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 l'utilisation des sources d'énergie alternatives et économiques.

Au Québec, la durée d'ensoleillement maximale quotidienne au mois de décembre est de 1,7 heures; soit la période d'ensoleillement la plus courte de l'année, comparativement à 3,3 heures par jour pour le mois de septembre. (Environnement Canada, 2003b). En observant la distribution de l'énergie solaire au Canada, la région du sud-ouest du Québec jouit d'une durée d'ensoleillement maximale quotidienne moyenne de 2,8 heures en décembre, ce qui correspond à la valeur maximale canadienne (figure 1).

Compte tenu des conditions climatiques 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, des objectifs de production et des conditions d'ambiance.

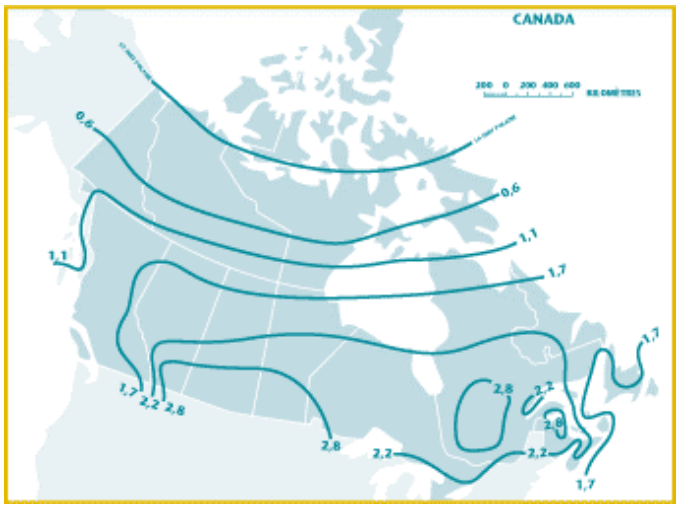


Figure 1 : ***Nombre moyen d'heures d'ensoleillement maximal par jour en décembre au Canada (Tiré de : Environnement Canada, 2003b)***

2.0 NOTIONS DE BASE

2.1 Bilan de chaleur en ventilation et chauffage

Lors de la conception d'un système de ventilation, il est important de déterminer les besoins en débit de ventilation minimum et maximum en fonction du stade physiologique des porcs (pouponnière, engraissement, mise bas ou 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 utilisée pour évaluer les besoins en ventilation et en chauffage (Marquis et Désilets, 2000) :

$$\mathbf{Qs + Qm + Qch = Qb + Qv + Qe} \quad (1)$$

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 (un mur solaire et / ou des aérothermes) (kW)

Qb = chaleur évacuée par les portes, fondations, 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)

La quantité de chaleur sensible évacuée par ventilation est obtenue comme suit (Marquis et Désilets, 2000) :

$$\mathbf{Qv = m_a \times C_p \times (T_{int} - T_{ext})} \quad (2)$$

où :

Qv = échange de chaleur par ventilation (kW)

m_a = débit massique de l'air de ventilation (kg/s)

T_{ext} = température de l'air à l'extérieur du bâtiment (K)

T_{int} = température de l'air dans le bâtiment (K)

C_p = chaleur massique de l'air (kJ/kg air sec .K)

La quantité de chaleur supplémentaire requise (à être fournie par les équipements de chauffage) pour maintenir la température dans le bâtiment est obtenue comme suit (à partir de l'équation 3) :

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

Une nouvelle expression du bilan peut être obtenue en combinant les équations 2 et 3.

$$\mathbf{Qch = m_a \times [C_p \times (T_{int} - T_{ext})] + Qb + Qe - Qs - Qm} \quad (4)$$

L'équation 4 permet de constater que l'énergie apportée par le mur solaire pour préchauffer l'air (Qch produit du mur solaire), réduit l'apport de chaleur produite par les installations de chauffage d'appoint (Qch produit des aérothermes).

2.2 La récupération d'énergie et le mur solaire

2.2.1 Le principe général d'un mur solaire

Il existe plusieurs technologies permettant de récupérer l'énergie solaire à l'aide d'un mur solaire. Deux types de systèmes sont utilisés pour récupérer l'énergie solaire dans les bâtiments porcins : les systèmes solaires passif et actif (Muehling, A.J. et al., 1990). Le chauffage solaire passif consiste par le réchauffement d'une surface foncée qui absorbe la radiation solaire. Le chauffage solaire actif requiert des équipements pour récupérer, transférer et emmagasiner l'énergie solaire à l'aide d'un fluide calorifique. De façon générale, ce type de système est composé d'un mur solaire et d'un ventilateur. Ce dernier transfère la chaleur à l'intérieur du bâtiment à l'aide de l'air qu'il déplace. Dans les deux cas, la quantité de chaleur récupérée varie en fonction de l'ensoleillement journalier.

La technologie étudiée dans ce projet permet la récupération de l'énergie solaire en utilisant l'effet combiné de la convection et du rayonnement solaire sur une tôle noire perforée (système actif). Le mur solaire consiste en un mur à double paroi en tôle (aluminium ou acier) de couleur noire, dont la surface supérieure perforée est chauffée par le rayonnement solaire. Plus spécifiquement, le système fonctionne de la façon suivante (figure 2) :

- la tôle noire perforée est chauffée par la radiation solaire;
- les ventilateurs à l'intérieur du bâtiment créent une pression négative entre le mur solaire et l'intérieur du bâtiment;
- de l'extérieur, l'air s'infiltre à travers le mur perforé par des trous minuscules, l'air est ainsi chauffé par la tôle par convection;
- l'air circulant entre la tôle perforée et le mur du bâtiment permettra, en outre, de récupérer la perte de chaleur provenant de l'intérieur du bâtiment pendant l'hiver;
- l'air circule dans le plénum vers un corridor de préchauffage situé dans l'entretoit du bâtiment et ensuite est distribué dans les chambres d'élevage.

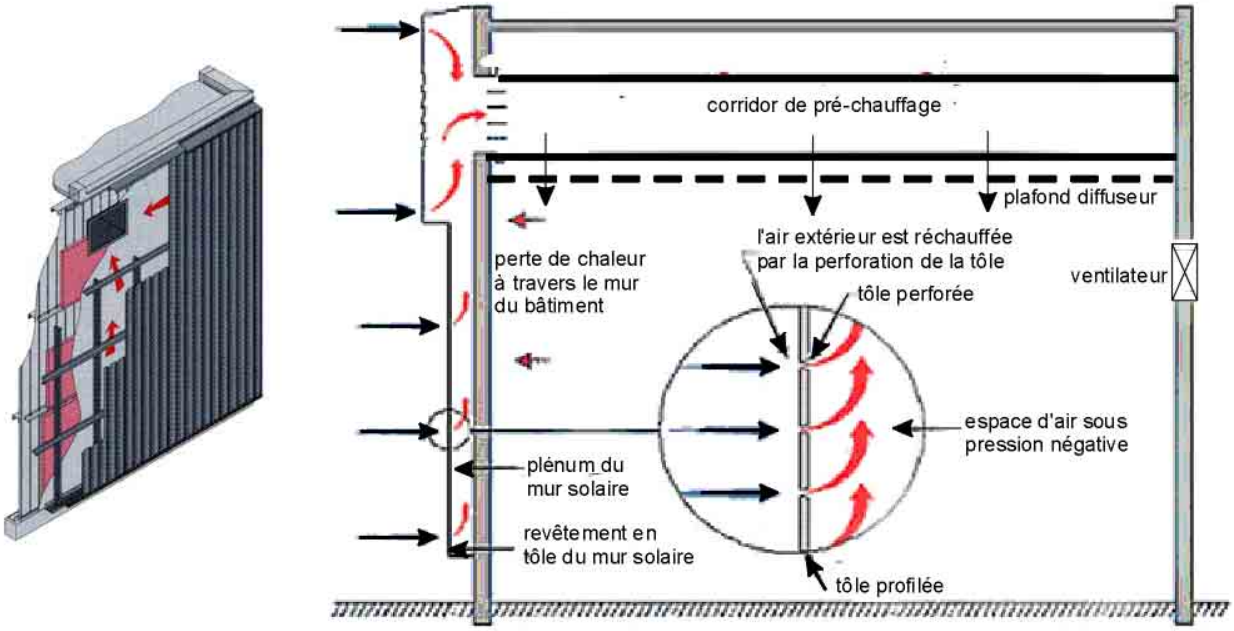


Figure 2: ***Principe de fonctionnement d'un mur solaire (SOLARWALL©)***
Adapté de Solarwall, 2003

2.2.2 Les équations régissant le bilan thermique d'un mur solaire

Afin de quantifier l'apport énergétique du mur solaire, un bilan de chaleur peut être 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 par le mur solaire est calculée selon l'équation générale suivante (Marquis et Désilets, 2000):

$$\mathbf{Q_{Solaire} = D_{Plénum} \times (1 / V_{Solaire}) \times C_p \times (T_{Plénum} - T_{EXT})} \qquad (5)$$

où :

$Q_{Solaire}$: énergie fournie par le mur solaire sans limite de température de déficit thermique (kW) (notion expliquée à la prochaine section)

$D_{Plénum}$: débit d'air à la sortie du mur solaire (m^3/s)

$V_{Solaire}$: masse volumique de l'air à la sortie du mur solaire (m^3/kg)

C_p : chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg .K)

T_{EXT} : température de l'air extérieur (K)

$T_{Plénum}$: température de l'air à la sortie du mur solaire (K)

Les formules utilisées pour le calcul des différents paramètres de la charte psychométrique nécessaires pour évaluer l'apport de chaleur sont énumérées à l'annexe 1.

Cependant, toute l'énergie apportée par le mur solaire n'est pas nécessairement utile. En effet en été, son apport n'est pas requis car la température extérieure est élevée. Afin d'être en mesure d'estimer le plus précisément possible l'économie d'énergie engendrée par un mur solaire, il faut tenir compte d'un certain seuil de température.

2.2.3 Température de déficit, notion d'énergie utile et contribution énergétique

<u>Température de déficit</u>

La détermination de la température de déficit thermique ($T^{o}_{déficit}$) revêt une grande importance puisqu'elle affecte directement le bilan de chaleur et les performances du mur solaire (équation 6). Il est important de bien saisir la notion de température de déficit thermique. 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 à l'équation 4) est nécessaire à partir de la $T^{o}_{déficit}$ et son fonctionnement s'intensifiera par la suite avec la diminution de la température extérieure (T_{EXT}). Il faut noter que la $T^{o}_{déficit}$ varie en fonction du type d'élevage, de la température de consigne désirée dans la chambre, du poids et du nombre de porcs par superficie de plancher.

La température de $T^{o}_{déficit}$ varie en fonction du poids des animaux présents dans le bâtiment et de la température de consigne. En effet, plus les animaux sont jeunes, plus ils sont légers et plus élevée sera la consigne de température, augmentant ainsi la $T^{o}_{déficit}$. Par ailleurs, lorsque le poids des animaux augmentera, accroissant le dégagement de chaleur sensible, alors la température de consigne diminuera tout comme la $T^{o}_{déficit}$. Ainsi, le chauffage démarrera plus tardivement, soit à une T_{EXT} plus froide.

Énergie solaire utile

L'énergie solaire utile ($Q_{solaire}$) est définie comme la quantité d'énergie apportée par le mur solaire permettant de réduire la consommation de gaz propane par temps froid dans le bâtiment :

$$\mathbf{Q_{Solaire\ x\ ºC} = D_{Plénum} \times (1 / V_{Solaire}) \times C_p \times (T_{Plénum} - T_{EXT})} \qquad (6)$$

où :

$Q_{Solaire x ºC}$: énergie utile fournie par le mur solaire pour une température inférieure à $T^o_{déficit x ºC}$ (kW)

$D_{Plénum}$: débit d'air à la sortie du mur solaire (m^3/s)

$V_{Solaire}$: masse volumique de l'air à la sortie du mur solaire (m^3/kg)

C_p : chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg .^{o}C)

T_{EXT} : température de l'air extérieur (^{o}C)

$T_{Plénum}$: température de l'air à la sortie du mur solaire (^{o}C) respectant les conditions suivantes :

$T_{Plénum}$ est égale à :$T_{Plénum}$ si $T_{Plénum} \leq T^o_{déficit\ x ºC}$

sinon,

$T_{Plénum}$ est égale à $T^o_{déficit\ x ºC}$ si $T_{Plénum} \geq T^o_{déficit\ x ºC}$

Contribution énergétique

La contribution énergétique du mur solaire est le rapport entre l'apport d'énergie utile ($Q_{solaire}$) du mur solaire et de la quantité totale d'énergie requise pour le chauffage du bâtiment. La quantité totale d'énergie est égale à l'addition de l'énergie solaire utile ($Q_{solaire}$) et de la quantité d'énergie provenant du gaz propane ($E_{propane}$). La contribution énergétique du mur solaire est définie par l'équation suivante :

$$\mathbf{\underline{Contribution\ énergétique\ (\%)} = [Q_{solaire} / (Q_{solaire} + E_{propane})] \times 100} \qquad (7)$$

où :

$Q_{solaire}$: énergie sous forme de chaleur fournie par le mur solaire (MJ)

$E_{propane}$: énergie provenant du gaz propane pour le chauffage du bâtiment (MJ)

3.0 LES MURS SOLAIRES : PERFORMANCE ET RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

3.1 Performance attendue d'un mur solaire

Reeder (1983) et Siebenmorgen et al. (1986) ont évalué l'efficacité de l'énergie solaire avec des systèmes permettant d'emmagasiner l'énergie solaire disponible pour préchauffer l'air d'un bâtiment porcin (pouponnière et salle de mise bas). Ces systèmes de mur solaire, installés du côté sud, comprenaient un plénum relié à un accumulateur de chaleur (gravier et bloc de béton) avec un « recirculateur » qui permettait le préchauffage de l'air durant la nuit. Les travaux de recherche ont mesuré des variations des rendements variant de 0 à 33 % (Reeder, 1983) et de 23,1 à 71,4 % (Siebenmorgen et al., 1986). Ces résultats de rendement étaient définis comme étant le rapport entre l'énergie solaire emmagasinée par le mur solaire sur l'énergie solaire totale disponible.

Pour leur part, Ma et al., (1986), ont évalué un mur solaire dans une pouponnière muni d'un accumulateur de chaleur fait de béton poreux, le rendement moyen a été de 57,6 %. Selon ces chercheurs, le rendement énergétique pour ce genre de système varie en fonction de l'ensoleillement et du matériel utilisé comme revêtement pour le mur solaire. En plus, ils observaient la difficulté de séparer la performance du mur solaire de celle du système du bâtiment. En effet, l'énergie calculée dans l'expérimentation ne provenant pas uniquement du soleil car une partie des pertes de chaleur par les murs de la pouponnière était récupérée.

Au niveau économique, Reeder (1983) a évalué qu'un système de mur solaire avec accumulateur de chaleur coûtait, en 1983, 4,50 $ US par pi² de mur, incluant le matériel et la main-d'œuvre. À ce prix, il a évalué, que l'amortissement pourrait être d'environ 9 ans pour une pouponnière contenant 500 porcelets. Ces résultats ont été obtenus en Ohio lors d'expérimentations se déroulant en février et en mars au cours de laquelle la température est demeurée au-dessus de -7°C. Le climat de l'Ohio est moins rigoureux que celui du Québec, limitant la période d'utilisation optimale du mur solaire et par conséquent, sa contribution énergétique utile. Le prix du gaz propane considéré en 1983, était de 0,20 $ US/l.

Le système Solarwall a fait l'objet de plusieurs travaux mais uniquement dans le secteur industriel. Selon le manufacturier du système « SOLARWALL© », les performances techniques et économiques attendues dans le milieu industriel pour ce type de mur solaire sont les suivantes (Solarwall, 2003) :

- l'efficacité du système pour transformer le rayonnement solaire en chaleur 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 ^{o}C selon le débit d'air;
- durant les journées nuageuses, le mur solaire engendre des économies d'énergie pour le chauffage;
- une installation typique produit de 500 à 700 kW.h/m^2 d'énergie;
- les économies d'énergie vont de 10 à 60 \$/m^2 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.

3.2 Réduction des émissions de gaz à effet de serre

Selon une publication d'Agriculture Canada et du Conseil canadien du porc, l'agriculture canadienne produit de 10 à 12 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) totales au pays (Conseil canadien du porc, 2002). En l'absence de mesures d'atténuation, il a été évalué que les émissions dans ce secteur dépasseront de 18 % les niveaux de 1990. Ainsi, environ 11 % des émissions de GES prennent la forme du dioxyde de carbone (CO_2), 36 %, la forme du méthane (CH_4) et 53 % se présentent sous la forme d'oxyde nitreux (N_2O). Le Canada s'est engagé avec l'accord de Kyoto, à diminuer la moyenne de ses émissions annuelles de GES de 6 % sous les niveaux de 1990, durant la période de 2008 à 2012. Le secteur porcin se situe au troisième rang parmi le secteur des productions animales après les bovins de boucherie et les bovins laitiers par rapport à la production de GES. Plus précisément, il est estimé que le secteur porcin représente 20 % des émissions de source agricole de GES, soit 3 % des émissions nationales.

L'utilisation d'une technologie solaire préchauffant l'air entrant dans les bâtiments permettrait de réduire les émissions de CO_2, qui est un GES, engendrées par le secteur porcin. En effet, le propane est principalement utilisé pour chauffer les bâtiments porcins durant la saison froide. La combustion, même parfaite, de ce combustible génère une quantité importante de gaz carbonique. De plus, ce gaz carbonique n'est pas rejeté à l'extérieur du bâtiment, ceci engendre une concentration de CO_2 à l'intérieur des bâtiments d'élevage y réduisant la qualité de l'air et obligeant un plus grand nombre de changement d'air à l'heure. Ces conditions nécessitent plus de chauffage. Enfin, l'énergie solaire

représente une source d'énergie économique et respectueuse de l'environnement, permettant entre autres de réduire l'émission de CO_2.

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 reliée à la combustion du propane. Cette équation démontre que la combustion du gaz propane engendre une production de CO_2, qui est un gaz contribuant à l'effet de serre (GES) (Énergie, Mines et Ressources Canada, 1989).

$$\mathbf{C_3H_8 + 5O_2 \Rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 50{,}36\ MJ/kg} \qquad (8)$$

Il est possible d'estimer la diminution de production de CO_2, en utilisant l'énergie solaire comme alternative au propane en utilisant la formule suivante:

$$\mathbf{kg\ CO_2 = Q \times (1/VCAL) \times (1\ m^3/1000\ l) \times PCO_2} \qquad (9)$$

où:

kg CO_2 = quantité de CO_2 économisée par le mur solaire (kg)

Q = énergie fournie par le mur solaire (kJ)

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

PCO_2 = quantité de CO_2 produit par m^3 de propane brûlé = 1500 kg/m^3 (Environnement Canada, 2002)

4.0 DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS (MATÉRIELS)

4.1 Bâtiment et animaux

Le bâtiment instrumenté est une pouponnière construite en 2001, située à St-Sylvestre de Beaurivage et étant la propriété de la Ferme Marisol senc. Le bâtiment mesure 28,6 m de longueur et 14,6 m de largeur (figure 3). Il a une capacité totale de 1 000 porcelets répartis dans quatre chambres indépendantes contenant chacune 12 parcs d'une dimension de 2,13 m × 3,05 m (figure 4). Chaque chambre peut donc contenir 250 porcelets et la régie d'élevage est en « tout plein / tout vide ». Il s'agit d'une pouponnière chaude dont la consigne de température varie avec l'âge des porcelets, selon la charte d'ajustement fournie par le conseiller technique de la ferme. Dans le cadre du projet, les porcelets avaient un poids moyen en entrant 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 durant l'essai et la durée de croissance des porcelets était de 50 jours en moyenne.

Figure 3: Vue extérieure d'une pouponnière de la ferme Marisol

Figure 4: Intérieur d'une chambre de pouponnière

Le lisier était vidangé à toutes les semaines par un système de raclette. Les salles étaient lavées et désinfectées après le transfert des porcelets en engraissement. Après quelques jours de vide sanitaire, une nouvelle bande de porcelets était introduite dans chaque chambre.

Par temps froid, le débit minimum de ventilation était ajusté de façon à maintenir une bonne qualité d'air par temps froid. 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. Chaque chambre a un chauffage d'appoint, soit un aérotherme de 17,6 kW, contrôlé électroniquement, afin de maintenir la température désirée dans la pièce par temps froid.

Le corridor de préchauffage est localisé dans l'entretoit et couvre toute la longueur du bâtiment (28,6 m) (figure 5). La largeur du corridor 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. Deux aérothermes de 17,6 kW ont été installés lors de la construction mais n'ont pas été utilisés durant l'expérimentation.

Durant la période froide, l'air traverse le mur solaire avant de rentrer dans le corridor de préchauffage par une ouverture (deux portes de 0,38 m par 1,22 m). Durant la période chaude, ces portes sont fermées afin d'éviter que l'air se réchauffe inutilement.

Figure 5: Vue de l'intérieur du corridor de préchauffage

4.2 Le mur solaire et son installation sur le site

Un mur solaire (système SolAgra) a été installé sur toute la superficie (60 m^2) de l'extrémité sud, sud-est du bâtiment. La surface de contact du mur solaire permet un transfert de chaleur entre la paroi et l'air frais passant à travers les perforations. La circulation de l'air de l'extérieur du bâtiment vers les chambres de la pouponnière est décrit en quatre étapes et celles-ci sont décrites à la figure 6.

a. L'air extérieur circule par la perforation du revêtement du mur solaire et l'air se réchauffe par contact avec le métal chauffé par l'énergie solaire.

b. L'air du plénum du mur solaire entre dans le corridor de préchauffage par une ouverture spécialement aménagée.

c. Deux tuyaux de 0,61 cm, installés dans l'ouverture du plénum du mur solaire, permettent de mesurer la vitesse de l'air frais circulant dans le corridor de préchauffage.

d. Les entrées d'air d'une chambre de pouponnière, de type « plafond diffuseur » permettent une circulation d'air uniforme.

Figure 6: ***Circulation de l'air de l'extérieur du de la bâtiment vers une chambre pouponnière à la Ferme Marisol durant la saison froide.***

4.3 Description des équipements de mesure

Afin d'établir le bilan de chaleur du mur solaire (équation 6) les données requises sont la température de l'air extérieur, la température de l'air du plénum et le débit d'air. Les instruments de mesure suivants ont été installés à la pouponnière :

- À l'extérieur du bâtiment, une station météo équipée d'une sonde de température et d'humidité relative combinées et d'un capteur solaire, permettait de mesurer les conditions extérieures;
- 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 fourni par le mur solaire. Un système d'acquisition de données enregistrait les mesures. De plus, un compteur permettait de mesurer la quantité de gaz propane utilisée par les aérothermes dans les chambres.

4.3.1 Mesure des caractéristiques de l'air dans le corridor de préchauffage et le débit

La disposition des instruments de mesure est montrée aux figures 7 et 8. Quatre sondes de température (Thermocouple type T (cuivre-constantin), Omega, Laval, QC) et deux sondes d'humidité relative (Sonde Rotronic F2, Chevrier Instrument, Montréal, QC) étaient installées dans le corridor de préchauffage de la pouponnière (figure 9a). Cependant ces sondes étaient installées à titre indicatif seulement parce que ces données ne sont pas nécessaires pour calculer l'énergie utile. La précision des sondes de température est de ±0,5 °C et celle de l'humidité relative est de ±5 %. Deux tuyaux en acier galvanisé, de 0,61 m de diamètre et d'une longueur 2,44 m, ont été installés dans le corridor de préchauffage à la sortie du plénum du mur solaire (figure 6c). Un des deux tuyaux était muni d'une sonde (Flowmeter, modèle GF90 FCI cie, California, USA) (figure 6c). Cette sonde mesure la vitesse de l'air et comme la surface du tuyau est connue, le débit d'air est calculé (Débit (m^3/s) = Surface (m^2) × Vitesse (m/s)). Cet appareil a une précision de ±0,1%. La sonde est calibrée avec différentes vitesses d'air dans le corridor de préchauffage. Aussi, à l'aide d'un anémomètre (TSI Incorporated, série 01060150, St-Paul, MN, USA) installé dans un tuyau, les mesures observées lors de la calibration ont permis de valider que le débit d'air était la même dans les deux tuyaux. Donc, pour déterminer le débit d'air total du plénum du mur solaire, le débit d'air calculé dans un tuyau est multiplié par deux. Douze mesures de vitesse d'air étaient prises pour chacun des cinq débits d'air obtenus lors de la calibration.

La figure 1 (annexe 2) montre les résultats de la calibration qui a permis d'obtenir une équation linéaire utilisée pour calculer le débit d'air dans un tuyau.

4.3.2 Mesure des caractéristiques de l'air à la sortie du mur solaire et dans l'entretoit.

Une sonde de température et d'humidité relative combinée (sonde HR Vaisala, HMP-35C, Campbell Scientific, Edmonton, Ab) était installée dans le plénum du mur solaire à 2,0 m au-dessous des portes du plénum du mur solaire au niveau du corridor de préchauffage. La précision de la sonde d'humidité relative est de ±0,3 %. La précision de la sonde de température est de ±0,2 % à 20 °C et de ±0,3 % à -10 °C. Dans l'entretoit, une sonde de température de type T était installée, ainsi la température de l'air dans l'entretoit était enregistrée pendant le projet.

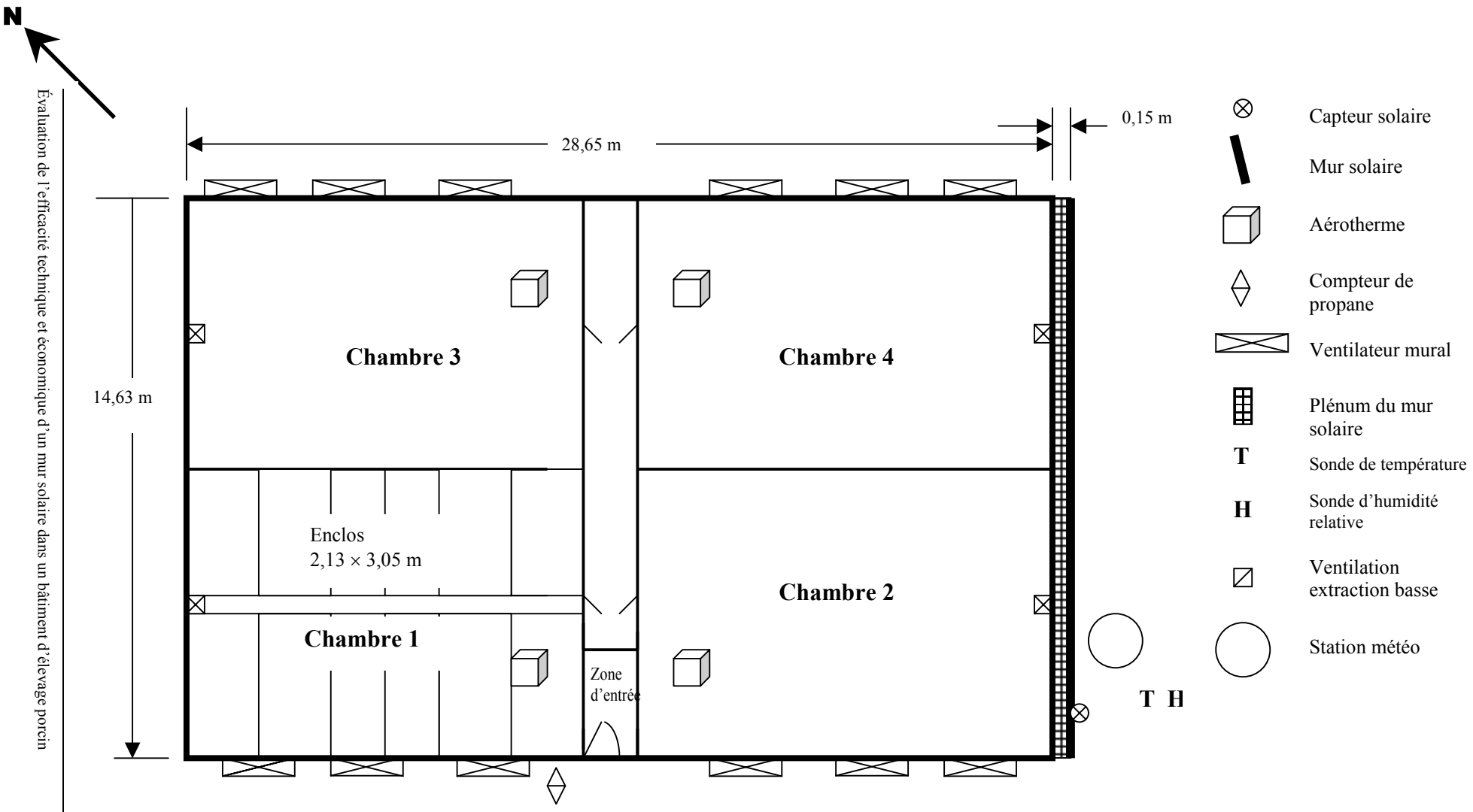


Figure 7: ***Plan de plancher de la pouponnière et schéma d'aménagement des appareils de mesure***

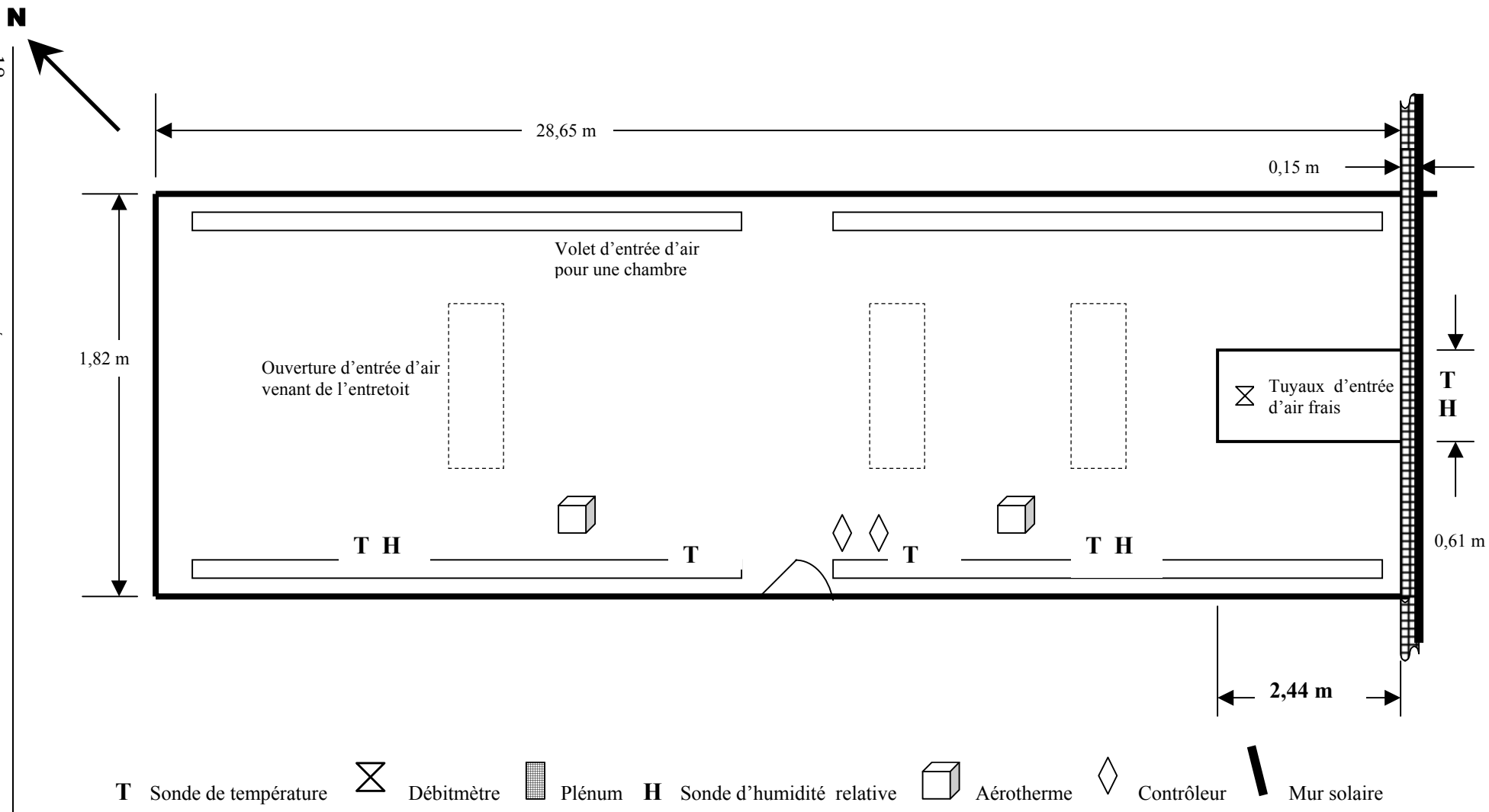


Figure 8: ***Vue en plan du corridor de préchauffage et schéma d'aménagement des appareils de mesure***

4.3.3 Mesure de la consommation de gaz propane

Un compteur mesurant la consommation de gaz propane (Canadian Meter, model ACM-250, GRG Propane, Ste Marie, QC, figure 9d) était installé à l'extérieur de la pouponnière sur la conduite de gaz principale alimentant le bâtiment. La précision du compteur est de 0,01 m^3 (1 m^3= 3,7429 l, température 15°C). Le facteur de conversion pour la pression atmosphérique n'a pas été utilisé. Les aérothermes utilisés comme chauffage d'appoint sont de marque (L.B. White, modèle 346KC-3, 17,6 kW) (60,000 Btuh)).

4.3.4 Mesure des conditions climatiques extérieures

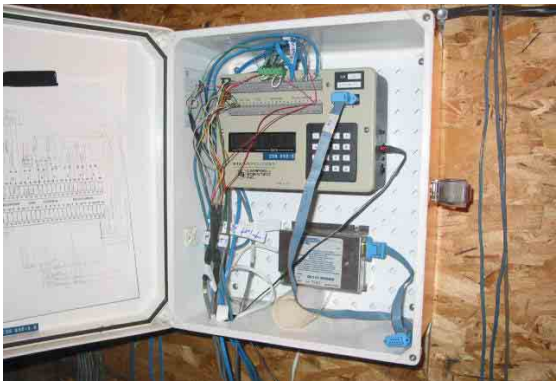
À l'extérieur du bâtiment, une station météo équipée d'une sonde de température et d'humidité relative combinés (HR Vaisala, HMP-35C, Campbell Scientific, Edmonton, Ab., figure 9f) était installée. La station météo était muni d'un protecteur de radiation (Radiation shield, Campbell Scientific, Edmonton, Ab.), elle était installée à 2,5 m du mur solaire sur un poteau à 1,2 m du sol. Un capteur de rayonnement solaire (Pyranomètre Ly-Cor, Campbell Scientific, Edmonton, Ab.) était fixé directement sur le revêtement du mur solaire à une hauteur de 2,0 m du sol. Le capteur solaire permettait de mesurer les durées d'ensoleillement et de comparer l'intensité du rayonnement solaire quotidiennement.

4.3.5 Système d'acquisition de données

Tous les instruments de mesure étaient raccordés aux deux systèmes d'acquisition de données (21X Micrologger, Campbell Scientific, Edmonton, Ab.). Un des systèmes d'acquisition de données était relié à un modem (DC112, Campbell Scientific, Edmonton, Ab., figure 9c) connecté à la ligne téléphonique du bâtiment. Lors des visites à la pouponnière, un ordinateur portable (Toshiba 310 CDS) était utilisé pour importer les données enregistrées par le 21X non relié au modem. Toutes ces données étaient compilées à l'aide du logiciel de communication, PC208W. L'horloge des deux systèmes 21X était synchronisée. Celle-ci étaient programmée pour obtenir un intervalle de mesure aux 10 minutes. Il est important de noter que ce système prend les lectures de données en continu aux 10 secondes mais il enregistre la lecture moyenne pour la période de 10 minutes.

a. Sonde de température (thermocouple) et sonde d'humidité combinées

b. Aérotherme au propane pour le chauffage d'appoint



c. Système d'acquisition de données et modem reliés à la ligne téléphonique

d. Compteur de propane

e. Capteur de rayonnement solaire

f. Station météo munie d'un protecteur de radiation (température et humidité)

Figure 9: Équipements de mesure pour établir le bilan de chaleur du mur solaire

5.0 MÉTHODOLOGIE

5.1 Période d'expérimentation et prise de données

Ce projet d'une durée totale de six mois, s'est déroulée du 1er novembre 2002 au 1er mai 2003. Les équipements servant à l'expérimentation ont été installés lors de trois visites sur le site d'expérimentation soient : le 26 septembre 2002, les 11 et 17 octobre 2002.

Une période de mise au point des équipements a été effectuée du 24 octobre au 1er novembre 2002. Pendant cette période, le calibrage de l'équipement, la fiabilité de l'installation et du système d'acquisition de données ont été vérifiés.

Durant l'expérimentation, des capots en polystyrène ont été installés sur les ouvertures des ventilateurs (paliers d'été) dans les chambres logeant des porcelets de 5 à 14 kg. Il a été observé qu'il y avait une perte de chaleur importante et une infiltration d'air indésirable par les ventilateurs lorsqu'ils ne fonctionnaient pas par temps froid. L'installation des capots de polystyrène ont permis de diminuer ces inconvénients et en même temps maximiser le débit d'air au travers du mur solaire.

Une visite sur le site de la pouponnière a été effectuée à des intervalles de trois semaines. Afin de répondre aux normes sanitaires de l'élevage, un retrait de 48 heures pour les visiteurs a été respecté. Une fiche de visite était remplie et signée à chaque visite (annexe 3). À ce moment, une vérification de l'équipement était effectuée et certaines données, comme le temps de fonctionnement des aérothermes et les mesures du capteur solaire, étaient enregistrées sur un ordinateur portable Durant la visite, les mesures journalières de consommation de propane notées par le gérant de ferme étaient saisies sur l'ordinateur portable.

Les données du 21X connecté au modem étaient importées à distance et enregistrées sur le serveur du CPDQ, trois fois par semaine. De plus, lors de chaque connexion à distance, le programme (PC208W) permettait de vérifier les données en direct des divers instruments pour ainsi en vérifier le bon fonctionnement. Comme vérifications supplémentaires, le logiciel Excel (2002) était utilisé pour valider les informations et suivre l'évolution des différentes variables. Par exemple, les données de température et d'humidité de l'air extérieur et celles à la sortie du plénum du mur solaire étaient suivies hebdomadairement à l'aide de graphiques (annexe 4).

La température journalière minimale et maximale de chaque chambre de la pouponnière était enregistrée sur une fiche de régie (annexe 5). La température de la chambre était ajustée selon les besoins des porcelets et les recommandations du technicien d'élevage. Aussi, l'inventaire des porcelets était enregistré à chaque jour (annexe 6) et le poids moyen journalier était estimé. De plus, la pesée des porcelets était faite au début et à la fin du lot d'élevage.

Le capteur solaire indiquait l'intensité du rayonnement solaire sur le mur solaire et il permettait d'évaluer la durée de l'ensoleillement. La durée d'ensoleillement était calculée avec le nombre d'intervalles que le capteur enregistrait une lecture supérieure à 0.

L'apport de chaleur quotidien du mur solaire (équation 5) est obtenu avec la sommation de 144 opérations (calcul de l'apport de chaleur pour 10 minutes) à partir de 144 mesures quotidiennes observées pour chaque variable. La moyenne quotidienne d'une variable (température, débit) est la valeur moyenne arithmétique des 144 observations mesurées.

En plus, les données climatiques de la région de Québec (Aéroport de Québec) ont été obtenu pour les cinq dernières années, de 1998 à 2003 (Environnement Canada, 2003a). Les données étudiées sont la température, l'humidité, le rayonnement solaire et la durée d'ensoleillement. Ces valeurs permettent de comparer partiellement le climat hivernal de 2003 à celui des années précédentes.

5.2 Calcul de l'énergie utile fournie par le mur solaire

Afin d'établir la $T^{o}_{déficit}$ dans le cadre du présent projet, une simulation a été effectuée. Afin de déterminer la $T^{o}_{déficit}$, les données du tableau 2 plus loin dans le rapport, 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 ^{o}C. Ainsi, la $T^{o}_{déficit}$ moyenne pour les six mois de test a été évaluée à environ 5 ^{o}C (Pouliot, 2003). Étant donné que le bâtiment étudié était en rotation (âge de porcelets différents d'une chambre à l'autre), c'est cette $T^{o}_{déficit}$ moyenne pour les six mois qui sera considérée. La $T^{o}_{déficit}$ aura comme point de référence, l'intérieur du corridor de préchauffage. Toutefois, il faut noter que la $T^{o}_{déficit}$ peut varier selon les cas (bâtiment « tout plein / tout vide » au lieu de rotation, débit de ventilation, isolation, etc.).

En se basant sur l'équation (11), le cas dans lequel la $T^{o}_{déficit}$ = 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 $T^{o}_{déficit}$ (5°C) . Par conséquent, l'énergie

fournie par le mur solaire permet de diminuer la consommation de propane et de faire une économie d'énergie.

Par contre, avec les mêmes conditions de température extérieure (-10°C) et la $T^{o}_{déficit}$ = 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 $T^{o}_{déficit}$ (5 °C). Ainsi, ce surplus de 4 °C ne sera pas considéré comme de l'énergie utile car le système de chauffage d'appoint (figure 9b) n'a pas besoin de fonctionner. Dans cette exemple, l'économie d'énergie sera engendrée lorsque 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 $T^{o}_{déficit}$ 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, voici les différentes $T^{o}_{déficit}$ qui ont été assumées : 10, 5, 0, -5 et -10°C.

$$\mathbf{Q_{Solaire10C} = D_{Plénum} \times (1 / V_{Solaire}) \times C_p \times (T_{Plénum} - T_{EXT})} \qquad (10)$$

où :

$Q_{Solaire10C}$: énergie utile fournie par le mur solaire pour une $T^{o}_{déficit}$ inférieure à 10°C (kW)

$D_{Plénum}$: 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 (m^3/kg)

C_p : chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg °C)

T_{EXT} : température de l'air extérieur (°C)

$T_{Plénum}$: température de l'air à la sortie du mur solaire (°C) respectant les conditions suivantes :

$T_{Plénum}$ est égale à : $T_{Plénum}$ si $T_{Plénum} \leq T^{o}_{déficit\ 10C}$

sinon,

$T_{Plénum}$ est égale à $T^{o}_{déficit\ 10C}$ si $T_{Plénum} \geq T^{o}_{déficit\ 10C}$

où : $T^{o}_{déficit}$ de 10 °C assumée pour ce bilan de chaleur.

$$\mathbf{Q_{Solaire5C} = D_{Plénum} \times (1 / V_{Solaire}) \times C_p \times (T_{Plénum} - T_{EXT})} \quad (11)$$

où :

$Q_{Solaire5C}$: énergie utile fournie par le mur solaire pour une $T^o_{déficit}$ inférieure à 5 ^oC (kW)

$D_{Plénum}$: 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 (m^3/kg)

C_p : chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg ^oC)

T_{EXT} : température de l'air extérieur (^oC)

$T_{Plénum}$: température de l'air à la sortie du mur solaire (^oC) respectant les conditions suivantes :

$T_{Plénum}$ est égale à $T_{Plénum}$ si $T_{Plénum} \leq T^o_{déficit\ 5C}$

sinon,

$T_{Plénum}$ est égale à $T^o_{déficit\ 5C}$ si $T_{Plénum} \geq T^o_{déficit\ 5C}$

où : $T^o_{déficit}$ de 5 ^oC assumée pour ce bilan de chaleur.

$$\mathbf{Q_{Solaire0C} = D_{Plénum} \times (1 / V_{Solaire}) \times C_p \times (T_{Plénum} - T_{EXT})} \quad (12)$$

où :

$Q_{Solaire0C}$: énergie utile fournie par le mur solaire pour une $T^o_{déficit}$ inférieure à 0 ^oC (kW)

$D_{Plénum}$: 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 (m^3/kg)

C_p : chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg ^oC)

T_{EXT} : température de l'air extérieur (^oC).

$T_{Plénum}$: température de l'air à la sortie du mur solaire (^oC) respectant les conditions suivantes :

$T_{Plénum}$ est égale à $T_{Plénum}$ si $T_{Plénum} \leq T^o_{déficit\ 0C}$

sinon,

$T_{Plénum}$ est égale à $T^o_{déficit\ 0C}$ si $T_{Plénum} \geq T^o_{déficit\ 0C}$

où : $T^o_{déficit}$ de 0 ^oC assumée pour ce bilan de chaleur.

$$Q_{Solaire\text{-}5C} = D_{Plénum} \times (1 / V_{Solaire}) \times C_p \times ((T_{Plénum}) \text{ ou } (T_{Solaire\text{-}5C})) - (T_{EXT}) \quad (13)$$

où :

$Q_{Solaire\text{-}5C}$: énergie utile fournie par le mur solaire pour une $T^o_{déficit}$ inférieure à -5 ^oC (kW)

$D_{Plénum}$: 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 (m^3/kg)

C_p : chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg ^oC)

T_{EXT} : température de l'air extérieur (^oC)

$T_{Plénum}$: température de l'air à la sortie du mur solaire (^oC) respectant les conditions suivantes :

$T_{Plénum}$ est égale à $T_{Plénum}$ si $T_{Plénum} \leq T^o_{déficit\ -5C}$

sinon,

$T_{Plénum}$ est égale à $T^o_{déficit\ -5C}$ si $T_{Plénum} \geq T^o_{déficit\ -5C}$

où : $T^o_{déficit}$ de -5 ^oC assumée pour ce bilan de chaleur.

$$Q_{Solaire\text{-}10C} = D_{Plénum} \times (1 / V_{Solaire}) \times C_p \times ((T_{Plénum}) \text{ ou } (T_{Solaire\text{-}10C})) - (T_{EXT}) \quad (14)$$

où :

$Q_{Solaire\text{-}10C}$: énergie utile fournie par le mur solaire pour une $T^o_{déficit}$ inférieure à -10 ^oC (kW)

$D_{Plénum}$: 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 (m^3/kg)

C_p : chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg ^{o} C)

T_{EXT} : température de l'air extérieur (^oC).

$T_{Plénum}$: température de l'air à la sortie du mur solaire (^oC) respectant les conditions suivantes :

$T_{Plénum}$ est égale à $T_{Plénum}$ si $T_{Plénum} \leq T^o_{déficit\ 10C}$

sinon,

$T_{Plénum}$ est égale à $T^o_{déficit\ -10C}$ si $T_{Plénum} \geq T^o_{déficit\ 10C}$

où : $T^o_{déficit}$ de -10 ^oC assumée pour ce bilan de chaleur.

5.3 Paramètres pour calculer l'apport de chaleur fourni par le mur solaire

Afin de valider les données enregistrées durant l'expérimentation, le logiciel Excel (2002) a été utilisé pour détecter les aberrations numériques. Les critères pour détecter les aberrations étaient les suivants :

- Si la température de l'air extérieur était plus grande que la température à la sortie du plénum du mur solaire ($T_{ext} > T_{plénum}$) ;
- Si le débit d'air à la sortie du plénum du mur solaire était plus grand que 2,6 m³/s;
- Si le débit d'air à la sortie du mur solaire avait une valeur négative.

Après avoir complété ces vérifications, les paramètres suivants ont été établis pour calculer l'apport de chaleur du mur solaire pour chaque intervalle de 10 minutes:

- Si la température de l'air extérieur était plus grande que la température à la sortie du plénum du mur solaire, alors il ne fallait pas considérer cette donnée pour calculer l'apport de chaleur. Ceci implique que $Q_{Solaire} = 0$. Ce phénomène peut s'expliquer par la précision de la sonde de température qui est de ±0,3 % ou la présence d'un problème au niveau de la sonde.
- Si le débit d'air à la sortie du mur solaire était plus grand que 2,6 m³/s, alors la valeur du débit d'air était corrigé en fonction de la donnée précédente et suivante en calculant la moyenne de ces deux données. Les données supérieures à 2,6 m³/s étaient corrigées car elles dépassaient la vitesse d'air maximale recommandée par le manufacturier quant à la précision de l'anémomètre. Toutefois, très peu de données furent corrigées. Par exemple, pour trois données enregistrées: 1,9, 2,7 et 1,7 m³/s, la première étape serait de reconnaître la valeur 2,7 m³/s qui devait être corrigée, la deuxième étape consistait à corriger la valeur 2,7 m³/s en faisant la moyenne de ((1,9 + 1,7) / 2 = 1,8 m³/s), la troisième étape était de remplacer la valeur 2,7 m³/s dans le fichier de données par 1,8 m³/s.
- Si le débit d'air à la sortie du mur solaire était négatif, alors le débit d'air était corrigé en fonction de la mesure précédente et suivante en calculant la moyenne de ces deux données. La correction du débit d'air était effectué comme expliquée à l'exemple précédente. Une valeur négative du débit d'air peut s'expliquer par la précision limitée de l'anémomètre pour les débits d'air faibles à moins de 0,1 m³/s.
- Si la différence entre la température à la sortie du mur solaire et la température de l'air extérieur était plus petite que 1 °C , l'apport de chaleur était considéré comme nul, c'est-à-dire que $Q_{Solaire} = 0$. Ceci s'explique par la précision de la sonde de température qui est de ±0,3 %.

Tous ces paramètres étaient appliqués pour les apports de chaleur, $Q_{solaire10C}$ à $Q_{solaire-10C}$, en considérant les températures de consigne dans le corridor de préchauffage qui les caractérisent. Ainsi, le diagramme logique schématise l'application de ces divers paramètres (figure 10).

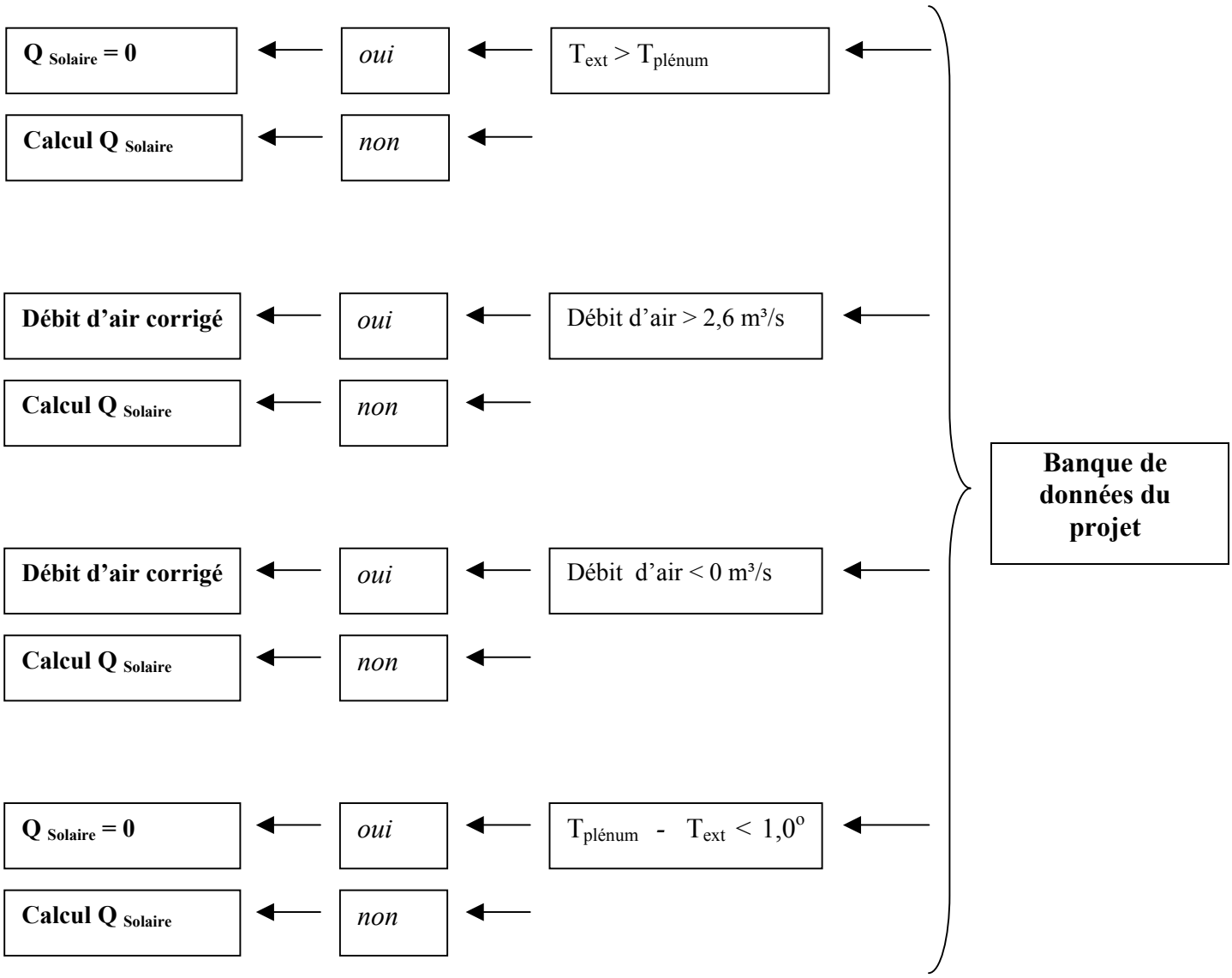


Figure 10 ***Diagramme logique présentant les validations pour le calcul de l'apport de chaleur par le mur solaire.***

6.0 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

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

Les données climatiques de la région de Québec (Aéroport de Québec) des cinq dernières années, de 1998 à 2003 sont listées à l'annexe 7. Selon la figure 11, les températures moyennes mensuelles entre les mois de novembre 2002 et avril 2003 avaient tendance à être légèrement inférieures à la moyenne des cinq dernières années (1998–2003) de 2,7 ^{o}C mensuellement. Mais elles se maintenaient à l'intérieur de l'écart type des températures de 1998 à 2003.

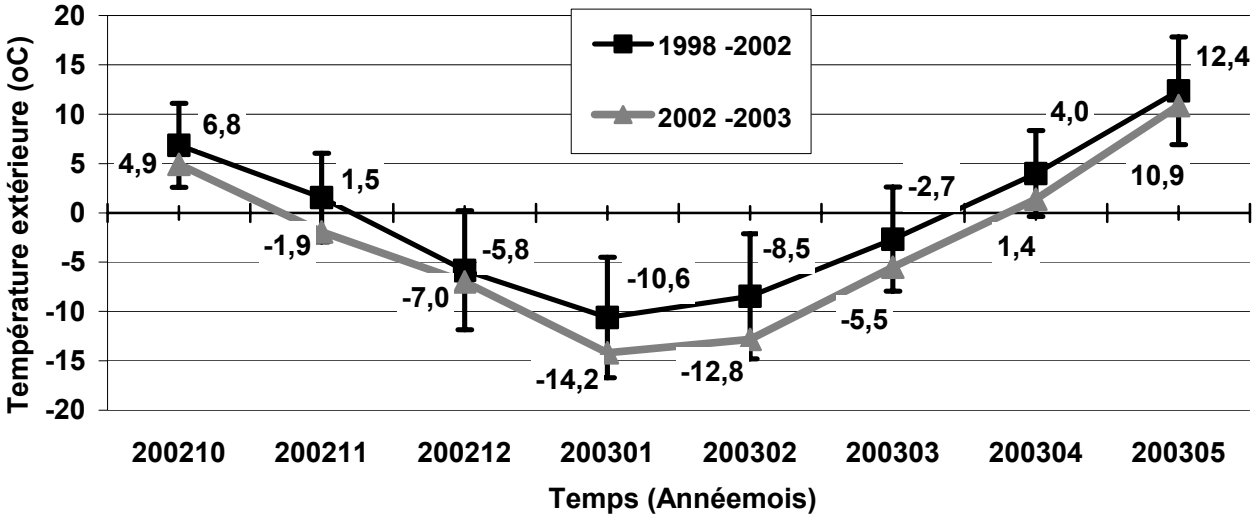


Figure 11: ***Température mensuelle moyenne extérieure (1998-2003) (Adapté de : Environnement Canada, 2003a).***

De plus, pour les mêmes mois, le rayonnement solaire moyen mensuel de 2002-2003 avait tendance à être plus faible que les cinq dernières années de 211 kJ/m^2 mensuellement. Mais il se maintenait à l'intérieur de l'écart type du rayonnement solaire de 1998 à 2003 (figure 12). En annexe 8, les graphiques illustrant la température moyenne et le rayonnement solaire moyen pour les mois d'octobre à mai pour chacune des années de 1998 à 2003 sont présentés.

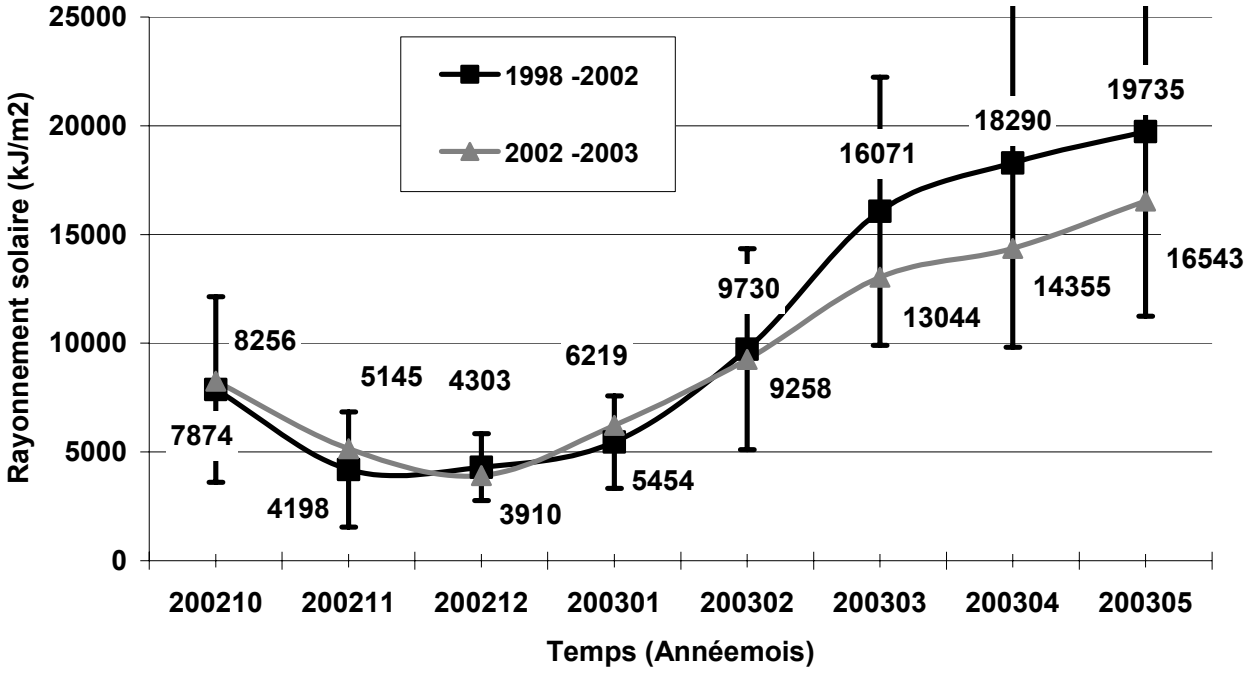


Figure 12: ***Rayonnement solaire mensuel moyen (1998-2003)***
(Adapté de : Environnement Canada, 2003a)

La température de l'air extérieur a été enregistrée sur le site de la pouponnière de novembre 2002 à avril 2003 inclusivement (figure 13). Il apparaît que les températures recueillies sur le site étaient inférieures à celles d'Environnement Canada dans l'ensemble. La différence entre la température sur le site du projet et celle d'Environnement Canada se situait entre 0,3 et 0,9 ^{o}C pour les mois de novembre 2002 à avril 2003. Ainsi, les valeurs observées sur le site d'expérimentation sont en pratique comparables à celles d'Environnement Canada prises à l'Aéroport de Québec.

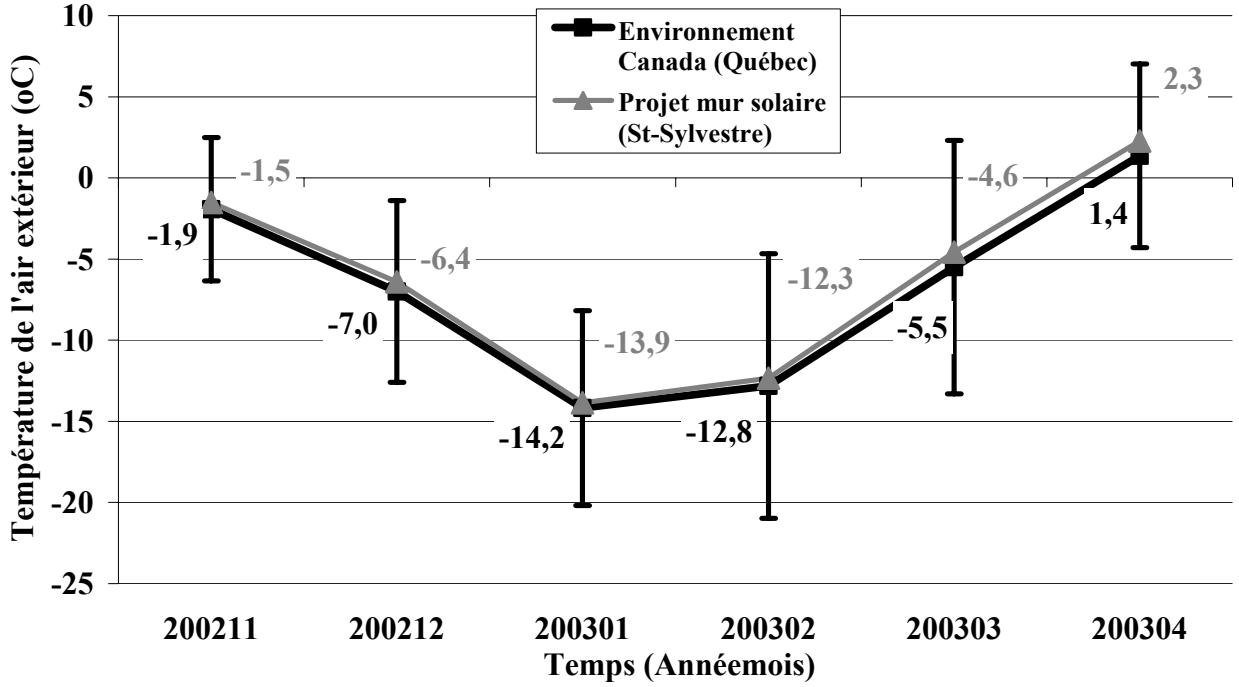


Figure 13: ***Comparaison des données de température de l'air extérieur enregistrées sur le site des essais à St-Sylvestre et celles obtenues par Environnement Canada (Adapté de : Environnement Canada, 2003a).***

6.2 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 de l'air extérieur, température à la sortie du plénum du mur solaire et le rayonnement solaire en fonction de l'heure de la journée. La journée choisie a été le 2 janvier 2003. Les résultats de cette journée sont illustrés à la figure 14. 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 ($T_{Plénum}$) est supérieure de 0,5 ^{o}C en moyenne comparativement à la température extérieure (T_{EXT}) (figure 14). La température de l'air extérieur se situait alors autour de -14 ^{o}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.

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 avait une augmentation rapide 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 en passant de -15 à -10 °C. C'est à 11 h que l'écart de température entre l'air extérieur et la sortie du mur solaire est le plus élevé 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.

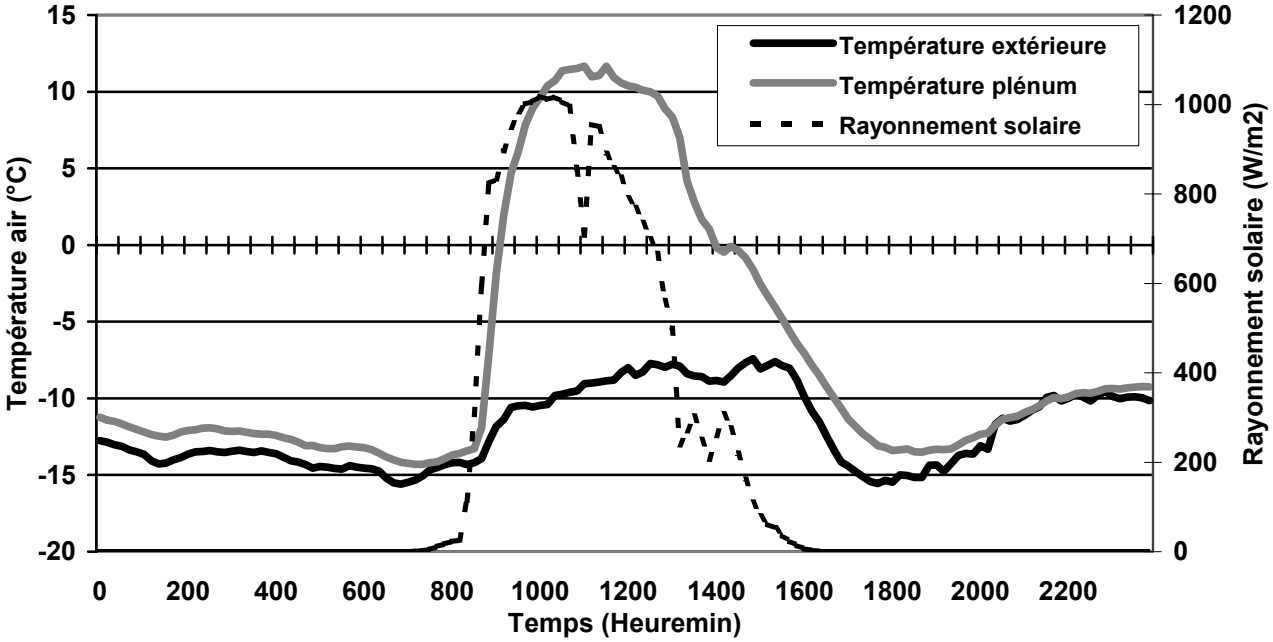


Figure 14: Fonctionnement du mur solaire : température extérieure, température à la sortie du mur solaire et intensité du rayonnement solaire durant une journée typique (2 janvier 2003)

Entre 10 h et 16 h , un décalage entre l'intensité du rayonnement solaire et la température à la sortie du mur solaire est observé. Ainsi, la température à la sortie du mur diminuait peu de temps après que le rayonnement solaire ait diminué. Le décalage est relié à l'approche en régime permanent lors du bilan ainsi qu'à l'inertie du système. En l'absence de rayonnement solaire, par exemple entre 16 h et 20 h 30, la température du plénum est plus grande que la température extérieure. En fait, l'air circulant le long de la paroi est réchauffé par les pertes du mur du bâtiment.

Par ailleurs, pour la durée de la période (8,5 h) pendant laquelle il y a eu 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.

Le tableau 1 montre l'apport d'énergie utile du mur solaire pour la journée du 2 janvier 2003 en fonction de différentes $T^{o}_{déficit}$ (équations 5, 10, 11, 12, 13 et 14). La contribution énergétique du mur solaire est calculée à partir de l'équation 7. Selon les observations effectuées, plus la $T^{o}_{déficit}$ sera élevée, supérieure sera la contribution énergétique du mur solaire.

Le rapport de l'énergie utile (tableau 1) est en fait le lien entre l'apport d'énergie utile selon une $T^{o}_{déficit}$ donnée et l'apport d'énergie maximale considérant une $T^{o}_{déficit}$ illimitée. Par exemple, dans le cas où la $T^{o}_{déficit}$ est de 10 ^{o}C, alors le rapport d'énergie utile s'exprime comme suit :
[(Énergie mur solaire pour $Q_{solaire10C}$ / Énergie pour mur solaire pour $Q_{solaire}$) × 100] = (423 / 432) × 100 = 97,9 %.

Alors, 97,9 % de l'énergie solaire fournie dans ce cas est utilisé pour préchauffer l'air. Donc, plus la $T^{o}_{déficit}$ sera faible, plus le rapport d'énergie utile est faible ainsi que l'économie de chauffage.

Par ailleurs, durant la journée du 2 janvier 2003 (tableau 1), une quantité d'énergie de 516 MJ provenant de la combustion du gaz propane a été requise. Aussi en fonction de la température déficit ($T^{o}_{déficit}$), la contribution énergétique du mur solaire a varié entre 5,7 et 45,6 % (équation 7).

Tableau 1 : Apport d'énergie du mur solaire pour la journée du 2 janvier 2003[1]

	Apport d'énergie totale	Apport d'énergie utile				
T^o déficit	illimitée	10 ^oC	5 ^oC	0 ^oC	-5 ^oC	-10 ^oC
Énergie fournie du mur solaire (MJ)	432	423	350	258	138	31
Rapport de l'énergie utile (%)	-	97,9	81,0	59,7	31,9	7,2
Propane utilisé dans le bâtiment (MJ)	516	516	516	516	516	516
Contribution énergétique (%)	45,6	45,0	40,4	33,3	21,1	5,7

[1]Température moyenne de l'air extérieur de la journée : -11,9 ^oC (min : -15,6 ^oC, max : -7,4 ^oC).

6.3 Apport de chaleur global du mur solaire

6.3.1 Apport de chaleur quotidien du mur solaire

Les résultats de l'apport de chaleur quotidien du mur solaire pour les mois de novembre 2002 à avril 2003 sont illustrés aux figures 15 à 20 et ils sont également présentés à l'annexe 9. Pour chaque mois, la portion inférieure du graphique, montre quotidiennement l'apport de chaleur du mur solaire pour les températures déficit (de $T^o_{déficit}$ illimitée à $T^o_{déficit}$ 10°C). La section supérieure du graphique montre l'écart de température entre l'air extérieur et celle à la sortie du plénum du mur solaire.

Comme illustré sur les figures 15 à 20, l'apport d'énergie utile journalier varie selon la $T^o_{déficit}$. Ainsi, l'apport de chaleur pour la $T^o_{déficit}$ illimitée représente la quantité d'énergie fournie la plus élevée puisqu'il n'y a pas de $T^o_{déficit}$ lui étant assignée. En général, l'impact du mur solaire sur l'apport d'énergie utile diminue progressivement avec la diminution de la $T^o_{déficit}$. Par exemple, l'apport de chaleur pour une $T^o_{déficit}$ 5 ^oC a généralement un apport d'énergie utile inférieur à celui de $T^o_{déficit}$ 10 ^oC. Par ailleurs, la température de l'air extérieur était supérieure à la température de l'air du plénum.

Durant le mois de novembre 2002 (figure 15), l'énergie utile moyenne pour les $T^o_{déficit}$ illimitée à $T^o_{déficit}$ -10°C a diminué progressivement avec la diminution de la $T^o_{déficit,}$ passant de 124 à 1 MJ/j. L'énergie utile journalière pour les $T^o_{déficit}$ -5 ^oC et $T^o_{déficit}$ -10°C était faible ou nulle car la température

moyenne de l'air extérieur était relativement chaude durant le mois de novembre, soit -1,5 ± 6,5°C. Durant le mois de novembre, l'inventaire moyen en pouponnière était de 966 porcelets ayant un poids moyen de 11 kg et le débit d'air moyen mensuel était de 0,55 ± 0,32 m^3/s (annexe 9).

Durant le mois de décembre 2002 (figure 16), l'énergie utile moyenne pour les $T^o_{déficit}$ illimitée à $T^o_{déficit}$ -10°C a diminué progressivement avec la diminution de la $T^o_{déficit}$ passant de 128 à 4 MJ/j. La température moyenne de l'air extérieur du mois était de -6,4 ± 5,9°C. Les apports de chaleur du 17, 18, 27 et 30 décembre étaient les plus élevés du mois et les températures moyennes de l'air extérieur étaient alors les plus froides avec -12,5, -10,2, -10,6 et -13,7 °C respectivement. L'inventaire moyen était de 833 porcelets avec un poids moyen de 18 kg et le débit d'air moyen mensuel était de 0,56 ± 0,24 m^3/s.

Durant le mois de janvier 2003 (figure 17), l'énergie utile moyenne pour les $T^o_{déficit}$ illimitée à $T^o_{déficit}$ -10°C a diminué progressivement avec la diminution de la $T^o_{déficit}$ passant de 169 à 6 MJ/j. La température moyenne de l'air extérieur était de -13,8 ± 6,4 °C. Les apports de chaleur du 2, 17, 18 et 30 janvier étaient les plus élevés du mois et les températures moyennes de l'air extérieur étaient les plus froides parmi les jours ensoleillés, -12,0, -18,6, -18,8 et -11,9 °C respectivement. L'inventaire moyen en pouponnière était de 902 porcelets avec un poids moyen de 12 kg et le débit d'air moyen était de 0,27 ± 0,20 m^3/s. Au début de janvier, le poids moyen des porcelets était faible (9 kg).

Durant le mois de février 2003 (figure 18), l'énergie utile moyenne pour les $T^o_{déficit}$ illimitée à $T^o_{déficit}$ -10 °C a diminué progressivement avec la diminution de la $T^o_{déficit}$ passant de 248 à 72 MJ/j. La température moyenne mensuelle de l'air extérieur était de -12,3 ± 8,7 °C. Les apports de chaleur du 3, 11, 24 et 26 février étaient les plus élevés du mois et les températures moyennes de l'air extérieur étaient froides, -5,5, -19,2, -14,4 et -20,2 °C respectivement. Les apports de chaleur du 13 au 17 février étaient supérieurs à la moyenne mensuelle alors que la température moyenne de l'air extérieur était de -24,1 °C. L'inventaire moyen en pouponnière était de 728 porcelets avec un poids moyen de 18 kg et le débit d'air moyen était de 0,49 ± 0,21 m^3/s.

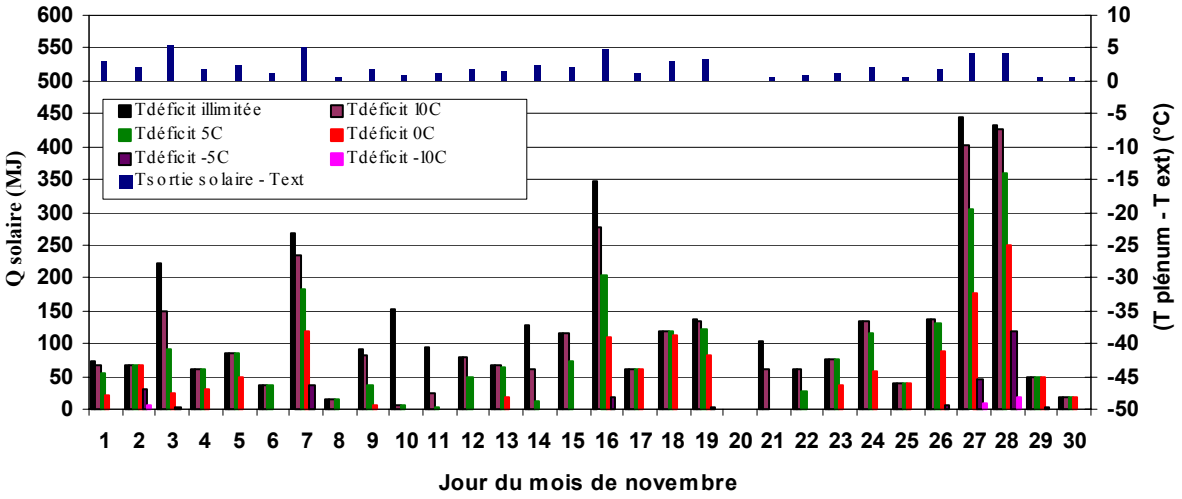


Figure 15: Apport de chaleur journalier du mur solaire durant le mois de novembre 2002 pour les différentes températures déficit et l'écart de température entre le plénum et l'air extérieur

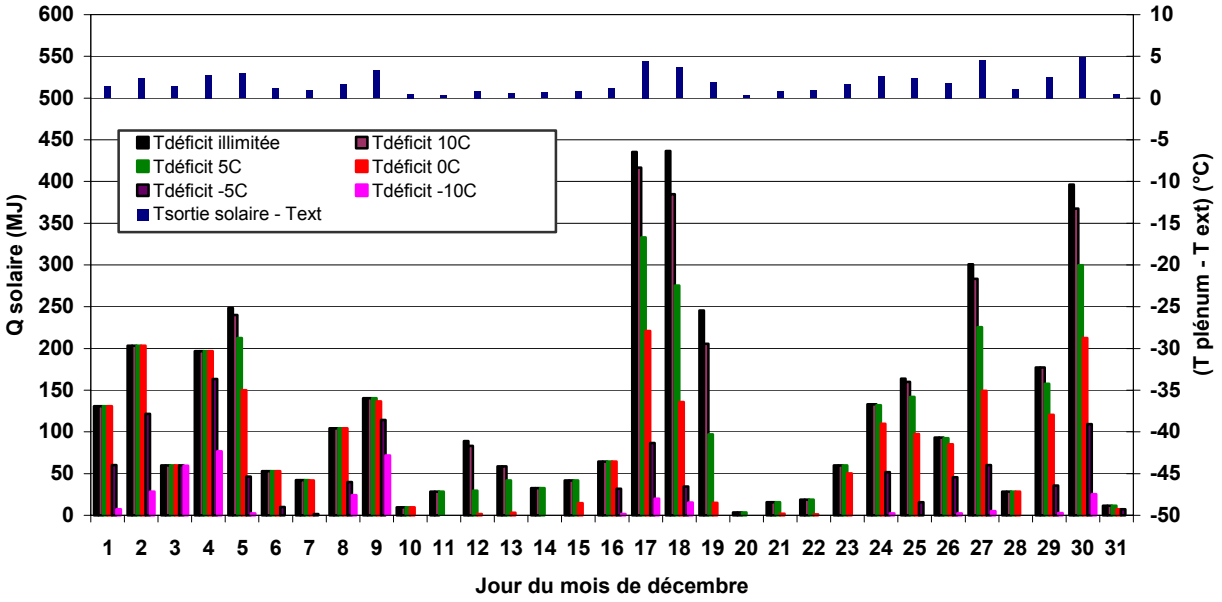


Figure 16: Apport de chaleur journalier du mur solaire durant le mois de décembre 2002 pour les différentes températures déficit et l'écart de température entre le plénum et l'air extérieur

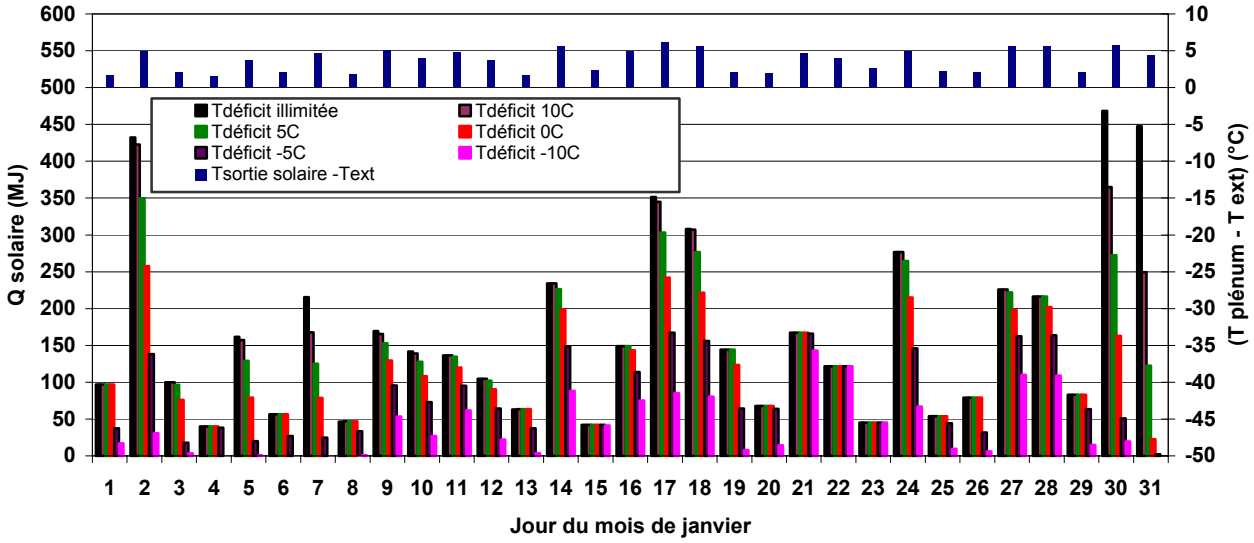


Figure 17: ***Apport de chaleur journalier du mur solaire durant le mois de janvier 2003 pour les différentes températures déficit et l'écart de température entre le plénum et l'air extérieur***

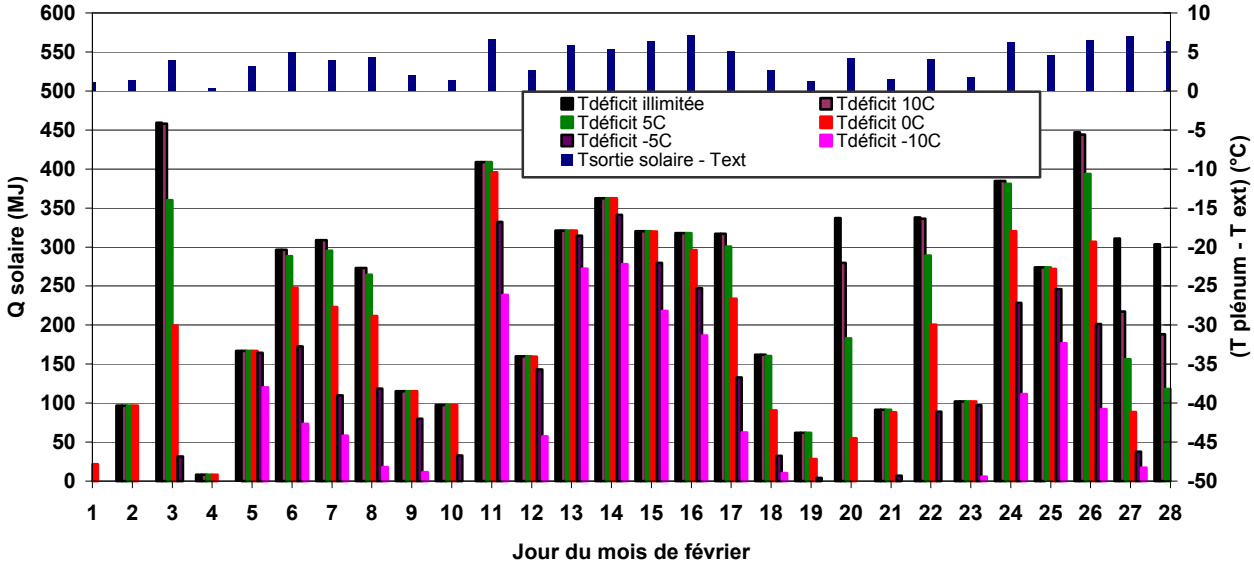


Figure 18: ***Apport de chaleur journalier du mur solaire durant le mois de février 2003 pour les différentes températures déficit et l'écart de température entre le plénum et l'air extérieur***

Durant le mois de mars 2003 (figure 19), l'énergie utile moyenne pour les $T^{o}_{déficit}$ illimitée à $T^{o}_{déficit}$ -10°C a diminué progressivement avec la diminution de la $T^{o}_{déficit,}$ passant de 159 à 17 MJ/j. L'énergie utile de mars était inférieure à celle de février. La température moyenne de l'air extérieur était de -4,6 ± 9,1 °C. Les apports de chaleur du 6, 14 et 19 mars étaient les plus élevés du mois et les températures moyennes de l'air extérieur étaient froides lors des journées les plus ensoleillés (10 h). L'inventaire moyen était de 818 porcelets avec un poids moyen de 11 kg et le débit d'air moyen était de 0,51 ± 0,40 m^3/s. Au début de mars, le poids moyen des porcelets était faible (9 kg) mais il serait influencé par l'augmentation de la température moyenne de l'air extérieur (6,7 °C).

Durant le mois d'avril 2003 (figure 20), l'apport de chaleur pour $T^{o}_{déficit}$ illimitée était très élevé pour plusieurs jours. On peut constater que plusieurs jours étaient très ensoleillés (12 h). L'énergie utile moyenne pour les $T^{o}_{déficit}$ illimitée à $T^{o}_{déficit}$ -10°C a diminué progressivement avec la diminution de la $T^{o}_{déficit,}$ passant de 287 à 1 MJ/j. La température moyenne de l'air extérieur était de 2,3 ± 7,4 °C. Il est marquant que la moyenne de l'énergie utile et la température moyenne de l'air extérieur en avril étaient inférieures à celle de mars. L'inventaire moyen de la pouponnière était de 911 porcelets avec un poids moyen de 18 kg et le débit d'air moyen était de 0,67 ± 0,31 m^3/s. En comparant avec les mois précédents, la diminution de l'apport de chaleur journalier s'explique par l'augmentation de la température moyenne de l'air extérieur en avril.

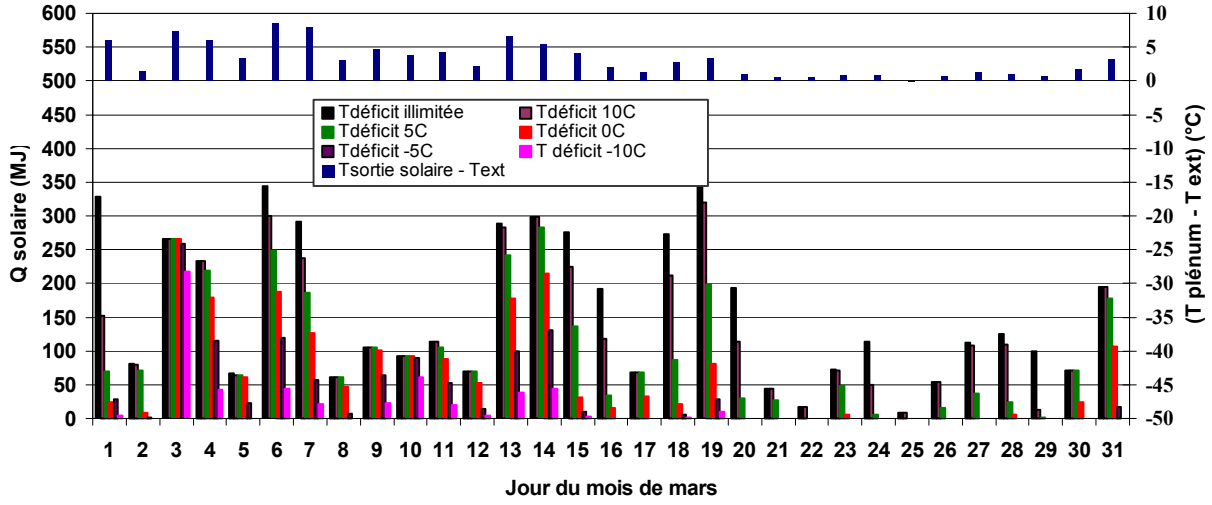


Figure 19: ***Apport de chaleur journalier du mur solaire durant le mois de mars 2003 pour les différentes températures déficit et l'écart de température entre le plénum et l'air extérieur***

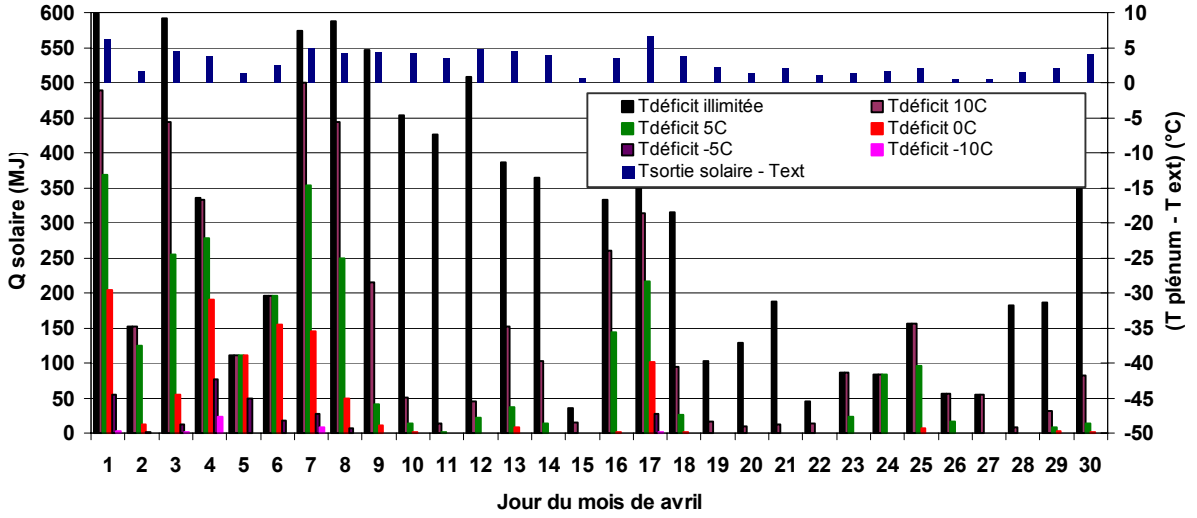


Figure 20: ***Apport de chaleur journalier du mur solaire durant le mois d'avril 2003 pour les différentes températures déficit et l'écart de température entre le plénum et l'air extérieur***

Selon les observations et les résultats obtenus:

- En général, l'apport de chaleur journalier était plus élevé pour la $T^{o}_{déficit}$ illimitée que ceux pour la $T^{o}_{déficit}$ 10°C à la $T^{o}_{déficit}$ -10 °C. Ceci s'explique par la contrainte de la $T^{o}_{déficit}$ pour calculer l'énergie utile (section 5.2).
- Les apports de chaleur moyens utiles étaient optimums pour les mois de janvier et de février.
- Les apports de chaleur journaliers les plus élevés correspondaient souvent aux journées pendant lesquelles les températures moyennes de l'air extérieur étaient les plus froides.
- Le poids moyen journalier des porcelets n'influençait pas l'apport de chaleur car le poids moyen dans le bâtiment était relativement stable.
- Le débit d'air moyen journalier était influencé par la température moyenne de l'air extérieur.
- L'apport de chaleur journalier est plus élevé lorsque la différence de température de l'air extérieur et celle de l'air à la sortie du plénum du mur solaire est plus grande.

6.3.2 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 $T^{o}_{déficit}$. Ainsi, l'apport d'énergie totale, représente la quantité d'énergie apportée la plus élevée puisqu'il n'y a pas de $T^{o}_{déficit}$ lui étant assignée. L'impact du mur solaire sur l'apport d'énergie utile diminue progressivement avec la diminution de la $T^{o}_{déficit}$. Par exemple, pour une $T^{o}_{déficit}$ de 5°C, l'apport d'énergie utile est inférieur par rapport à une $T^{o}_{déficit}$ 10°C.

Ainsi, l'apport d'énergie totale du mur solaire le plus faible est en novembre (2650 MJ) et il augmentera durant les mois suivants pour atteindre un maximum en avril (8602 MJ) (tableau 2). Ceci s'explique par le nombre d'heures d'ensoleillement plus faible en novembre (2,4 h/j) et plus élevé en avril (5,8 h/j) (Environnement Canada, 2003). Le tableau 2 suggère par ailleurs que l'apport de chaleur solaire est directement relié à la durée d'ensoleillement. Plus l'ensoleillement sera long, plus l'apport de chaleur sera élevé.

Le tableau 2 montre que l'énergie utile du mur solaire diminue au fur et à mesure que la $T^{o}_{déficit}$ diminue ($T^{o}_{déficit}$ illimitée à $T^{o}_{déficit}$ -10°C). En outre, la contribution énergétique du mur solaire diminue de la même façon. L'énergie utile est supérieure pour une $T^{o}_{déficit}$ élevée parce qu'il y a moins de probabilité que la température à la sortie du plénum du mur solaire soit supérieure à la $T^{o}_{déficit}$. Ainsi, la contribution énergétique du mur solaire (équation 6) pour l'apport d'énergie totale, varie de 18,5 à 47,4 % de novembre à avril pour $T^{o}_{déficit}$ illimitée.

Tableau 2 : Apport de chaleur (Q solaire) fourni par le mur solaire de novembre 2002 à avril 2003

Année - mois	02-nov	02-déc	03-janv	03-févr	03-mars	03-avr
Inventaire moyen (porcelets)	966	838	902	728	818	911
Poids moyen (kg/porcelet)	11	18	12	18	11	16
Ensoleillement moyen[1](h/j)	2,4	2,1	4,3	5,1	4,5	5,8
Temp. extérieure moyenne (^oC)	-1,5	-6,4	-13,9	-12,3	-4,6	-2,3
Temp. plénum moyenne (^oC)	-0,8	-4,8	-10,1	-8,4	-1,4	5,3
Énergie propane[2] (MJ)	11 695	9 545	15 221	8 341	15 565	9 545
$T^o_{déficit}$ illimitée						
Q solaire (MJ)	2 650	3 894	5 247	6 940	4 916	8 602
Contribution mur solaire (%)	18,5	29,0	25,6	45,4	24,0	47,4
$T^o_{déficit}$ 10 ^oC						
Q solaire (MJ)	2 133	3 719	4 870	6 669	4 154	4 541
Contribution mur solaire (%)	15,4	28,0	24,2	44,4	21,1	32,2
$T^o_{déficit}$ 5 ^oC						
Q solaire (MJ)	1 623	3 153	4 380	6 167	3 153	2 694
Contribution mur solaire (%)	12,2	24,8	22,3	42,5	16,8	22,0
$T^o_{déficit}$ 0 ^oC						
Q solaire (MJ)	798	2 275	3 634	5 068	1 950	1 060
Contribution mur solaire (%)	6,4	19,2	19,3	37,8	11,1	10,0
$T^o_{déficit}$ -5 ^oC						
Q solaire (MJ)	103	1 036	2 456	3 461	1 118	274
Contribution mur solaire (%)	0,9	9,8	13,9	29,3	6,7	2,8
$T^o_{déficit}$ -10 ^oC						
Q solaire (MJ)	6	337	1 257	2 013	536	37
Contribution mur solaire (%)	0,1	3,4	7,6	19,4	3,3	0,4

[1]Adapté de : Environnement Canada, 2003a

[2] Énergie propane (MJ) = 0,2777778 $E_{propane}$ (kW.h)

6.4 Réduction des émissions de gaz à effet de serre avec le système du mur solaire

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est montrée au tableau 3 pour une $T^{o}_{déficit}$ illimitée et une $T^{o}_{déficit}$ 5°C. La réduction des émissions de gaz équivalant à une quantité de dioxyde de carbone (CO_2) variait mensuellement entre 106 et 562 kg de novembre à avril. Pour toute la durée de l'expérimentation, la réduction des émissions de CO_2 a été de 1382 kg pour la $T^{o}_{déficit}$ 5°C, soit une réduction de 23,3 %. Dans le cas d'une $T^{o}_{déficit}$ illimitée, la réduction de CO_2 a été de 2 105 kg, soit une réduction de 31,6 %. Les méthodes de calculs sont présentées à l'annexe 10.

Lors de la combustion du propane, les gaz issus de cette combustion sont en très grande majorité le dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau (H_2O) (équation 8). Toutefois, dans une faible proportion, il y a aussi une émission de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O). Les réductions des émissions de gaz à effet de serre sous la forme de CH_4 et sous la forme de N_2O étaient beaucoup moins importantes que sous la forme de CO_2 (tableau 4). Étant donné la faible émission de N_2O et de CH_4 lors de la combustion du propane, leurs émissions ont été considérées négligeables.

Tableau 3 : Réduction des émissions de CO_2 avec le système du mur solaire pour $T^o_{déficit}$ illimitée et $T^o_{déficit}$ 5°C

Année - mois	02-nov		02-déc		03-janv		03-févr		03-mars		03-avr		Total nov - avril	
Apport d'énergie du mur solaire	T^odéficit													
	illimitée	5 oC	illimitée	5 oC	illimitée	5 oC	illimitée	5 oC	illimitée	5 oC	illimitée	5 oC	illimitée	5 oC
Équivalent CO_2 économisé avec le mur solaire (kg)	173	106	254	206	343	286	453	403	321	206	562	176	2 105	1 382
Équivalent CO_2 produit par le chauffage (kg)	764	764	623	623	994	994	545	545	1 016	1 016	623	623	4 564	4 564
Réduction des émissions CO_2 avec le 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

Tableau 4 : Réduction des émissions de gaz à effet de serre par le mur solaire pour $T^o_{déficit}$ 5°C

Année - mois	02-nov	02-déc	03-janv	03-févr	03-mars	03-avr	Total nov - avril
Apport d'énergie utile (MJ)	1 623	3 153	4 380	6 167	3 153	2 694	21 171
Équivalent CO_2 (kg)	106	206	286	403	206	176	1382
Équivalent N_2O (kg)	0,008	0,015	0,021	0,029	0,015	0,013	0,099
Équivalent CH_4 (kg)	0,002	0,003	0,005	0,006	0,003	0,003	0,022

7.0 IMPACT ÉCONOMIQUE D'UN MUR SOLAIRE INSTALLÉ DANS UNE POUPONNIERE

La section supérieure du tableau 5 présente la quantité mensuelle de propane et la quantité totale utilisée durant l'expérimentation (en kW.h et en litres) ainsi que le prix mensuel moyen réel du gaz propane payé par la Ferme Marisol.

Tableau 5 : Quantité de propane utilisée en kW.h et son coût mensuel pour la pouponnière ainsi que l'énergie économisée par le mur solaire pour $T^{o}_{déficit}$ illimitée et de $T^{o}_{déficit}$ 5°C.

Année - mois	02-nov		02-déc		03-janv		03-févr		03-mars		03-avr		Total nov - avril	
Énergie propane (kW.h)	3 249		2 652		4 229		2 317		4 324		2 652		19 423	
Quantité gaz propane(l)	509		415		662		363		677		415		3 043	
Coût ($)	158		138		236		167		367		147		1 214	
Prix ($/l)	0,31		0,33		0,36		0,46		0,54		0,36		0,39	
Apport d'énergie du mur solaire	T^{o}déficit													
	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C
Apport énergie (kW.h)	736	451	1 082	876	1 458	1 217	1 928	1 713	1 366	876	2 390	748	8 960	5 881
Équivalent en gaz propane (l)	115	71	169	137	228	191	302	268	199	137	374	117	1 387	921
Économie de gaz propane[1]($)	45	28	66	53	89	74	118	105	77	54	146	46	541	359

[1] L'économie de gaz propane est basée sur le prix moyen (novembre 2002 à avril 2003) soit 0,39 $/l payé par la Ferme Marisol.

La section inférieure du tableau 5 présente la quantité d'énergie économisée avec l'apport du mur solaire dans le cas d'une $T^{o}_{déficit}$ illimitée et de $T^{o}_{déficit}$ 5°C. Le calcul de l'économie de gaz propane est basée sur le prix moyen payé de novembre 2002 à avril 2003, soit 0,39 $/l.

Le tableau 6 montre les économies de propane mensuelles obtenues dans le cas particulier d'une $T^{o}_{déficit}$ illimitée et d'une $T^{o}_{déficit}$ 5°C pour différents prix de propane. Ce tableau a été constitué dans le but d'estimer les économies potentielles qui seraient obtenues selon les différents coûts de propane. Pour les autres mois de l'année (mai à octobre) aucune donnée est disponible, parce qu'il n'y a pas eu d'information recueillie. Néanmoins, il pourrait y avoir une économie d'énergie avec le mur solaire pour les mois de mai à octobre, quoique celle-ci sera inférieure à celle des mois de la période froide.

Ainsi, l'économie d'énergie obtenue avec le mur solaire selon le prix moyen de propane (0,39 $/l) est de 541 $ pour $T^{o}_{déficit}$ illimitée et de 359 $ pour $T^{o}_{déficit}$ 5°C pour la ferme étudiée. En fonction des prix moyens de propane, 0,30 à 0,50 $/l, et des conditions du déficit thermique, $T^{o}_{déficit}$ illimitée et $T^{o}_{déficit}$ 5°C, les économies d'énergie qu'apporte le mur solaire, varient de 276 $ à 694 $ sur une période de 6 mois.

Tableau 6 : Économies de propane obtenues avec le mur solaire pour $T^{o}_{déficit}$ illimitée et de $T^{o}_{déficit}$ 5°C

Année - mois	02-nov		02-déc		03-janv		03-févr		03-mars		03-avr		Total nov - avril	
Apport d'énergie du mur solaire	T^{o}déficit													
	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C
Apport d'énergie (kW.h)	736	451	1 082	876	1 458	1 217	1 928	1 713	1 366	876	2 390	748	8 960	5 881
Équivalent en gaz propane (l)	115	71	169	137	228	191	302	268	199	137	374	117	1 387	921
Prix moyen du propane	Économie de gaz propane selon son prix moyen($)													
0,30 $/l	35	21	51	41	68	57	91	81	60	41	112	35	416	276
0,35 $/l	40	25	59	48	80	67	106	94	69	48	131	41	485	322
0,39 $/l (ferme étudiée)	45	28	66	53	89	74	118	105	77	54	146	46	541	359
0,45 $/l	52	32	76	62	103	86	136	121	89	62	168	53	624	414
0,50 $/l	58	35	85	69	114	95	151	134	99	69	187	59	694	461

7.1 Étude économique d'un mur solaire (budget partiel)

Afin de déterminer un budget partiel pour l'ajout d'un mur solaire, une construction d'une pouponnière de 1 000 places est considérée. Le coût de construction de cette pouponnière est estimé à 230 $/place ou 230 000 $ pour le bâtiment (Nadeau et Levallois, 2003). Du coût total, 230 $/place, le coût de la portion du bâtiment (mur solaire, structure de la bâtisse, mur, fondation, fosse, etc.) est estimé à 115 $/place. Pour le coût des équipements (trémies, parcs, ventilation, etc.), le coût est également estimé à 115 $/place.

Par la suite, il faut déterminer les paramètres qui seront utilisés pour évaluer le coût d'achat du mur solaire, soit déterminer la période d'amortissement (durée de l'emprunt) et fixer le taux d'intérêt.

Comme l'ajout d'un mur solaire fait partie inhérente de la structure du bâtiment, le coût d'achat sera ajouté à la portion de financement du bâtiment. Généralement, cette partie du financement est amortie sur une période de quinze ans. Le taux d'intérêt moyen utilisé pour la durée de l'emprunt de quinze ans sera de 7 %.

Dans cette étude, deux scénarios sont présentés pour déterminer le seuil de rentabilité à l'achat du mur solaire. Le seuil de rentabilité signifie que les frais de financement annuel (capital + intérêt) sont égaux aux économies d'énergie annuelle obtenues avec le mur solaire. Premièrement, le besoin en financement est calculé dans le cas où il n'y aurait aucun mur solaire installé. 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 selon $T^{o}_{déficit}$ 5°C et $T^{o}_{déficit}$ illimitée. Ce calcul pourrait être fait selon les différents prix de propane utilisé dans cette étude.

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 7).

Dans le deuxième scénario, soit dans le cas de la pouponnière étudiée, les frais de financement annuels supplémentaires occasionnés par l'achat du mur solaire au seuil de la rentabilité ne devraient pas excéder 359 $. Ce montant représente l'économie de propane annuelle lorsque le prix du propane moyen est de 0,39 $/l. Ainsi, l'économie de propane de 359 $ ($T^{o}_{déficit}$ 5°C) correspond à un financement pour l'achat d'un mur solaire au coût de 3 325 $. Cet achat est amorti sur quinze ans à un taux d'intérêt constant de 7 %. Ceci représente des versements mensuels de 29,89 $. Pour ce même scénario, suivant l'achat du mur solaire, les frais de financement mensuels, pour une pouponnière neuve munie d'un mur solaire, passeraient alors à 2 398,79 $/mois (2 368,90 $ + 29,89 $) (tableau 7). De plus, pour ce même scénario, si la $T^{o}_{déficit}$ est considérée comme illimitée, l'économie de propane de 541 $ permet un financement pour l'achat d'un mur solaire au coût de 5 013 $, aux mêmes conditions de financement citées ci-haut.

Tableau 7 : Budget partiel pour le calcul du seuil de rentabilité d'une pouponnière neuve de 1000 places avec ou sans mur solaire

	Pouponnière ***sans*** mur solaire	Pouponnière ***avec*** mur solaire prix propane 0,39$/l économie d'énergie annuelle de 359 $	Pouponnière ***avec*** mur solaire prix propane à 0,39 $/l économie d'énergie annuelle de 541 $	Différence entre les coûts **avec** ou **sans** mur solaire **(b-a)**	Différence entre les coûts **avec** ou **sans** mur solaire **(c-a)**
Données	**$**	**$**	**$**	**$**	**$**
Coût du bâtiment	**115 000 (a)**	**118 325 (b)**	**120 013 (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 du 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**

7.2 Évaluation économique d'un mur solaire selon différents prix de gaz propane

Un résumé du seuil de rentabilité approximatif du mur solaire et les économies de chauffage à l'achat d'un mur solaire pour différents prix du gaz propane incluant celui de la ferme étudiées (0,39 $/l) sont présentés au tableau 8. 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 8 : Économies de chauffage et seuil de rentabilité à l'achat d'un mur solaire pour $T^{o}_{déficit}$ illimitée et $T^{o}_{déficit}$ 5°C.

Apport d'énergie du mur solaire	T^{o}déficit			
	illimitée	5 °C	illimitée	5 °C
Prix moyen du gaz propane	Économie qu'apporte le mur solaire selon différents prix de propane pour les mois de novembre 2002 à avril 2003 ($).		Coût d'investissement supplémentaire lié à l'achat du mur solaire pour atteindre le seuil de rentabilité avec un financement sur quinze ans à un taux d'intérêt de 7 % ($).	
0,30 $/l	416	276	3 855	2 550
0,35 $/l	485	322	4 500	2 975
0,39 $/l	541	359	5 013	3 325
0,45 $/l	624	414	5 785	3 825
0,50 $/l	694	461	6 429	4 250

7.3 Commentaires sur l'impact économique d'un mur solaire installé dans 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 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. Évidemment, 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 associées à cette technologie. Toute subvention disponible devrait être considérée afin de réduire le coût de financement du mur solaire.

8.0 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 1 000 places située à Saint-Sylvestre de Beaurivage et un prix de propane moyen de 0,39 $/l, en supposant des températures de déficit thermique illimitée et de 5°C au niveau du corridor de préchauffage et pour une durée d'expérimentation de 6 mois, les résultats sont les suivants :

- le bilan de chaleur déterminé par l'apport énergétique du mur solaire selon des températures de déficit thermique illimitée et de 5°C, varie entre 1 623 et 8 602 MJ mensuellement;
- la contribution énergétique du mur solaire varie entre 12,2 et 47,4 % mensuellement;
- l'économie de propane se situe entre 359$ à 541$, soit une réduction de 23 à 31 % du coût de chauffage, représentant une économie de 0,12 à 0,18 $ par porcelet produit pour les trois lots d'élevage (3 000 porcelets);
- le coût des investissements supplémentaires pour atteindre le seuil de rentabilité, en considérant un amortissement de 15 ans à un taux d'intérêt de 7%, varie entre 3 325 $ et 5 013 $;
- une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), en équivalent de CO_2 produit par le chauffage au propane, soit de 1 382 à 2 105 kg de CO_2 pour la période d'expérimentation.

Finalement, dans le cadre de travaux futurs, il serait intéressant d'évaluer la possibilité d'installer des murs solaires dans divers concepts de bâtiments (exemple: entrée d'air centrale avec prise d'air dans l'entretoit sans corridor de préchauffage). De plus, il serait opportun de comparer les émissions de CO_2 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.

9.0 RECOMMANDATIONS PRATIQUES

Avant tout, un bâtiment muni d'un 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 par rapport au nombre et au type d'animaux afin d'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 à la 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.

Enfin, les diverses recommandations issues du présent projet sont :

- 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 gaz propane;
- Bien ajuster le débit minimum de la ventilation ainsi que les paramètres liés au chauffage d'appoint;
- Pour des raisons sanitaires et pour 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 solaire, type d'utilisation, durée d'opération, type d'élevage, besoin en chauffage, débit de ventilation, récupération de l'énergie solaire, etc.).

10.0 RÉFÉRENCES

Albright, L.D. 1990. Environment Control for Animals and Plants. ASAE, Niles Road, St-Joseph, MI 49085-9659 USA.

ASAE. 1997. ASAE Standards. ASAE, Niles Road, St-Joseph, MI 49085-9659 USA.

Conseil canadien du porc. 2002. Atelier de la stratégie de l'industrie porcine face aux changements climatiques. Document de référence, 9 déc. Programme d'atténuation des gaz à effet de serre en agriculture. 23 pp.

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 pp.

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

Environnement Canada (a). 2003a. Région de Québec. Services climatologiques. Extractions de données climatiques sur fichier électronique (ASCI11) de 1998 à 2003.

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

Excel. 2002. Microsoft© Excel 2002. Microsoft Corporate. Troy, NY, USA.

Ma, J.X., Schulte, D.D. et Jianxue, M. 1986. Performance of a porous concrete solar storage wall. ASAE, 86-4011, 14 pp.

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

Muehling, A.J., Hall, M.D., Phillips, R.E., Reeder, R.C. et Spillman, C.K. 1990. Solar Heating for Swine Buildings. Pork industry handbook - housing. Purdue University Cooperative Extension service. West Lafayette, Indiana. PIH-90. 7 pp.

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. p. 49-52.

Pouliot, F. 2003. Communication personnelle.

Reeder, R.C. 1983. Solar system with rock storage for swine buildings. ASAE, 83-4077, 8 pp.

Savaria, R. 2003. Communication personnelle.

Solarwall. 2003. Solarwall ©. Pages consultées le 19 septembre 2003.
Adresse ULR : http://www.solarwall.com/sw/solarwall.html

Siebenmorgen, T.J., Dale A.C. et Jones, H.W. 1986. Evaluation of a trombe wall solar system augmented with planar reflectors. ASAE 0001-2351/86/2905-1332.

ANNEXE 1 : FORMULES POUR CALCULER LES FACTEURS COMPOSANT L'APPORT DE CHALEUR D'UN MUR SOLAIRE

1. Pression de vapeur partielle à saturation , Pvs [Pa]

Pour une T variant de -100 à 0 °C, (Albright, 1990)

Pvs = EXP((-5,6745359×10^3/T)+6,3925247×10^0+((-9,677843×10^-3)×T)
+((0,622157×10^-6)×T^2) +((2,0747825×10^-9)×T^3)+((-0,9484024×10^-12)
×T^4)+((4,1635019×10^0)×LN(T))) (1)

où : Pvs est la pression de vapeur partielle à saturation en Pa et T est la température en °C.

Pour une T variant de 0 à 100 C, (Albright, 1990)

Pvs = EXP(((-5,8002206×10^3)/T)+1,3914993×10^0+((-48,640239×10^-3)×T)
+((41,764768×10^-6)×T^2) +((-14,452093×10^-9)×T^3)+((0)×T ^4)
+((6,5459673×10^0)×LN(T))) (2)

où : Pvs est la pression de vapeur partielle à saturation en Pa et T est la température en °C.

2. Pression partielle de vapeur, Pv [kPa]

Pv = (HR/100) × Pvs / 1000 (3)

où: Pv est la pression partielle de vapeur en kPa, HR est l'humidité relative et Pvs est la pression de vapeur partielle à saturation en Pa, (Albright, 1990).

3. Rapport d'humidité, H [kg eau / kg air sec]

H = (0,6219×Pv) / (101,325-Pv) (4)

où: H est le rapport d'humidité en kg eau / kg air sec et Pv est la pression partielle de vapeur en kPa.

Pour T variant de 255,38 K à 533,16 K, (ASAE, 1997).

4. Volume spécifique de l'air, v [m³/kg air sec]

v =287 × T / ((101,325-Pv) × 1000) (5)

où : v est le volume spécifique de l'air en m³/kg air sec et T est la température en K

Valide pour des T variant de 255,38 K à 533,16 K, (ASAE, 1997).

5. Enthalpie, h [kJ / kg air sec]

$$h = 1{,}006(T-273{,}15) + H(2501 + 1{,}805(T-273{,}15)) \quad (6)$$

où : h est l'enthalpie en KJ / kg air sec, T est la température en K et H est le rapport d'humidité en kg eau / kg air sec, (Albright, 1990).

6. Chaleur massique, Cp [kJ/kg air sec °C]

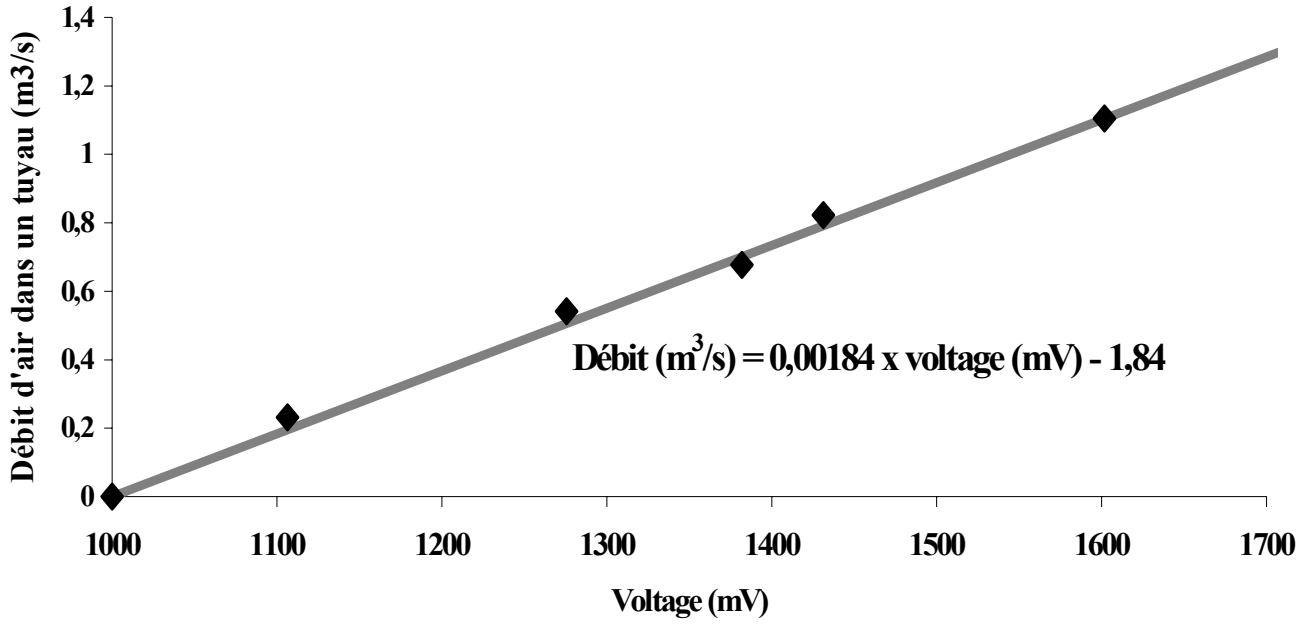
$$C_p = 1 + 1{,}88\ H \quad (7)$$

où : Cp est la chaleur massique en kJ/kg air sec °C et H est le rapport d'humidité en kg eau / kg air sec, (Marquis, A. et Désilets, D., 2000).

7. Température de Celsius en Kelvin

$$T\ (°C) = T\ (K) - 273{,}16 \quad (8)$$

ANNEXE 2 : RÉSULTATS DES MESURES DE LA VITESSE DE L'AIR DANS UN TUYAU A LA SORTIE DU PLÉNUM DU MUR SOLAIRE

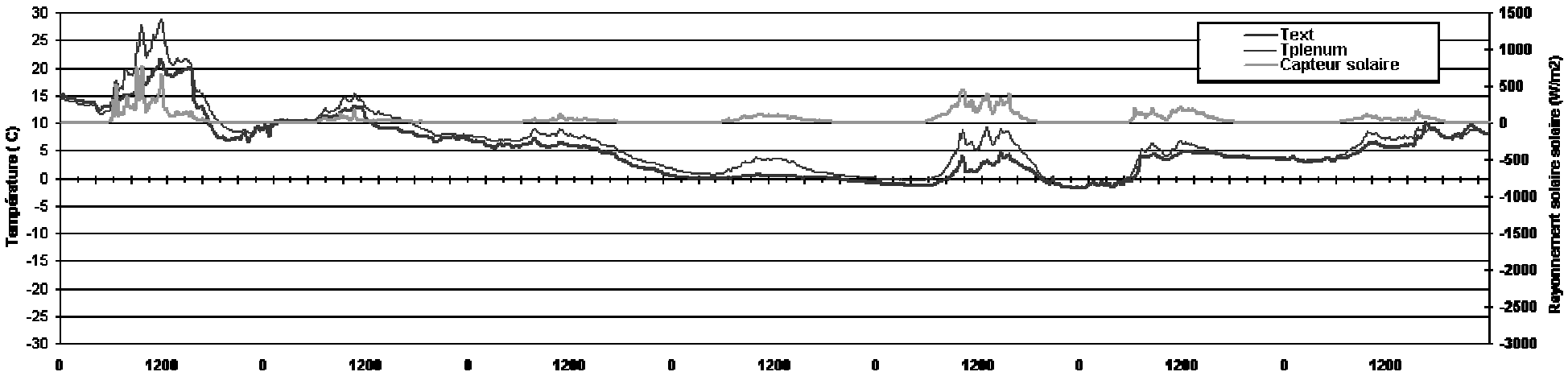


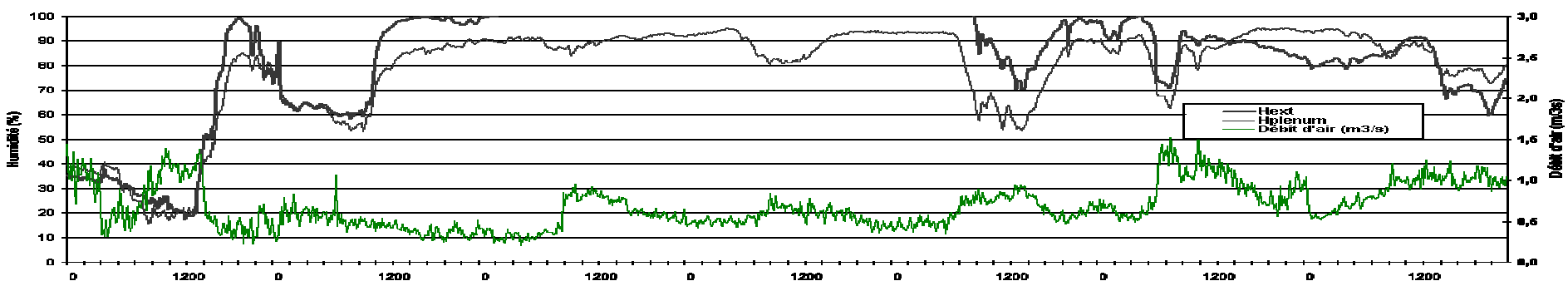
ANNEXE 3 : EXEMPLE DE REGISTRE DES VISITEURS

FERME MARISOL SITE POUPONNIÈRE – ST-SYLVESTRE

			VISITE D'UNE AUTRE FERME		
Date	**Nom du visiteur et Entreprise**	**Motif de la visite**	**Entreprise**	**Date**	**Signature**

ANNEXE 4 : TEMPÉRATURE DE L'AIR EXTÉRIEUR AVEC LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET L'HUMIDITE RELATIVE AVEC LE DÉBIT D'AIR POUR LA SEMAINE DU 21 AU 27 AVRIL 2003 (À TITRE D'EXEMPLE)





ANNEXE 5 : EXEMPLE DE FICHE DE RÉGIE D'ELEVAGE – TEMPÉRATURE JOURNALIÈRE MINIMUM ET MAXIMUM

GROUPE D'EXPERTISE PORCINE INC
264, du Repos, Saint-Gervais, Qc G0R 3C0
Téléphone et télécopie : (418) 887-1321
E mail : grexporc@globetrotter.net

Francis Arsenault, tsa
Cellulaire : 561-6802

Michel Mercier, dta
Cellulaire : 575-3802

Annexe 5

CHARTE DE TEMPÉRATURE EN POUPONNIÈRE
PLAFOND PERFORÉ ÉTÉ

Date de sevrage : _____ **Poids moyen :** _____

Nombre de porcelets : _____ **Âge au sevrage :** _____

Semaine	Âge post-sevrage	T° ambiante	T° min	T° max	Phase moulée	Mortalité	Date	Remarques
1	01 82,0°F – 27,7°C	80,7	—	82			22	878
	02 82,0°F – 27,7°C	81,6	79	82			23	881 ret cinq [illegible]
	03 82,0°F – 27,7°C	80,6	79	82			24	886
	04 82,0°F – 27,7°C	81,6	80	82			25	890
	05 81,0°F – 27,2°C	81,6	80	82			26	897
	06 81,0°F – 27,2°C	81	79	82			27	901
	07 81,0°F – 27,2°C	81,8	79	82			28	907 [illegible] Nais
2	08 80,0°F – 26,5°C	82,4	79	82			29	915
	09 80,0°F – 26,5°C	81,1	77	81			30	924
	10 78,0°F – 25,5°C	80,1	78	81			1	929
	11 78,0°F – 25,5°C	78,2	77	80			2	933
	12 78,0°F – 25,5°C							
	13 76,0°F – 24,5°C							
	14 76,0°F – 24,5°C							
3	15 75,0°F – 24,0°C							
	16 75,0°F – 24,0°C							
	17 74,0°F – 23,5°C							
	18 74,0°F – 23,5°C							
	19 73,0°F – 22,5°C							
	20 73,0°F – 22,5°C							
	21 72,0°F – 22,2°C							

Titre Fiche de régie d'élevage
Température journalière minimum et maximum

ANNEXE 6 : EXEMPLE DE FICHE DE RÉGIE D'ÉLÉVAGE – INVENTAIRE DES PORCELETS DANS LA POUPONNIÈRE

Meuneries Berthiaume inc.

INVENTAIRE

Annexe 6

Section: Pouponnière

Producteur: [illegible]

Élevage: 15

Titre: Fiche régie d'élevage – Inventaire des porcelets dans la pouponnière

Date	Entrés	Sortis	MORTALITÉ Nbre	MORTALITÉ Cause	Inventaire à ce jour	Observation
18-10	158				158	5.0 ch 1
21-10	86				244	4,8
24-10		.1	1	grosse patte	243	
24-10	141		1		384	ch 2
24-10	enlever de l'inventaire		1	crever	382	
24-10	enlever de l'inventaire		1	grosse patte	381	
25-10	enlever de l'inventaire		1	faible	380	
28-10	74				464 454	erreur de 10
29-10	15				479	
31-10	169				648	ch 4
1-11	11				659	
3-11		.2	1	boiteux	658	
4-11		.3	1	galle	657	
4-11	102				759	
5-11	19				778	1 fois (5.0 k
6-11	142				920	ch 3
8-11	10				930	
11-11	enlever de l'inventaire		1	crever	929	
11-11	enlever de l'inventaire		1	mal patte	928	
11-11	enlever de l'inventaire		1	faible	926	
11-11	122 ←				1048	
11-11	enlever de l'inventaire		1	mal patte + crever	1047	
11-11	enlever de l'inventaire		1	crever + mal patte	1046	
12-11		.4	1	strep ???	1045	
14-11	42				1087	
15-11		.5	1	radais	1086	
16-11		.6	1	tiu (Rude	1085	
17-11		.7	1	plump	1084	
20-11	enlever de l'inventaire		1	crever	1083	
20-11		.8	1	radais	1082	
23-11	enlever de l'inventaire		1	radais + crever	1081	
24-11		.9	1	radais	1080	
25-11		1	1	?	1079	

ANNEXE 7 : DONNÉES CLIMATIQUES RÉGIONALES (QUÉBEC) DE 1998 À 2003

	Température extérieure		Humidité de l'air	Rayonnement solaire
	° C	± (écart type)	%	kJ/m^2
janvier-98	-9,0	6,7	78,8	560
février-98	-5,2	6,4	78,8	745
mars-98	-2,8	5,6	79,9	890
avril-98	5,9	5,1	.	1311
mai-98	14,2	5,0	.	1394
juin-98	16,3	5,1	.	1174
juillet-98	19,1	4,3	77,2	1311
août-98	18,5	4,4	76,0	1355
septembre-98	13,7	4,0	.	1000
octobre-98	7,5	3,5	.	702
novembre-98	0,5	3,5	80,2	464
décembre-98	-5,1	6,3	78,9	452
janvier-99	-11,7	7,6	78,3	550
février-99	-7,1	5,8	75,2	829
mars-99	-1,8	5,0	74,5	1006
avril-99	4,5	4,1	60,1	1368
mai-99	14,9	6,2	58,1	1546
juin-99	18,4	5,1	70,7	1407
juillet-99	19,6	4,1	.	1373
août-99	17,9	4,2	.	1337
septembre-99	15,9	5,0	.	1046
octobre-99	5,4	3,9	68,7	783
novembre-99	2,2	5,0	67,8	465
décembre-99	-5,5	7,1	82,7	416
janvier-00	-12,2	7,3	67,1	573
février-00	-8,4	7,3	62,2	1222
mars-00	0,1	4,9	68,8	1775
avril-00	3,8	3,7	68,6	1768
mai-00	11,3	4,7	67,8	1314
juin-00	16,1	5,2	66,4	1387
juillet-00	18,7	4,3	72,1	1372
août-00	18,4	3,9	76,4	1224
septembre-00	12,1	5,3	76,5	991
octobre-00	6,6	4,8	76,6	818
novembre-00	1,3	4,7	85,2	468
décembre-00	-10,3	6,3	77,6	479

Données climatiques régionales de 1998 à 2003. (suite)

	Température de l'air extérieur		Humidité de l'air extérieur	Rayonnement solaire
	^{o}C	± (écart type)	%	kJ/m^2
janvier-01	**-11,0**	**5,0**	**74,8**	**638**
février-01	**-10,3**	**5,9**	**68,7**	**851**
mars-01	**-4,4**	**6,0**	**65,0**	**1153**
avril-01	**3,8**	**4,7**	**56,6**	**1415**
mai-01	**13,7**	**5,5**	**60,2**	**1491**
juin-01	**17,8**	**5,1**	**70,5**	**1385**
juillet-01	**17,7**	**4,4**	**77,2**	**1284**
août-01	**19,1**	**4,9**	**72,7**	**1336**
septembre-01	**14,1**	**4,8**	**77,7**	**1176**
octobre-01	**7,9**	**4,9**	**78,9**	**609**
novembre-01	**2,2**	**4,7**	**80,8**	**280**
décembre-01	**-2,4**	**4,4**	**81,5**	**237**
janvier-02	**-7,6**	**4,5**	**84,1**	**335**
février-02	**-8,2**	**6,4**	**80,1**	**409**
mars-02	**-4,6**	**5,2**	**76,7**	**651**
avril-02	**3,8**	**4,9**	**71,1**	**822**
mai-02	**9,5**	**5,4**	**70,0**	**915**
juin-02	**15,2**	**5,4**	**71,9**	**966**
juillet-02	**19,8**	**4,9**	**75,2**	**880**
août-02	**19,5**	**5,2**	**73,7**	**896**
septembre-02	**15,8**	**5,8**	**74,4**	**1032**
octobre-02	**4,9**	**5,7**	**80,2**	**442**
novembre-02	**-1,9**	**4,4**	**82,8**	**297**
décembre-02	**-7,0**	**5,6**	**82,0**	**302**
janvier-03	**-14,2**	**6,0**	**73,4**	**609**
février-03	**-12,8**	**8,2**	**67,0**	**663**
mars-03	**-5,5**	**7,8**	**72,7**	**799**
avril-03	**1,4**	**5,7**	**65,5**	**923**
mai-03	**10,9**	**5,5**	**67,3**	**977**

Tiré de Agriculture Canada, (2003a)

ANNEXE 8 : COURBES MOYENNES DES TEMPÉRATURES ET DU RAYONNEMENT SOLAIRE

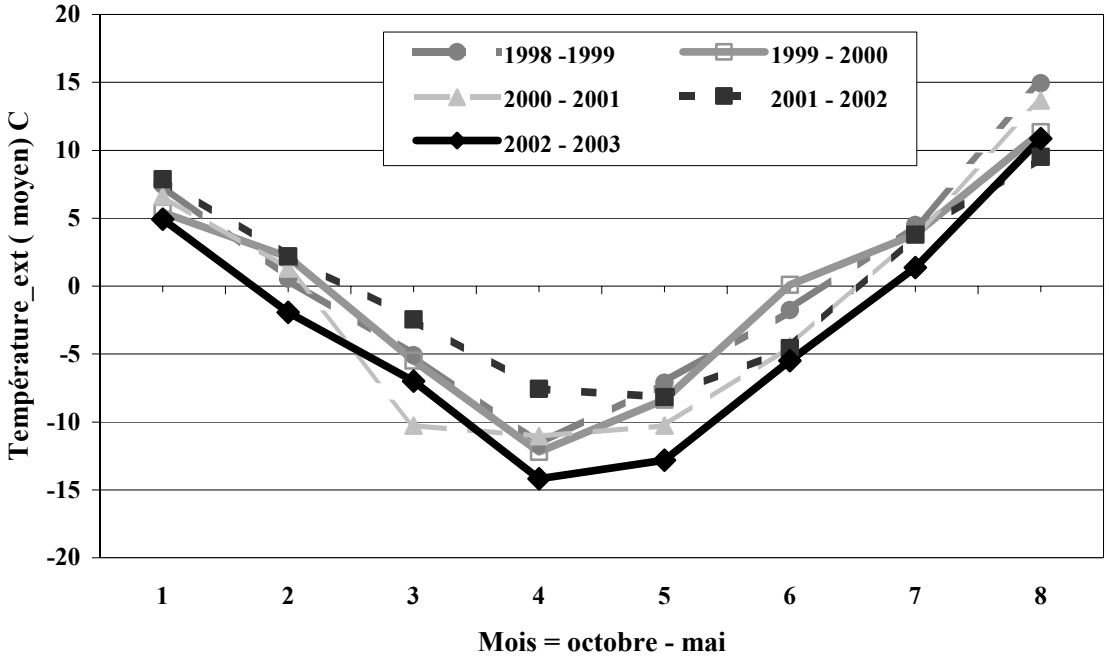


Figure 1 : Courbes moyennes de température d'air extérieur pour Québec
(Adapté de : Environnement Canada, 2003a)

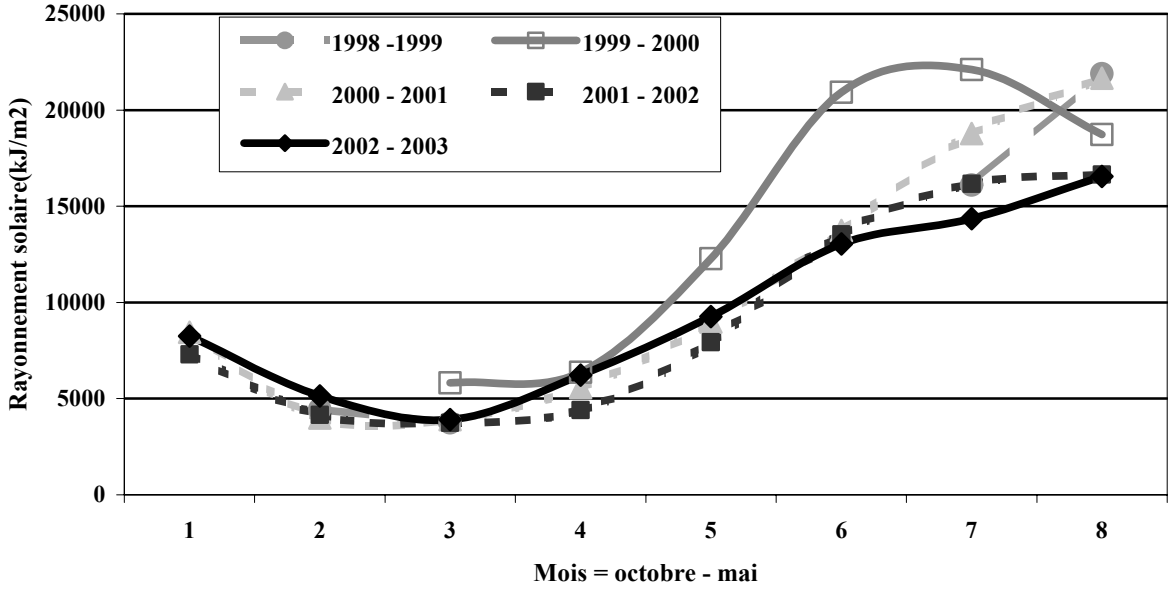


Figure 2. Courbes moyennes du rayonnement solaire pour Québec
(Adapté de : Environnement Canada, 2003a)

ANNEXE 9 : DONNÉES ET RÉSULTATS JOURNALIERS POUR LA DURÉE DE L'EXPÉRIMENTATION

Date	T ext °C	T Plénum - T ext °C	Ensoleil-lement hres	Débit d'air m^3/s	$T^o_{déficit}$ illimité (MJ)	$T^o_{déficit}$ 10 °C (MJ)	$T^o_{déficit}$ 5°C (MJ)	$T^o_{déficit}$ 0°C (MJ)	$T^o_{déficit}$ -5°C (MJ)	$T^o_{déficit}$ 10°C (MJ)
01-nov	-2,4	3,1	4,8	0,15	122	113	89	33	17	0
02-nov	-9,3	2,2	6,4	0,23	110	110	110	110	51	9
03-nov	-7,2	5,6	9	0,19	371	250	153	43	5	0
04-nov	-3,9	1,7	0	0,27	101	101	100	50	0	0
05-nov	-2,9	2,4	0	0,3	140	140	140	83	0	0
06-nov	-0,2	1,2	0	0,47	62	62	62	0	0	0
07-nov	-6,9	5,2	8,9	0,27	444	390	304	197	62	1
08-nov	0,2	0,5	0	0,38	26	26	24	1	1	0
09-nov	3,5	1,7	0,6	0,47	153	135	59	11	0	0
10-nov	11,6	1,0	2,5	0,95	253	11	11	0	0	0
11-nov	13,6	1,2	1,9	0,94	157	40	7	0	0	0
12-nov	3,1	1,8	0	0,39	131	131	83	1	0	0
13-nov	2,8	1,6	0	0,39	111	111	106	0	0	0
14-nov	3,1	2,4	0,3	0,5	211	103	20	0	0	0
15-nov	1,1	2,1	0	0,51	192	192	120	30	0	0
16-nov	-6,9	4,9	8	0,55	581	460	341	181	32	0
17-nov	-4,4	1,3	0	0,55	103	103	103	103	0	0
18-nov	-4,7	3,0	0,6	0,3	198	198	198	190	0	0
19-nov	-3,0	3,2	0	0,46	229	224	205	137	4	0
20-nov	2,2	0.0	0	0.72	0	0	0	0	0	0
21-nov	5.6	0.6	1.6	1.16	171	103	0	0	0	0
22-nov	3.2	0.9	0	0.86	100	100	46	0	0	0
23-nov	-1.8	1.2	0.9	0.7	126	126	127	63	0	0
24-nov	-3.9	2.0	4.8	0.68	222	221	194	96	0	0
25-nov	-5.4	-3.9	0	0.61	0	0	0	0	0	0
26-nov	-5.4	-4.0	6.3	0.66	0	0	0	0	0	0
27-nov	-8.4	-6.1	8.8	0.68	0	0	0	0	0	0
28-nov	-12.3	-9.0	6.6	0.57	0	0	0	0	0	0
29-nov	-7.0	-5.1	0	0.74	0	0	0	0	0	0
30-nov	0.5	0.3	0	0.93	104	104	104	0	0	0
01-déc	-6,7	-4,9	0	0,63	131	131	131	131	60	7
02-déc	-12,2	2,4	1,9	0,51	339	339	339	325	203	47
03-déc	-15,4	1,4	0	0,44	100	100	100	100	100	99
04-déc	-15,2	2,8	6,7	0,47	328	328	328	328	272	128
05-déc	-9,2	3,0	0	0,55	414	400	354	250	77	4
06-déc	-5,5	1,2	0	0,52	88	88	88	88	17	0
07-déc	-3,8	0,9	0	0,58	70	70	70	70	3	0
08-déc	-8,3	1,7	0	0,57	174	174	174	174	67	40
09-déc	-16,6	3,3	3,4	0,28	234	234	234	228	190	120
10-déc	-5,1	0,5	0	0,49	16	16	16	16	0	0
11-déc	-2,0	0,4	0	0,71	47	47	47	0	0	0
12-déc	-0,6	0,8	0	0,78	148	139	49	3	0	0

Données et résultats journaliers pour la durée de l'expérimentation (suite)

Date	T ext °C	T Plénum - T ext °C	Ensoleil-lement hres	Débit d'air m^3/s	$T^o_{déficit}$ illimité	$T^o_{déficit}$ 10 °C	$T^o_{déficit}$ 5 °C	$T^o_{déficit}$ 0 °C	$T^o_{déficit}$ -5 °C	$T^o_{déficit}$ 10 °C
13-déc	-0,8	0,6	0	0,78	98	98	69	5	0	0
14-déc	0,8	0,6	0	0,87	54	54	55	0	0	0
15-déc	-1,8	0,8	5,1	0,82	70	70	70	24	0	0
16-déc	-7,4	1,2	0	0,67	108	108	108	108	53	3
17-déc	-12,5	4,4	8,1	0,59	725	695	555	368	144	33
18-déc	-10,2	3,7	5,4	0,69	728	641	459	227	58	26
19-déc	-2,5	1,9	0,7	0,88	409	343	162	25	0	0
20-déc	2,8	0,3	0	0,76	6	6	6	0	0	0
21-déc	-0,8	0,8	0,2	0,35	26	26	26	4	0	0
22-déc	-1,3	0,9	0	0,38	32	32	32	2	0	0
23-déc	-2,9	1,6	2,4	0,39	100	100	100	84	0	0
24-déc	-8,6	2,6	5,5	0,34	222	222	220	183	87	4
25-déc	-8,3	2,3	5,9	0,44	273	267	236	163	26	0
26-déc	-8,2	1,8		0,46	155	155	154	142	76	4
27-déc	-10,6	4,5	8,2	0,4	501	473	376	249	101	9
28-déc	-4,2	1,0	0	0,47	47	47	48	47	0	0
29-déc	-7,0	2,5	3	0,52	296	296	263	201	59	4
30-déc	-13,7	4,9	7,7	0,4	660	613	500	354	182	42
31-déc	-1,2	0,4	0	0,71	19	19	19	12	12	0
01-janv	-5,7	1,7	4,1	0,58	161	161	161	161	63	28
02-janv	-12,0	5,0	6,9	0,49	720	704	583	429	230	51
03-janv	-7,5	2,1	2,8	0,35	166	166	161	127	29	6
04-janv	-7,7	1,6	0	0,25	67	67	67	67	63	0
05-janv	-7,2	3,7	0,8	0,25	270	262	215	132	34	1
06-janv	-6,6	2,1	0,3	0,23	94	94	94	94	45	0
07-janv	-9,0	4,8	5,3	0,18	359	279	209	131	41	0
08-janv	-9,0	1,9	3,6	0,18	78	78	78	78	56	1
09-janv	-17,8	5,0	6,2	0,18	283	276	255	216	159	89
10-janv	-15,0	4,0	2,8	0,15	236	231	213	180	122	45
11-janv	-17,2	4,8	7,2	0,18	227	227	225	200	158	103
12-janv	-13,3	3,8	6	0,18	175	175	170	151	107	37
13-janv	-9,6	1,7	0	0,28	105	105	106	105	63	6
14-janv	-17,9	5,6	7,2	0,2	390	390	378	331	248	147
15-janv	-20,5	2,4	1,8	0,13	70	70	70	70	70	69
16-janv	-17,8	5,0	7,1	0,17	249	249	249	239	190	125
17-janv	-18,6	6,2	8	0,22	586	575	505	403	279	142
18-janv	-18,8	5,7	4,9	0,31	514	512	461	369	260	134
19-janv	-11,3	2,2	0	0,38	241	241	241	206	107	13
20-janv	-11,4	1,9	0	0,36	113	113	113	113	106	24
21-janv	-22,0	4,8	7,4	0,26	279	279	279	279	276	239
22-janv	-24,2	4,0	0	0,25	203	203	203	203	203	203
23-janv	-19,9	2,7	5,6	0,13	75	75	75	75	75	75
24-janv	-18,5	5,0	8,8	0,23	461	461	441	359	243	112
25-janv	-14,1	2,3	0,6	0,21	90	90	90	90	74	16
26-janv	-8,1	2,1	0	0,33	132	132	132	132	53	10
27-janv	-19,5	5,7	7,6	0,2	376	376	370	330	271	183
28-janv	-21,9	5,7	8,7	0,2	361	361	361	337	273	182

Données et résultats journaliers pour la durée de l'expérimentation (suite)

Date	T ext °C	T Plénum - T ext °C	Ensoleil-lement hres	Débit d'air m^3/s	$T^o_{déficit}$ illimité	$T^o_{déficit}$ 10 °C	$T^o_{déficit}$ 5 °C	$T^o_{déficit}$ 0 °C	$T^o_{déficit}$ -5 °C	$T^o_{déficit}$ 10 °C
30-janv	-11,9	5,8	8,8	0,38	780	608	454	272	85	32
31-janv	-3,8	4,5	7,1	0,59	746	416	204	38	4	0
01-févr	-1,1	1,1	0,1	0,83	165	165	123	36	0	0
02-févr	-4,0	1,3	0	0,78	161	161	161	161	0	0
03-févr	-5,5	3,9	8,1	0,88	765	763	600	332	53	0
04-févr	-3,5	0,3	0	1,18	13	13	13	13	0	0
05-févr	-13,4	3,2	0	0,46	278	278	278	278	274	200
06-févr	-15,0	4,9	9,5	0,4	494	494	480	413	288	122
07-févr	-12,0	3,9	5,9	0,49	515	515	492	372	183	97
08-févr	-11,5	4,3	2,9	0,42	455	455	441	352	198	30
09-févr	-9,4	2,0	3,6	0,52	192	192	192	192	133	19
10-févr	-8,7	1,3	1,7	0,66	162	162	163	162	55	0
11-févr	-19,2	6,7	8,4	0,41	681	681	681	660	554	397
12-févr	-15,3	2,6	1,9	0,47	267	267	267	266	239	95
13-févr	-25,9	5,9	5,3	0,28	535	535	535	535	525	454
14-févr	-26,6	5,4	8,7	0,32	604	604	604	604	569	463
15-févr	-26,6	6,4	9,8	0,26	534	534	534	533	466	364
16-févr	-25,5	7,1	9,7	0,28	530	530	530	494	412	311
17-févr	-16,2	5,1	8	0,38	529	529	501	390	221	104
18-févr	-7,0	2,6	3	0,44	270	270	267	151	54	17
19-févr	-3,1	1,2	0	0,53	103	103	103	47	7	0
20-févr	-1,7	4,2	9,3	0,56	562	466	305	91	0	0
21-févr	-3,5	1,5	0	0,55	152	152	152	147	12	0
22-févr	-7,6	4,1	0,9	0,62	563	561	482	334	148	0
23-févr	-8,7	1,7	0	0,54	170	170	170	170	162	10
24-févr	-14,4	6,2	8,2	0,42	641	641	635	534	381	186
25-févr	-18,6	4,5	9,4	0,35	457	457	457	454	410	295
26-févr	-20,2	6,5	10,3	0,37	745	740	656	512	336	154
27-févr	-12,6	7,0	8,7	0,24	518	362	260	148	63	29
28-févr	-8,9	6,4	10,3	0,21	506	313	197	67	28	6
01-mars	-5,7	6,1	9,3	0,27	548	254	116	39	47	7
02-mars	-0,7	1,4	0	0,41	134	133	119	15	2	0
03-mars	-21,7	7,4	8,1	0,3	442	442	442	442	432	362
04-mars	-14,2	6,1	2,8	0,22	389	389	365	297	191	72
05-mars	-8,4	3,4	0	0,12	112	108	108	102	37	0
06-mars	-14,9	8,5	10,6	0,23	573	499	415	313	198	74
07-mars	-12,4	8,0	7,4	0,2	486	395	310	211	95	36
08-mars	-5,0	3,0	0,2	0,16	102	101	101	78	11	0
09-mars	-11,4	4,8	7,3	0,17	176	176	176	168	106	38
10-mars	-16,8	3,9	6,3	0,2	154	154	154	154	149	102
11-mars	-10,3	4,4	4,3	0,24	190	190	176	147	87	34
12-mars	-5,0	2,2	1,6	0,26	117	117	117	88	23	8
13-mars	-15,8	6,6	9,1	0,24	480	471	404	296	165	64
14-mars	-15,7	5,4	10,7	0,25	498	498	472	359	219	74
15-mars	-7,5	4,2	9,2	0,37	459	375	229	52	17	4
16-mars	-0,1	2,1	2,5	0,6	320	197	56	25	1	0
17-mars	-1,7	1,3	0	0,47	113	113	113	55	0	0

Données et résultats journaliers pour la durée de l'expérimentation (suite)

Date	T ext °C	T Plénum - T ext °C	Ensoleil-lement hres	Débit d'air m^3/s	$T^o_{déficit}$ illimité	$T^o_{déficit}$ 10 °C	$T^o_{déficit}$ 5 °C	$T^o_{déficit}$ 0 °C	$T^o_{déficit}$ -5 °C	$T^o_{déficit}$ 10 °C
18-mars	-3,4	2,7	10,9	0,56	454	353	145	37	9	2
19-mars	-6,5	3,3	12,3	0,59	599	534	332	134	46	17
20-mars	2,0	1,1	6,2	0,73	323	189	49	0	0	0
21-mars	3,8	0,6	0	0,76	73	73	45	0	0	0
22-mars	3,2	0,6	0	0,79	28	28	0	0	0	0
23-mars	1,8	1,0	7,5	0,78	122	119	81	9	0	0
24-mars	3,9	0,9	2,7	0,87	190	82	10	0	0	0
25-mars	7,3	-0,1	0	1,12	14	14	0	0	0	0
26-mars	3,8	0,8	0	0,87	90	90	26	0	0	0
27-mars	1,6	1,3	2,1	0,82	187	179	62	0	0	0
28-mars	3,7	1,0	2,9	1,1	210	183	40	9	0	0
29-mars	10,4	0,8	0	1,32	165	21	1	0	0	0
30-mars	-0,5	1,8	0	0,36	119	119	119	41	0	0
31-mars	-5,6	3,2	4,1	0,47	325	325	296	178	27	0
01-avr	-7,5	6,2	9,5	0,67	998	814	615	340	91	5
02-avr	-1,9	1,7	3,2	0,77	253	253	208	20	2	,
03-avr	-4,8	4,6	11,8	0,86	986	740	426	92	20	2
04-avr	-8,2	3,9	8,9	0,61	559	554	463	318	129	38
05-avr	-6,8	1,4	0	0,78	186	186	186	186	83	0
06-avr	-5,4	2,4	7,5	0,66	327	327	326	258	30	0
07-avr	-7,2	4,9	11,2	0,75	957	834	590	243	46	14
08-avr	-2,1	4,3	6,9	0,94	979	740	416	83	11	0
09-avr	1,0	4,4	12,3	0,75	911	359	68	19	0	0
10-avr	3,7	4,3	11,9	0,58	756	86	23	1	0	0
11-avr	8,6	3,6	10,8	0,75	710	23	3	0	0	0
12-avr	5,6	4,8	9	0,74	848	74	38	0	0	0
13-avr	1,2	4,5	0	0,56	645	254	62	14	0	0
14-avr	4,8	4,0	5,6	0,61	607	170	22	1	0	0
15-avr	9,2	0,7	7,6	0,57	59	25	0	0	0	0
16-avr	-0,6	3,6	12,3	0,68	554	433	239	3	0	0
17-avr	-6,1	6,6	12,5	0,38	750	524	362	169	45	2
18-avr	4,2	3,9	4,5	0,58	525	157	42	1	0	0
19-avr	7,9	2,1	0,3	0,35	170	28	1	0	0	0
20-avr	11,9	1,3	0,9	0,65	215	15	0	0	0	0
21-avr	13,7	2,0	1,1	0,77	313	20	0	0	0	0
22-avr	9,5	1,1	0	0,46	74	22	0	0	0	0
23-avr	4,8	1,4	0	0,55	144	144	39	0	0	0
24-avr	0,0	1,6	0	0,56	139	139	139	0	0	0
25-avr	0,4	2,1	1	0,63	260	260	160	11	0	0
26-avr	2,6	0,6	0	0,9	95	95	29	0	0	0
27-avr	5,9	0,5	3,9	0,89	92	92	0	0	0	0
28-avr	11,6	1,5	3,5	0,9	304	13	0	0	0	0
29-avr	7,8	2,1	6,3	0,72	310	52	13	5	0	0
30-avr	4,3	4,1	12	0,52	613	137	23	3	0	0

ANNEXE 10 : FORMULES POUR LE CALCUL DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE (GES)

1. [2]Réduction des émissions en équivalent de CO_2

Le facteur d'émission du gaz CO_2 est de 1500 g/$l_{liquide}$, soit 1500 kg/m³.

kg CO_2 = **Q** (kJ/s) × (1 $l_{liquide}$ /25 529 kJ ×0,90)[1]× (1m³/1000 l) × (10 min) × (60 s/min) × 1500kg/m³ (1)
(Environnement Canada, 2002)

2. [2]Réduction des émissions en équivalent de CO_2

Le facteur d'émission du gaz CO_2 est de 1500 g/$l_{liquide}$, soit 1500 kg/m³.

kg CO_2 = **Q** (kJ) × (1 $l_{liquide}$ /25 529 kJ ×0,90)[1]×(1m³/1000 l) × 1500 kg/m³ (2)
(CRÉAQ, 1995)

3. [2]Réduction des émissions en équivalent de N_2O

Le facteur d'émission du gaz N2O est de 0,108 g/$l_{liquide,}$ 0,108 kg/m³.

kg N_2O = **Q** (kJ/s) × (1 l $_{liquide}$ /25 529 kJ ×0,90)[1]× (1m³/1000 l) × (10 min) × (60 s/min) × 0,108 kg/m³ (3)
(Environnement Canada, 2002)

4. [2]Réduction des émissions en équivalent de CH_4

Le facteur d'émission du gaz CH4 est de 0,024 g/l $_{liquide}$, 0,024 kg/m³.

kg CH_4 = **Q** (kJ/s) × (1 l $_{liquide}$ /25 529 kJ ×0,90)[1]× (1m³/1000 l) × (10 min) × (60 s/min) × 0,024 kg/m³ (4)
Environnement Canada, 2002)

[1] La valeur calorifique du gaz propane est de 25 529 kJ/l avec une efficacité de 90 %.
[2] Lors de la combustion du gaz propane.
Où **Q** est l'apport de chaleur du mur solaire en kJ/s ou en kJ.

ANNEXE 11 : FORMULAIRE – ÉTUDES PRÉLIMINAIRE ET DÉTAILLÉE

Étude préliminaire

Étape 1 - Description résumée du projet

À l'usage de l'administration
N° de projet :

Titre du projet **(maximum 100 caractères)**
Évaluation de l'efficacité technique et économique d'un mur solaire dans un bâtiment d'élevage porcin

S'inscrit au programme :

- ☐ Amélioration de la capacité concurrentielle
- ☐ Recherche appliquée et innovation technologique
- X Programme agroenvironnemental volet Transfert et innovation technologique
- ☐ Soutien à l'organisation des services-conseils. Spécifiez sous quel(s) axe(s) :
  - O Axe 1 – Relations interorganismes et harmonisation
  - O Axe 2 – Réseautage
  - O Axe 3 – Promotion et communication

Requérant		
Nom de l'organisme ou du comité :	Centre du développement du porc du Québec inc. (CDPQ)	
Nombre de membres :		
Brève description :	Le CDPQ a pour mission le développement et le transfert de technologies de pointe afin de contribuer activement à l'amélioration de la qualité, de l'efficacité et de la rentabilité d'une industrie porcine québécoise durable	
Répondant :	Pierre Falardeau directeur général	
Adresse :	2795, boul. Laurier, bureau 340	
Ville et code postal :	Ste-Foy, G1V 4M 7	
Téléphone :	(418) 650-2440	Télécopieur : (418) 650-1626
Courrier électronique :	pfalardeau@cdpqinc.qc.ca	
Chargé de projet :	Francis Pouliot, ingénieur agricole	
Téléphone :	(418) 650-2440	Télécopieur : (418) 650-1626
Courriel :	fpouliot@cdpqinc.qc.ca	

A. Problématique

Situation actuelle, situation désirée

Problématique

Avec l'augmentation des coûts de l'énergie fossile, il y a un intérêt grandissant de la part des producteurs de porcs d'optimiser leur coût de chauffage et ainsi demeurer performant et compétitif. Pour répondre à ce besoin, il est important d'apporter aux producteurs des alternatives économiques relativement au chauffage d'appoint.

Le climat froid et rigoureux du Québec fait en sorte que l'utilisation d'un système de chauffage d'appoint est requis dans nos bâtiments porcins durant la saison froide. Celle-ci peut s'étendre du mois d'octobre au mois de mars. Malgré sa longue saison froide, le Québec jouit cependant d'un ensoleillement qui se situe au-dessus de la moyenne, par rapport à d'autres localisations nordiques habitées sur la planète, avec près de 1700 kWh d'énergie solaire incident sur une surface verticale orientée franc sud. Compte tenu de la localisation de la province et de l'augmentation des coûts de combustible, l'énergie solaire apparaît être une alternative intéressante pour combler une partie des besoins de chauffage dans les bâtiments porcins.

En effet, l'adoption d'une technologie solaire pour le chauffage des bâtiments pourrait apporter des économies d'énergie non négligeables pour l'industrie porcine québécoise. Outre cet avantage, l'énergie solaire représente une source d'énergie économique et respectueuse envers l'environnement, en permettant, entre autres, de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Une des techniques prometteuse au Québec est le mur solaire (Solarwall); ce dernier apparaît avantageux car il permet la récupération de l'énergie solaire en utilisant l'effet de la convection et du rayonnement solaire. Cette technologie consiste en un mur à double paroi en tôle d'acier de couleur noire dont la surface supérieure est perforée et réchauffée par le rayonnement solaire. L'air provenant de l'extérieur passera au travers du mur solaire par ces perforations, permettant une grande surface de contact entre l'air froid et la paroi du mur qui est chaude. Cette grande surface de contact permet un transfert efficace de la chaleur de la paroi à l'air frais passant à travers les perforations.

Ce système de chauffage solaire est connu dans le milieu industriel et institutionnel au Québec depuis environ une dizaine d'années. Cependant, l'efficacité de ce système de chauffage et les stratégies de contrôle développées dans ce milieu ne sont pas applicables aux bâtiments porcins. Ces différences, entre le milieu industriel et agricole, sont occasionnées par les méthodes de construction, les débits de ventilation, les stratégies de contrôle, les besoins en chauffage, les objectifs de production et les conditions d'ambiance qui ne sont pas compatibles.

Objectif général

L'objectif général est d'évaluer l'efficacité technique et économique d'un mur solaire en production porcine.

Les objectifs spécifiques sont :

- établir un apport de chaleur entre la psychrométrie de l'air extérieur et celle de l'air à l'entrée d'un corridor de préchauffage ayant une température de consigne spécifique en condition de ventilation hivernale;
- évaluer l'apport de chaleur utile d'un mur solaire pour préchauffer l'air frais en ventilation hivernale;
- évaluer l'impact du mur solaire sur la consommation de combustible dans un corridor de préchauffage;
- évaluer le temps d'amortissement du système de mur solaire;
- recommander, si les résultats le permettent, des adaptations possibles du mur solaire afin de le rendre optimal pour la production porcine.

B. Aspect novateur

Originalité du projet

Projet non réalisé et qui n'est pas en cours de réalisation

L'énergie requise pour le chauffage des bâtiments porcins provient surtout de combustibles fossiles comme le propane. La technologie du mur solaire pour le préchauffage de l'air frais dans une porcherie constitue une application nouvelle et potentiellement positive pour les producteurs. Il n'existe pour l'instant aucune donnée disponible sur l'apport de cette technologie sur l'apport de chaleur dans un bâtiment porcin. Une telle étude permettrait aux producteurs et aux conseillers d'avoir une référence afin d'aider à la prise de décision.

Les résultats du présent projet permettront d'évaluer le potentiel de cette technologie et d'en orienter le développement futur dans les bâtiments porcins.

C. Méthodologie retenue pour réaliser le projet

Faisabilité technique, démarches utilisées pour atteindre les objectifs, protocole

Le projet se déroulera comme suit :

Etapes	Réalisation	Lieu	Mois
Étape 1 : Choix du site (pouponnière)	Énerconcept/ CDPQ	Beauce	octobre 2001
Étape 2 : Ententes avec le producteur	Énerconcept	Beauce	octobre 2001
Étape 3 : Installation système d'acquisition de données	Énerconcept/ CDPQ	Beauce	octobre 2001
Étape 4 : Formation du producteur relativement au protocole	CDPQ	Beauce	octobre 2001
Étape 5 : Prises de données régulières et leur classement	Enerconcept/ CDPQ	Beauce	oct. 2001/ avril 2002
Étape 6 : Rédaction du rapport final	CDPQ	Ste-Foy	juin 2002
Étape 7 : Organisation d'une porte ouverte (si le producteur et le statut sanitaire le permettent)	CDPQ	Beauce	août 2002
Étape 8 : Article de vulgarisation dans Porc Québec	CDPQ	Ste-Foy	oct. 2002

Les essais seront effectués dans une pouponnière ayant comme caractéristique d'avoir un conduit de préchauffage dans l'entretoit. Les sources d'énergie utilisées pour le préchauffage seront le soleil (mur Solarwall) et le propane (aérotherme). La température dans le conduit sera fixée à -5 ^{o}C. Afin de quantifier l'apport énergétique du mur solaire, un apport de chaleur simple sera réalisé en tenant compte des propriétés de l'air entrant (air extérieur) et celles à la sortie du mur solaire, soit avant que celui-ci ne pénètre dans le corridor de préchauffage. Par conséquent, l'apport de chaleur (objectif 1) sur ce système se résume par l'équation suivante :

$$Q_{SOL} = D_{SOL} \times (1 / v_{SOL}) \times Cp \times (T_{SOL} - T_{EXT})$$

où :

Q_{SOL} = énergie fournie par le système de mur solaire (kW)
D_{SOL} = débit d'air à la sortie du mur solaire (m^3/sec)
v_{SOL} = masse volumique de l'air à la sortie du mur solaire (kg / m^3)
Cp = chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg ^{o} C)
T_{SOL} = température de l'air à la sortie du mur solaire (^{o}C)
T_{EXT} = température de l'air extérieur (^{o}C)

La température de consigne dans le conduit de préchauffage et l'apport de chaleur permettront d'évaluer l'apport énergétique utile (objectif 2) du mur solaire pour le chauffage durant la saison hivernale. Avec ces valeurs et les coûts de construction, il sera possible d'évaluer les économies réalisables à l'aide de cette technologie (objectifs 3 et 4).

En fonction des résultats obtenus, les différents apports de chaleur, énergétiques et économiques permettront d'établir des modifications au système afin d'optimiser ce dernier (objectif 5).

D. Impact sur la production agricole

Le projet prévoit fournir des résultats rigoureux sur l'apport d'énergie utile fourni par un mur solaire dans un conduit de préchauffage sur la période hivernale. L'apport de l'énergie solaire contribuera à diminuer la consommation de combustibles fossiles, contribuant à abaisser les coûts de chauffage.
Le rapport apportera :

- une méthodologie rigoureuse pour évaluer la performance énergétique d'un mur solaire;
- les performances techniques et le rapport efficacité/coût d'un mur solaire;
- des éléments afin de mieux juger de la pertinence d'insérer un mur solaire à des bâtiments porcins;
- un apport de chaleur entre l'entrée et la sortie de l'air du mur solaire (Solarwall) pour un cas typique;
- des informations pertinentes aux ingénieurs impliqués dans la conception de systèmes de ventilation et de chauffage dans le milieu porcin;
- de jeter les bases d'un premier modèle mathématique (pouvant être validé lors d'expérimentations ultérieures) permettant d'extrapoler les résultats en fonction de conditions différentes.

E. Durée du projet

Date de début et date de fin : Octobre 2001 à octobre 2002.

BUDGET ET PARTENAIRES

F. Budget sommaire

Revenus	• Contribution du requérant et des partenaires (jumelable)	28 370 $	45,2 %
	• Contribution des partenaires (non-jumelable)	6 180 $	9,8 %
	• Contribution demandée au CDAQ	28 200 $	45,0 %
	Total des revenus	***62750 $***	
Dépenses	• Main-d'œuvre	41 408 $	
	• Coûts d'utilisation d'équipement, de matériel ou de terrains	17 600 $	
	• Frais de déplacement	2 742 $	
	• Frais d'administration	1 000 $	
	Total des dépenses	***62750 $***	

G. Liste des partenaires

Pour chacun des partenaires, fournir les informations suivantes : nom du partenaire, nom de la personne-ressource et coordonnées (adresse, numéro de téléphone, fax et courriel). Spécifiez l'implication technique et financière des partenaires. Insérez ces informations sur une page supplémentaire au besoin.

Nom du partenaire :	Francis Pouliot CDPQ
Adresse complète :	2795, boul. Laurier, bureau 340, Ste-Foy (Québec) G1V 4M7
Téléphone et télécopieur :	Tél. : (418)650-2440 – Téléc. : (418) 650-1626 Courriel : fpouliot@cdpqinc.qc.ca
Implication technique :	Coordination du projet, rédaction et diffusion des résultats
Implication financière :	9 360 $
Nom du partenaire :	Réal Savaria, Enerconcept
Adresse complète :	79, Wellington Nord, suite 203, Sherbrooke (Québec) J1H 5A9
Téléphone et télécopieur :	Tél. : (819) 829-1690 Téléc. : (819) 562-5578 Courriel : rsavaria@enerconcept.com
Implication technique :	Conseiller technique, conception et ingénierie du système, réalisation de test et prise de données
Implication financière :	11 850 $
Nom du partenaire :	Stéphane Godbout, Ph.D., ing., agr., Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
Adresse complète :	120-A, chemin du Roy, Deschambault (Québec) G0A 1S0
Téléphone et télécopieur :	Tél. : (418) 286-3351 poste 229 – Téléc. : (418) 286-3597 Courriel : stephane.godbout@irda.qc.ca
Implication technique :	Coordination scientifique, validation d'analyse des résultats et du rapport, conseil sur l'élaboration du protocole
Implication financière :	6 180 $
Nom du partenaire :	Producteur agricole (entente finale à confirmer)
Adresse complète :	
Téléphone et télécopieur :	
Implication technique :	Location des lieux et application du protocole
Implication financière :	7 160 $

Veuillez retourner le formulaire au :
Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec
555, boulevard Roland-Therrien, Longueuil (Québec) J4H 3Y9
Courriel : cdaq@upa.qc.ca Télécopieur : (450) 463-5214

Les programmes du CDAQ sont rendus possibles grâce au Fonds canadien d'adaptation et de développement rural (FCADR) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC).

Agriculture et Agroalimentaire Canada Agriculture and Agri-Food Canada

Canada

Mis à jour le 28 avril 2004

ANNEXE 11 (suite)

Étude détaillée

Étape 2 - Description détaillée du projet

N° de projet : 485-09-010727

À compléter à la suite de l'acceptation de l'étude préliminaire

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

REQUERANT	
Nom de l'organisme ou du comité :	Centre de développement du porc du Québec inc. (CDPQ)
Répondant :	Pierre Falardeau, directeur général
Description :	Le CDPQ a pour mission le développement et le transfert de technologies de pointe afin de contribuer activement à l'amélioration de la qualité, de l'efficacité et de la rentabilité d'une industrie porcine québécoise durable.
Chargé de projet :	Francis Pouliot, ingénieur agricole, spécialiste en bâtiment
Téléphone :	(418) 650-2440 **Télécopieur :** (418) 650-1626
Courriel :	fpouliot@cdpqinc.qc.ca

G. Problématique

Situation actuelle, situation désirée

Avec l'augmentation des coûts de l'énergie fossile, il y a un intérêt grandissant de la part des producteurs de porcs d'optimiser leur coût de chauffage pour demeurer performant et compétitif. Pour répondre à ce besoin, il est important d'apporter aux producteurs des alternatives économiques relativement au chauffage d'appoint.

Le climat froid et rigoureux du Québec fait en sorte que l'utilisation d'un système de chauffage d'appoint est requis dans nos bâtiments porcins durant la saison froide qui peut s'étendre du mois d'octobre jusqu'au mois de mars. Malgré sa longue saison froide, le Québec jouit cependant d'un ensoleillement supérieur à la moyenne par rapport à d'autres localisations nordiques habitées sur la planète, avec près de 1 700 kWh d'énergie solaire incident sur une surface verticale orientée franc sud. Compte tenu de la localisation de la province et de l'augmentation des coûts de combustible, l'énergie solaire apparaît être une alternative intéressante pour combler une partie des besoins de chauffage dans les bâtiments porcins.

En effet, l'adoption d'une technologie solaire pour le chauffage des bâtiments pourrait apporter des économies d'énergie non négligeables pour l'industrie porcine québécoise. Outre cet avantage, l'énergie solaire représente une source d'énergie économique et respectueuse envers l'environnement en permettant, entre autres, de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO_2).

Une des techniques prometteuses au Québec est le mur solaire (Solarwall); ce dernier apparaît avantageux car il permet la récupération de l'énergie solaire en utilisant l'effet de la convection et du rayonnement solaire. Cette technologie consiste en un mur à double paroi en tôle d'acier de couleur noire dont la surface supérieure est perforée et réchauffée par le rayonnement solaire. L'air provenant de l'extérieur passera au travers du mur solaire par ces perforations, permettant une grande surface de contact entre l'air froid et la paroi du mur qui est chaude. Cette grande surface de contact permet un transfert efficace de la chaleur de la paroi à l'air frais passant à travers les perforations.

Une des particularités de ce système de mur solaire est son efficacité à réchauffer l'air circulant au travers de sa paroi. Selon le fabricant, le rendement est évalué à 60 % par temps ensoleillé. Ce rendement est semblable à ceux indiqués dans la littérature. Le dépouillement de cette dernière indique que les rendements pour ce genre de système sont fonction de l'ensoleillement, du matériel utilisé pour la fabrication du collecteur et peuvent varier de 0 à 71,4 %. En effet, Reeder (1983) et Siebenmorgen et Dale (1982) ont mesuré des variations de ces rendements allant de 0 à 33 % et de 23,1 à 71,4 % respectivement. Pour sa part, Schulte et Ma (1986), lors d'expérimentation hivernale a évalué qu'une telle technologie pouvait atteindre un rendement moyen de 57,6 %. Ainsi, la comparaison des données provenant du manufacturier et celles apparaissant dans la littérature indiquent que le système Solarwall semble être intéressant par rapport à l'efficacité. De plus, en accord avec la littérature, ce type de système est facile à installer et pratiquement sans entretien comparativement aux systèmes utilisant des capteurs vitrés pouvant casser et dont la saleté peut réduire l'efficacité.

En relation avec les aspects économiques, Reeder (1983) a évalué qu'un système de mur solaire avec accumulateur de chaleur coûtait en 1983, 4,50 $US par pied carré de mur, incluant le matériel et la main-d'œuvre. À ce prix, il a évalué, que l'amortissement pourrait être d'environ 9 ans pour une pouponnière contenant 500 porcelets. Ces résultats ont été obtenus en Ohio lors d'expérimentations se déroulant en février et en mars où la température est demeurée au-dessus de -7 ^{o}C. Le climat de l'Ohio est moins rigoureux que celui du Québec, limitant la période d'utilisation du mur solaire et par conséquent, le rendement. Le coût du gaz propane considéré en 1983, était de 0,20 $US/L.

En ce qui a trait au mur Solarwall, son coût, matériaux seulement, est évalué à environ 10 $CAN par pied carré ou 6,53 $US par pied carré selon le taux de change en vigueur au mois d'août 2001. Il s'agit du prix de vente dans le milieu industriel, mais des démarches sont entreprises afin d'ajuster les prix à la réalité agricole. Par rapport à l'exemple précédant tiré de la littérature, il faut être conscient que les prix ont augmenté depuis 1983, causé par l'inflation du coût des matériaux, de la main-d'œuvre et du gaz propane.

Les entreprises pouvant actuellement bénéficier de ce type de système de chauffage sont celles utilisant des conduits de préchauffage ou bien des systèmes d'entrées d'air latéraux à cause de la facilité d'intégrer efficacement la technologie Solarwall au système de ventilation du bâtiment. Bien entendu, l'orientation du bâtiment est très importante afin d'optimiser l'efficacité du mur solaire (mur solaire du côté sud). Ce système peut s'intégrer dans le cadre de rénovation ou de construction neuve. De plus, ce système peut aussi être utilisé dans d'autres types de production animale où un système de chauffage est requis, comme dans la production de volaille.

Comme la littérature l'indique, ce système de chauffage solaire est connu dans le milieu industriel et institutionnel au Québec depuis environ une dizaine d'années. Dans le milieu agricole, cette technologie a fait l'étude de quelques recherches rigoureuses aux États-Unis sous un climat plus clément et une régie animale complètement différente que ceux rencontrés au Québec ne permettant pas de transposer les résultats. Ainsi, l'efficacité de ce système de chauffage et les stratégies de contrôle développées dans le milieu industriel au Québec ou aux États-Unis en production animale ne sont pas applicables aux bâtiments porcins québécois. Ces différences sont occasionnées par les méthodes de construction, les débits de ventilation, les stratégies de contrôle, les besoins en chauffage, les objectifs de production et les conditions d'ambiance.

H. Objectif général

L'objectif général est d'évaluer l'efficacité technique et économique d'un mur solaire en production porcine.

I. Objectifs spécifiques

Buts visés

Les objectifs spécifiques sont :

- établir un bilan de chaleur entre la psychrométrie de l'air extérieur et celle de l'air à l'entrée d'un corridor de préchauffage ayant une température de consigne spécifique en condition de ventilation hivernale;
- évaluer l'apport de chaleur utile d'un mur solaire pour préchauffer l'air frais en ventilation hivernale;
- évaluer l'impact du mur solaire sur la consommation de combustible dans un corridor de préchauffage;
- évaluer le temps d'amortissement du système de mur solaire;
- recommander, si les résultats le permettent, des adaptations possibles du mur solaire afin de le rendre optimal pour la production porcine.

J. Aspect novateur

Originalité du projet

Projet non réalisé et qui n'est pas en cours de réalisation

L'énergie requise pour le chauffage des bâtiments porcins provient surtout de combustibles fossiles comme le propane. La technologie du mur solaire pour le préchauffage de l'air frais dans une porcherie constitue une application intéressante et potentiellement positive pour les producteurs. Malheureusement, l'expertise développée lors de la conception et de l'installation de ce type de mur solaire en milieu industriel et institutionnel n'est pas transférable directement à la construction en production porcine. En effet, dans les institutions ou les industries, les conditions internes d'ambiance sont connues et stables alors que dans les bâtiments d'élevage, les conditions internes (débit de ventilation et température ambiante) sont variables dans le temps en fonction de la température extérieure et du stade de production. Ainsi, la production de chaleur des animaux variera selon leur poids. Au Québec, il y a eu quelques tentatives d'introduction de cette technologie dans huit porcheries, un séchoir de poules pondeuses et une pour le préchauffage de l'air dans un poulailler. Cependant, aucune de ces installations n'est équipée d'instruments de mesure permettant d'établir une stratégie de contrôle, un bilan massique et économique.

Ainsi, le présent projet permettra de mettre sur pied un bilan permettant de fournir, pour une première fois, des données complètes sur l'apport de cette technologie (Solarwall) au besoin de chauffage dans un bâtiment porcin. Une telle étude permettrait aux producteurs et aux conseillers d'avoir une référence afin d'aider à la prise de décision. De plus, les résultats permettront d'évaluer le potentiel de cette technologie en production porcine et de recommander des modifications aux fabricants afin d'en augmenter la performance en condition d'élevage.

Finalement, en fonction des résultats obtenus, il sera peut être possible de peaufiner le développement d'une technologie permettant la venue d'une nouvelle génération de bâtiments porcins cadrant encore mieux avec la notion de développement durable.

K. Méthodologie

Les essais seront effectués dans une pouponnière ayant comme caractéristique d'avoir un conduit de préchauffage dans l'entretoit. Les sources d'énergie utilisées pour le préchauffage seront le soleil (mur Solarwall) et le propane (aérotherme). La température dans le conduit sera fixée à -5 ^{o}C. Afin de quantifier l'apport énergétique du mur solaire, un bilan de chaleur simple sera réalisé en tenant compte des propriétés de l'air entrant (air extérieur) et de celles à la sortie du mur solaire, soit avant que l'air ne pénètre dans le corridor de préchauffage. Par conséquent, le bilan de chaleur (objectif 1) sur ce système se résume par l'équation suivante :

$$Q_{SOL} = D_{SOL} \times (1 / v_{SOL}) \times Cp \times (T_{SOL} - T_{EXT})$$

où :

Q_{SOL} = énergie fournie par le système de mur solaire (kW)
D_{SOL} = débit d'air à la sortie du mur solaire (m^3/sec)
v_{SOL} = masse volumique de l'air à la sortie du mur solaire (kg / m^3)
Cp = chaleur spécifique de l'air (1,005 kJ / kg ^{o} C)
T_{SOL} = température de l'air à la sortie du mur solaire (^{o}C)
T_{EXT} = température de l'air extérieur (^{o}C)

La température de consigne dans le conduit de préchauffage et le bilan de chaleur permettront d'évaluer l'apport énergétique utile (objectif 2) du mur solaire pour le chauffage durant la saison hivernale. Avec ces valeurs et les coûts de construction, il sera possible d'évaluer les économies réalisables à l'aide de cette technologie (objectifs 3 et 4).

En fonction des résultats obtenus, les différents bilans de chaleur, énergétiques et économiques permettront d'établir des modifications au système afin d'optimiser ce dernier (objectif 5).

Afin de caractériser l'air et d'établir un bilan de chaleur précis, les instruments suivants sont requis :

1. à l'extérieur, une sonde de température et une sonde d'humidité ;
2. à la sortie du mur solaire, un débitmètre, une sonde de température et une sonde d'humidité ;
3. dans le corridor de préchauffage, quatre sondes de température et une sonde d'humidité ;
4. un relai permettant de mesurer le temps de fonctionnement du système de chauffage (aérotherme) et un compteur à gaz propane ;
5. un système d'acquisition de données de type 21X afin d'enregistrer les données dont la fréquence des mesures sera aux 10 minutes.

Également, afin de pouvoir compléter l'analyse globale, des données d'élevage seront prises. Ces données sont : consigne intérieure, nombre d'animaux, aire des animaux, surface de circulation et volume d'air dans le bâtiment.

L. Impact sur la production agricole

Résultats anticipés quantifiables, effets structurants des résultats, analyses avantages/coûts

Le projet prévoit fournir des résultats rigoureux sur l'apport d'énergie utile fourni par un mur solaire dans un conduit de préchauffage pendant la période hivernale. Comme la littérature l'indique d'ailleurs, l'apport de l'énergie solaire contribuera à diminuer la consommation de combustibles fossiles, contribuant à abaisser les coûts de chauffage et à rendre encore plus concurrentielle la production porcine au Québec.

De plus, la venue de nouveaux moyens de chauffage permettra de diminuer la dépendance des producteurs à une source d'énergie pour le chauffage. Une telle technologie jumelée à d'autres éléments tels la récupération de chaleur ou des techniques d'économie d'énergie permettra de réduire les coûts de production, à diversifier les sources d'énergie et réduire l'impact d'une hausse d'une des sources d'énergie.

Également, l'étude approfondie du bilan en conduit de préchauffage permettra peut-être d'établir des températures de consignes optimales en fonction de la température extérieure et ce, indépendamment de la source d'énergie. Par conséquent, ces résultats pourront être utilisés par une large proportion de concepteur.

Finalement, le rapport apportera également :

- une méthodologie rigoureuse pour évaluer la performance énergétique d'un mur solaire;
- des données techniques de performances et le ratio efficacité/coût d'un mur solaire;
- des éléments afin de mieux juger de la pertinence d'insérer un mur solaire à des bâtiments porcins;
- un bilan de chaleur entre l'entrée et la sortie de l'air du mur solaire Solarwall pour un cas typique;
- des informations pertinentes aux ingénieurs impliqués dans la conception de systèmes de ventilation et de chauffage dans le milieu porcin;
- les bases d'un premier modèle mathématique (pouvant être validé lors d'expérimentations ultérieures) permettant d'extrapoler les résultats en fonction de conditions différentes.

M. Pérennité

Élaborer sur les suites du projet et sur les effets durables

Les différents écrits élaborés à la fin du projet permettront, pour plusieurs années, de mettre à la disposition des concepteurs des données permettant d'intégrer une nouvelle source d'énergie et d'élaborer de nouveaux concepts de bâtiments. Les recommandations faites au fabricant permettront à ce dernier de développer une nouvelle génération de mur solaire adaptée à la production porcine ainsi que toute une stratégie de contrôle optimisant l'énergie provenant du mur solaire. Les résultats du projet devront permettre de faire une évaluation de l'intérêt de cette technologie pour les autres stades de production porcine, soit la maternité et la croissance-finition. Un projet d'adaptation, si nécessaire, pour les autres stades de production pourra être mis sur pied. Dans le futur, après quelques essais de démonstration, cette technologie modifiée pourra être facilement intégrée dans la conception de nouveaux bâtiments porcins.

Étapes et échéances
Durée du projet (date de début et date de fin) : Juin 2002 à octobre 2003.

Le projet se déroulera comme suit :

Étapes	Réalisation	Lieu	Mois
Étape 1 : Choix du site (pouponnière)	Énerconcept/ CDPQ/IRDA	Beauce	Juin 2002
Étape 2 : Ententes avec le producteur	Énerconcept	Beauce	Août 2002
Étape 3 : Installation système d'acquisition de données	Énerconcept/ CDPQ/IRDA	Beauce	Septembre 2002
Étape 4 : Formation du producteur relativement au protocole	CDPQ/IRDA	Beauce	Septembre 2002
Étape 5 : Prises de données régulières et leur classement	Enerconcept/ CDPQ	Beauce	Oct. 2002/ avril 2003
Étape 6 : Rédaction du rapport final	CDPQ/IRDA	Ste-Foy	Juin 2003
Étape 7 : Organisation d'une porte ouverte (si le producteur et le statut sanitaire le permettent)	CDPQ	Beauce	Août 2003
Étape 8 : Article de vulgarisation dans Porc Québec	CDPQ/IRDA	Ste-Foy	Octobre 2003

BUDGET, DIFFUSION DES RÉSULTATS ET APPUI DU MILIEU

N. Budget et sources de financement
Compléter l'annexe *Plan de financement*

O. Plan de diffusion des résultats
Énumérer les activités prévues : publicité, conférence, article scientifique, document, visite, journée porte ouverte, etc.

Rédaction dans la revue *Porc Québec*, journée porte ouverte, dépôt du rapport final sur le site Agri-Réseau, envoi du rapport final par courrier électronique aux principaux représentants porcins et si les résultats le permettent, une conférence au congrès annuel de la Société canadienne de génie rural.

P. Appui du milieu
Joindre les lettres confirmant l'implication des partenaires financiers et l'appui du milieu

DÉCLARATION DU REQUÉRANT

J'atteste de mon implication à titre de requérant ou de coprésident et de la véracité des renseignements contenus dans la présente demande. Je certifie que les coûts du projet seront assumés par les organismes décrits.

Pour le programme Soutien à l'organisation des services-conseils *: la signature des deux coprésidents est requise.*

Signatures : _____

_____

_____

Veuillez retourner le formulaire au :
Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec
555, boulevard Roland-Therrien, Longueuil (Québec) J4H 3Y9
Télécopieur : (450) 463-5214
Courriel : cdaq@upa.qc.ca

Les programmes du CDAQ sont rendus possibles grâce au Fonds canadien d'adaptation et de développement rural (FCADR) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC).

Agriculture et Agroalimentaire Canada Agriculture and Agri-Food Canada

Canada

Mis à jour le 28 avril 2004