



Documentation des innovations technologiques
visant l'efficacité énergétique et l'utilisation de
sources d'énergie alternatives durables
en agriculture

RAPPORT NO. 2

DÉCEMBRE 2006

RAPPORT PRÉSENTÉ À

L'Union des producteurs agricoles

ÉQUIPE DE RÉALISATION

G R O U P E
AGÉCO

Responsable du mandat

Jean-Pierre Revéret

Réalisation du mandat

Catherine Brodeur
Cyril Michaud
Isabelle Charron

Correction linguistique

Animemo

Le présent document a été réalisé grâce à la participation financière du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec, d'Hydro-Québec et de l'UPA.



*L'Union des
producteurs
agricoles*

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	1
PREMIÈRE PARTIE	
LES TECHNOLOGIES PERMETTANT UNE AMÉLIORATION	
DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE À LA FERME	
2. Production laitière	3
2.1 La réfrigération du lait à l'aide d'un échangeur à plaques.....	3
2.2 La récupération de chaleur pour le chauffage de l'eau.....	7
2.3 La ventilation	9
2.4 Les pompes à vide du système de lactation.....	12
2.5 L'éclairage efficace.....	13
3. Production porcine	16
3.1 Le chauffage localisé des porcelets : les tapis chauffants.....	16
3.2 Le chauffage des espaces et la ventilation : le mur solaire	18
3.3 Le chauffage des espaces et la ventilation : le récupérateur de chaleur	20
3.4 L'épandage et le traitement des lisiers	21
3.4.1 Trémies-abreuvoir et bols économiseurs	24
3.4.2 Les toitures sur les fosses à lisier	25
4. Production d'œufs de consommation et d'incubation.....	28
4.1 La ventilation	28
4.2 Le chauffage des oiseaux producteurs d'œufs d'incubation	29
4.3 La réfrigération des œufs.....	31
4.4 Le séchage du fumier	31
5. Grandes cultures.....	34
5.1 Le travail réduit du sol	34
5.2 Le séchage du grain	37
5.2.1 Le séchage en crib	38
5.2.2 Les autres méthodes de séchage des grains	40
6. Production en serre	42
6.1 Le chauffage des serres	43
6.2 Le chauffage des plants : tapis chauffants et plancher chauffant	46
6.3 L'éclairage de photosynthèse : les lampes à Haute Pression au Sodium et les diodes émettrices de lumière (LED).....	49
7. Production maraîchère	52
7.1 Le travail réduit du sol	52
7.2 Le refroidissement	55
7.3 Le système d'irrigation	58

DEUXIÈME PARTIE
LES SOURCES D'ÉNERGIE ALTERNATIVES DURABLES
UTILISÉES EN MILIEU AGRICOLE

8.	L'énergie éolienne	62
8.1	Description	62
8.2	Applications possibles à la ferme	62
8.3	Facteurs économiques	64
8.4	Études de cas, projets pilotes	66
9.	La méthanisation (biogaz)	69
9.1	Description	69
9.2	Applications possibles à la ferme	69
9.3	Facteurs économiques	72
9.4	Études de cas, projets pilotes	72
10.	La géothermie	74
10.1	Description	74
10.2	Applications possibles	74
10.3	Facteurs économiques	76
10.4	Études de cas, projets pilotes	76
11.	L'énergie provenant de la biomasse	78
11.1	Description de la technologie	78
11.2	Applications possibles à la ferme	78
11.3	Aspects économiques	80
11.4	Études de cas, projets pilotes	81
12.	Les biocarburants	82
12.1	Description de la technologie	82
12.2	Utilisations possibles à la ferme	83
12.3	Aspects économiques	85
12.4	Études de cas, projets pilotes	86
13.	L'énergie solaire	88
13.1	Description de la technologie	88
13.2	Applications possibles à la ferme et aspects économiques	88
	Bibliographie	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 Comparaison du coût des équipements de travail du sol requis pour un travail conventionnel et un travail réduit du sol	36
Tableau 5.2 Comparaison de la quantité de carburant utilisée pour le séchage en séchoir conventionnel et pour le séchage en crib	40
Tableau 7.1 Comparaison des différents systèmes d'irrigation sur le plan énergétique	60

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats du deuxième volet du mandat « *Impact du coût de l'énergie sur le secteur agricole et recherche de solutions alternatives durables* » confié par l'UPA au Groupe AGÉCO. Le premier volet du mandat, qui a fait l'objet d'un rapport distinct remis au printemps 2006, a permis de documenter la consommation d'énergie de six des principaux secteurs de l'agriculture québécoise et d'identifier pour chacun de ces secteurs des points critiques de consommation d'énergie. Le second volet du mandat visait à identifier et documenter les technologies permettant d'agir sur ces points critiques de consommation et les sources d'énergie alternatives qui peuvent être utilisées à la ferme pour diminuer l'impact de l'augmentation des coûts de l'énergie sur les exploitations agricoles.

Le rapport se divise en deux parties. La première partie présente, pour chaque point critique de consommation d'énergie identifié dans le premier volet du mandat, les technologies existantes permettant d'améliorer l'efficacité énergétique, lorsque de telles technologies existent. Pour chaque technologie recensée, les informations suivantes sont rapportées lorsque disponibles :

- Une description de la technologie
- Une comparaison avec les technologies couramment utilisées
- Les coûts d'investissement, les coûts d'opération, les coûts évités et la période de récupération sur l'investissement
- Des fermes, sites de démonstration ou projets pilotes existants
- Des références vers des sources d'informations supplémentaires

Pour trouver cette information, de très nombreuses sources de données ont été consultées et de nombreuses personnes ont été contactées. Le lecteur trouvera en bibliographie la liste complète des sources d'information consultées pour chaque secteur de production.

La deuxième partie du rapport présente les sources d'énergie alternatives durables utilisées ou présentant un potentiel d'utilisation en milieu agricole. Pour chaque source d'énergie identifiée les informations suivantes sont présentées :

- La description de la source d'énergie et de sa production
- Les applications actuelles et/ou potentielles à la ferme
- Les avantages/inconvénients découlant de son utilisation
- Les aspects économiques
- Les sites de démonstration, les fermes et/ou les projets pilotes ayant recours à cette source d'énergie

PREMIÈRE PARTIE

LES TECHNOLOGIES PERMETTANT UNE AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE À LA FERME

2. PRODUCTION LAITIÈRE

Le secteur laitier est responsable d'une part significative de la consommation d'énergie du secteur agricole québécois. Il s'agit toutefois d'un secteur de production présentant une utilisation relativement peu intensive des sources d'énergie. Les dépenses en énergie représentent en moyenne autour de 5 % des dépenses d'exploitation d'une ferme laitière.

Les principales utilisations de l'énergie sur les exploitations laitières sont la réfrigération du lait, la ventilation, les pompes à vide du système de lactation, l'éclairage et le chauffage de l'eau. Il s'agit donc principalement d'utilisation d'énergie électrique.

Différentes technologies sont proposées aux exploitants agricoles pour améliorer l'efficacité énergétique des équipements liés à ces différents usages. Les technologies qui seront documentées et analysées dans cette section sont les pré-refroidisseurs à plaques, la récupération de chaleur pour le préchauffage de l'eau, les moteurs à vitesse variable, la ventilation naturelle et l'éclairage éco-énergétique.

2.1 LA RÉFRIGÉRATION DU LAIT À L'AIDE D'UN ÉCHANGEUR À PLAQUES¹

La réfrigération du lait est responsable environ du quart de la consommation totale d'électricité sur une ferme laitière. L'amélioration de l'efficacité du refroidissement pourrait donc permettre des économies significatives. La technologie de refroidissement couramment utilisée sur les fermes est le refroidissement directement dans le réservoir à lait qui reçoit le lait à chaque traite, donc deux fois par jour. Le réservoir réfrigéré reçoit le lait au moment de la traite et doit donc faire passer une grande quantité de liquide d'une température de 36 °C à une température de conservation de 3 °C dans le plus court laps de temps possible afin d'en assurer la meilleure qualité.

a) Description de la technologie

Pour diminuer la charge de refroidissement du réservoir à lait, des systèmes de pré-refroidissement ont été conçus, dont l'échangeur à plaques. L'échangeur à plaques permet de réduire le temps de fonctionnement du compresseur du réservoir de refroidissement du lait et donc la quantité d'énergie nécessaire à la conservation du lait. Il s'agit d'un échangeur de chaleur passif constitué de plaques minces en acier inoxydable, permettant le transfert de chaleur entre le lait et l'eau froide. L'eau froide et le lait passent entre les plaques à contre-courant. L'efficacité de ce type de refroidisseur dépend notamment du débit respectif de chaque fluide. Cet échange du froid/chaleur permet d'abaisser la température du lait de 36 °C (pis de la vache) jusqu'à 16 à 23 °C, pour un écart moyen de

¹ Section rédigée en collaboration avec Hydro-Québec.

16°C. Après son passage dans l'échangeur à plaques, le lait est emmagasiné dans le réservoir à lait pour être ensuite refroidi à température de conservation (autour de 3°C).

La tendance dans le marché de la vente d'équipements est à l'utilisation de modèles dits à "double passes" afin d'accroître le taux d'échange et ce, à condition que le débit de lait à la ferme soit suffisant.

La source d'eau la plus fiable pour opérer un échangeur à plaques est un puits artésien. Toutes autres sources, lacs, rivières, aqueducs peuvent offrir une performance moindre particulièrement en été. Les eaux provenant des puits sont généralement plus froides (à l'exception de puits peu profonds où l'eau risque d'être plus chaude). La température de l'eau peut varier selon les saisons.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

De façon générale, le choix d'un échangeur à plaques sera déterminé par la capacité des unités de réfrigération à supporter la charge de refroidissement au moment de la traite et par la durée de fonctionnement du système de refroidissement lors de la traite. S'il existe un déphasage entre la capacité de refroidissement et la charge de refroidissement (par exemple en raison d'un choix initial de moteur d'une puissance insuffisante ou si la vitesse de traite augmente subitement et, avec elle, le volume de lait chaud arrivant dans le réservoir à lait, etc.), alors l'investissement dans un refroidisseur à plaques peut s'avérer judicieux². Un échangeur à plaques, en réduisant la température du lait avant son entrée dans le réservoir à lait, permet de diminuer le temps de fonctionnement du système (compresseur) de réfrigération du lait de 40 à 55 % et donc, générer des économies d'énergie d'autant.

Dans le contexte québécois, la consommation d'énergie pour le refroidissement du lait peut être estimée à environ 14 Wh par litre de lait produit avec des équipements conventionnels³, ce qui implique une consommation annuelle d'électricité pour le refroidissement du lait d'environ 6300 kWh pour une ferme produisant 4500 hectolitres⁴ (ce qui représente environ 55 vaches en lactation). Ainsi, en retenant une hypothèse d'économie annuelle de 50 kW/vache en lactation (ou ± 45 % d'économie d'électricité) grâce à l'échangeur à plaques, la diminution de consommation d'électricité serait de l'ordre de 2750 kWh par année.

Par rapport à la situation actuelle, plusieurs intervenants remarquent que le refroidissement à plaques n'est pas forcément un investissement prioritaire pour les producteurs : acheter un réservoir à lait d'une plus grande capacité est souvent plus urgent et plus utile qu'un refroidisseur à plaques, qui est parfois considéré comme un système

² Source : Communications personnelles avec Bruno Garon, ITA St-Hyacinthe et Daniel Lamontagne, de Marcel Morissette.

³ Estimé fourni par Hydro-Québec.

⁴ Production laitière moyenne des fermes du Québec d'environ 4500 hl de lait par an (Source : Groupe AGÉCO 2006, Faits Saillants Laitiers 2005).

d'appoint. Cependant, il peut s'agir d'un investissement particulièrement judicieux lorsqu'un producteur investit dans une salle de traite et/ou des équipements qui augmentent la vitesse de traite pour un même troupeau. En effet, un volume plus important de lait à traiter dans un laps de temps plus court, même pour un réservoir à lait de capacité suffisante, génère une hausse de la charge de travail pour le système de refroidissement du réservoir. Un refroidisseur à plaque va en général diviser par deux le temps de fonctionnement du système de réfrigération du lait. Plus que la taille du troupeau, un des facteurs importants dans le choix d'un refroidisseur à plaques est donc la vitesse de la traite.

c) Impacts agronomiques

L'échangeur à plaques permet d'améliorer la qualité du lait parce qu'il raccourcit le temps nécessaire pour amener le lait à sa température de conservation. Ce refroidissement plus rapide du lait permet de limiter la multiplication des bactéries et améliore par conséquent les résultats en termes de comptage cellulaire. De plus, parce qu'il arrive dans le refroidisseur à une température inférieure et que, par conséquent, le temps de refroidissement dans le réservoir est plus court, le lait a moins besoin d'être agité, ce qui a un impact positif sur les molécules de gras. D'autre part, si les installations le permettent, il est également possible de récupérer l'eau réchauffée du circuit de pré-refroidissement afin d'abreuver les veaux et les vaches. Or, la température de l'eau permet d'améliorer les résultats zootechniques.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Le prix d'achat d'un échangeur à plaques varie selon les caractéristiques du produit, notamment:

- La capacité de traitement en litres à l'heure de l'échangeur à plaques;
- Le nombre de plaques et leur taille;
- Les matériaux des composantes⁵.

Bien qu'il soit un peu plus cher, l'échangeur à plaques fabriqué entièrement en acier inoxydable semble un meilleur choix pour des questions de robustesse et de durabilité.

Selon des données américaines, le coût d'installation moyen d'un échangeur à plaques serait de 2600 \$ pour un troupeau en stabulation entravée et de 3400 \$ pour une étable en stabulation libre⁶. Cette différence peut s'expliquer en partie par la différence de taille en faveur des fermes en stabulation libre qui nécessitent des équipements de plus grande taille. D'après les informations obtenues auprès de distributeurs québécois, le coût d'un

⁵ Sur tous les modèles vendus au Québec, les plaques sont en acier inoxydable de type 316, qui offre de très bonnes performances au niveau de la salubrité, de la durabilité et de l'efficacité. Toutefois les différences de matériaux peuvent apparaître au niveau de certaines composantes (châssis, embouts aux extrémités, etc.). Les joints d'étanchéité peuvent être de deux types : collés ou enfichables. Les joints collés peuvent donner lieu à des coûts d'entretien et de réparation supérieurs.

⁶ À un taux de change de 1,13 \$ CAN/1 \$ US. Dans cette étude, la taille moyenne des troupeaux est de 77 vaches en stabulation entravée et de 244 vaches en stabulation libre.

échangeur à plaques se situerait dans une fourchette de 1500 à 6000 \$ selon les modèles⁷. En moyenne, il faut prévoir environ 3 500 \$ pour l'échangeur à plaques et 1 000 \$ pour l'installation (incluant les matériaux). Selon la configuration des bâtiments et l'intérêt du producteur pour cette solution, un investissement supplémentaire allant jusqu'à 3000 \$ pourrait être nécessaire pour le système d'abreuvement alimenté par l'eau de l'échangeur à plaques.

Le seul coût d'opération supplémentaire généré par l'échangeur à plaques est le changement plus fréquent du filtre à lait (quatre fois par jour au lieu de deux habituellement). Avec un système conventionnel, le producteur met un nouveau filtre avant le début de la traite puis le jette avant de procéder au rinçage du lactoduc. Il recommence l'opération à chaque traite et utilise donc deux filtres par jour pour deux traites quotidiennes. Avec un échangeur à plaques, pour éviter que des brins de paille ou autres impuretés ne viennent nuire au fonctionnement de l'échangeur à plaques, il convient de changer à nouveau de filtre après la traite avant de commencer le rinçage. Ceci implique donc d'utiliser deux filtres par traite, soit quatre filtres pour deux traites quotidiennes. Par ailleurs, un calibrage adéquat de la pompe pour le nettoyage du système de traite est nécessaire pour éviter qu'une pression insuffisante ouvre la possibilité de développement de bactéries.

Selon les fermes et les équipements en place, l'achat d'un échangeur à plaques peut impliquer l'ajout d'autres équipements en périphérie :

- une pompe à lait à débit variable au bon dimensionnement (autour de 2 600\$)
- un réservoir d'eau en plastique pour récupérer l'eau utilisée par l'échangeur à plaques. Cette eau chaude pourra alors également servir à abreuver les bêtes (supérieur à 300 gallons / 1350 litres selon les besoins).

Au niveau des différents équipements permettant d'améliorer l'efficacité énergétique, il convient de noter que les échangeurs à plaques peuvent entrer en concurrence avec les récupérateurs de chaleur. En effet, si un récupérateur de chaleur est déjà installé sur le condenseur du réservoir, l'installation d'un échangeur diminuera le temps de fonctionnement du système de refroidissement du réservoir et donc la quantité de chaleur récupérable. Le producteur devra dans ce cas évaluer le compromis à faire entre les différentes options et évaluer la solution la plus adaptée aux caractéristiques de son entreprise.

e) Économies d'énergie et PRI

D'après les calculs effectués sur des fermes de l'État de New York, l'installation d'un échangeur à plaques a permis des économies d'énergie annuelles de l'ordre de 640 \$ en moyenne pour des fermes en stabulation entravée d'une taille moyenne de 77 vaches et de 1400 \$ pour des fermes en stabulation libre d'une taille moyenne de 244 vaches⁸. Les économies d'énergie générées ont permis une récupération de l'investissement en moyenne en un peu plus de 3 ans et demi pour les fermes en stabulation libre et en près de 5 ans

⁷ Communication personnelle avec Mario Gladu, Boumatic et Daniel Lamontagne, de Marcel Morissette.

⁸ Pour une diminution moyenne de la consommation de 6123 kWh et 11 887 kWh respectivement.

pour les fermes en stabulation entravée. On remarque cependant une grande variabilité dans l'échantillon des fermes observées dans l'étude de NYSERDA car la période de récupération de l'investissement s'étendait d'une quinzaine de mois à onze années selon les cas. Les tarifs d'électricité plus élevés qui prévalent dans cet État ont également pour effet de réduire la PRI par rapport au contexte québécois.

Au Québec, en retenant une diminution de la consommation de 2750 kWh pour un troupeau de 55 vaches en lactation et un prix de l'électricité de 0,07 \$/kWh, on obtient une économie annuelle de 192 \$, ce qui permettrait théoriquement de récupérer l'investissement en un peu plus de 20 ans. Toutefois, plus le cheptel est important, plus la période de récupération de l'investissement est courte. Pour un troupeau de taille moyenne, la décision d'installer un échangeur à plaques ne peut ainsi se justifier sur la seule base des économies réalisables puisque la période d'investissement est équivalente à la durée de vie de l'équipement (20 ans). Cette situation pourrait toutefois changer si Hydro-Québec allait de l'avant avec la mise en place d'un programme de remise après achat pour ce type d'équipement dans le cadre de son programme *Produits efficaces - Équipements agricoles*. Par ailleurs, en prenant en compte les impacts de l'accélération du processus de refroidissement sur la qualité du lait que permet l'échangeur à plaques, l'investissement peut devenir intéressant pour certains producteurs possédant un troupeau de taille moyenne.

f) Entreprises, contacts et références

De nombreuses entreprises commercialisent des refroidisseurs à plaques dont De Laval, Mueller, Lely Canada, Westfalia Surge, Boumatic.

2.2 LA RÉCUPÉRATION DE CHALEUR POUR LE CHAUFFAGE DE L'EAU

Le chauffage de l'eau consomme une part significative de l'énergie sur la ferme. L'eau y est réchauffée à l'aide d'électricité ou de gaz propane. Quelle que soit la source d'énergie employée, la température d'entrée de l'eau dans le chauffe-eau a un impact majeur sur le coût du chauffage de l'eau. L'installation d'un système de récupération de chaleur permettant d'utiliser une source de chaleur gratuite et disponible, comme la chaleur du lait qui sort du pis de la vache ou la chaleur générée par un équipement comme le système de réfrigération, ouvre donc la voie à des économies d'énergie potentiellement intéressantes.

a) Description de la technologie

Il existe des systèmes de récupération de chaleur permettant de réutiliser la chaleur générée par le processus de refroidissement du lait. Le lait est refroidi par un système de réfrigération transférant la chaleur d'une source (le lait) vers un puits (eau ou air) par l'intermédiaire d'un gaz réfrigérant. La chaleur de ce gaz réfrigérant est généralement perdue ensuite dans l'atmosphère de la laiterie ou à l'extérieur du bâtiment. Les systèmes avec récupération de chaleur ne changent pas fondamentalement le fonctionnement du système de réfrigération mais permettent de réutiliser la chaleur habituellement perdue.

Le transfert de la chaleur vers un réservoir d'eau est généralement une façon utile de réutiliser cette chaleur car les besoins en eau chaude pour le nettoyage du système de traite et, à un degré moindre, l'abreuvement des animaux nécessitent des quantités importantes d'énergie.

Les systèmes de récupération de chaleur modifient uniquement le type et le cas échéant la combinaison de condenseurs servant à extraire la chaleur du gaz réfrigérant. Il existe différents systèmes de récupération de chaleur, selon qu'ils fonctionnent à l'eau ou qu'ils soient équipés d'un échangeur thermique permettant le passage du fluide frigorigène provenant du groupe froid du réservoir. Souvent, l'échangeur de chaleur permettant de récupérer la chaleur extraite du lait va être raccordé entre le condenseur et le compresseur du groupe froid. L'échangeur de chaleur inclut généralement un ballon d'eau chaude qui va permettre de conserver l'eau chaude ainsi récupérée afin de la retourner plus tard pour différents usages tels que le nettoyage du sol, des équipements de traite, etc. Mentionnons que certains systèmes pourraient toutefois présenter des risques de bris ou de perforation des tuyaux assurant l'échange de chaleur entre le gaz réfrigérant et l'eau, mais qu'il n'a pas été possible de déterminer le niveau de ce risque.

b) Impacts agronomiques

Le récupérateur de chaleur n'a aucun impact sur le plan agronomique.

c) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Les données américaines estiment le coût d'installation du système à 2861 \$ US en moyenne (soit environ 3200 \$ canadiens). Au Québec, ce type d'équipement impliquerait un coût se situant dans une fourchette de 2500 à 4000 \$ selon les modèles, ceci incluant un réservoir d'environ 80 gallons. Le système ne génère pas de coûts d'opération particuliers.

d) Économies d'énergie et PRI

D'après les résultats d'études effectuées dans l'État de New York des États-Unis, les systèmes de récupération de chaleur ont permis d'économiser en moyenne 5800 kWh par an pour une ferme moyenne de 77 vaches, pour une économie de 650 US \$ et une période de récupération de l'investissement de 5 ans. La même économie d'énergie générera au Québec une économie d'environ 400 \$. Selon des calculs effectués par le ministère de l'Agriculture de l'Ontario, une ferme produisant 2000 litres de lait/jour et utilisant un ratio eau chaude/production de lait de 50 % économiserait environ 18 000 kWh annuellement. Au tarif québécois, ceci représente une économie de l'ordre de 1260 \$ par année. La période de récupération de l'investissement est en relation inverse par rapport au volume de lait produit et au ratio eau chaude/lait. Par exemple, toujours selon les calculs effectués pour l'Ontario, pour un élevage de 35 vaches en lactation (produisant 750 litres de lait/jour), la PRI serait d'environ 7 années, contre trois années pour un élevage produisant 2150 litres de lait/jour⁹.

⁹ Source : <http://www.omafra.gov.on.ca/english/livestock/dairy/facts/88-032.htm>.

e) Entreprises, contacts et références
Westfalia

2.3 LA VENTILATION¹⁰

La ventilation est un des trois principaux postes de consommation d'électricité sur les fermes laitières, accaparant près du quart de la consommation totale. En production laitière, il existe de très grands écarts de consommation d'énergie liés à la ventilation. Le choix d'un système de ventilation, qui se fait généralement au moment de construire les bâtiments peut donc avoir un impact significatif sur la consommation d'électricité d'une ferme laitière. Par ailleurs, avant même de considérer la possibilité de changer le système de ventilation, il est important de garder à l'esprit que la mesure la plus efficace pour améliorer l'efficacité énergétique de la ventilation consiste encore à faire un entretien régulier des ventilateurs : l'accumulation de la poussière peut réduire l'efficacité des ventilateurs de 40%...ce qui est très significatif sur la consommation totale d'énergie de votre bâtiment. C'est une mesure simple d'économie d'énergie à intégrer dans les tâches quotidiennes de la ferme et qui n'entraîne pas de coût d'investissement additionnel.

a) Description de la technologie
Il existe différents types de ventilateur pour répondre aux différents besoins sur la ferme :

1. La ventilation naturelle
2. La ventilation mécanique de type HSLV (High Speed Low Volume) à haute vitesse mais générant un bas volume d'air
 - a. Ventilateur de refroidissement (tunnel ou longitudinale) - Grand format de diamètre variant de 36 à 72 pouces
 - b. Ventilateur d'extraction d'air vicié - format de taille petit à moyenne de 8 à 36 pouces
 - c. Ventilateur d'extraction basse pour fosse à lisier (pour l'industrie du porc) - Format de petite taille entre 8 et 14 pouces
3. La ventilation mécanique - LSHV (Low Speed High Volume) à basse vitesse mais dégageant un haut volume d'air - Très grand format pouvant s'étendre jusqu'à 25 pieds
4. Les systèmes d'échangeurs d'air et récupérateur de chaleur

La principale amélioration observable au niveau de la ventilation en production laitière réside dans la transition vers la ventilation tunnel/longitudinale des bâtiments. En effet, la ventilation naturelle, reposant le plus souvent sur des prises d'air latérales, est généralement suffisante pendant l'hiver mais peut s'avérer inadaptée pendant l'été et plus particulièrement pendant les journées chaudes et humides. Dans ces circonstances, la chaleur peut incommoder les vaches, ce qui conduira à une baisse de la production de lait. La ventilation de refroidissement (tunnel) consiste donc, par extraction, à « aller chercher

¹⁰ Section rédigée en collaboration avec Hydro-Québec.

de l'air frais à l'extérieur du bâtiment » et « à déplacer cet air frais dans le sens de la longueur, ce qui procure à l'animal un effet bénéfique de refroidissement éolien par convection » (Naud *et al.*, 2006). Cette pratique consiste à installer des ventilateurs de gros diamètres à une extrémité du bâtiment et à aménager une ou plusieurs prises d'air à l'autre bout de l'étable.

En complémentarité à ces types d'appareils, les ventilateurs d'air viciés ont pour rôle de chasser l'air vicié (par pression négative) vers l'extérieur de façon à éliminer les gaz toxiques ou autres polluants (poussières, résidus divers). Ce faisant, on crée une pression négative à l'intérieur du bâtiment et l'air frais y pénètre par des entrées d'air.

Certaines approches proposent l'utilisation de ventilateurs à vitesse variable. Toutefois, un ventilateur utilisé à bas régime (moins de 60 % du régime nominal) engendre une consommation accrue d'énergie toute la durée de vie de l'équipement, et donc des coûts. Ce choix n'est donc pas optimal sur le plan de l'énergie, bien qu'il puisse répondre à un besoin de débit d'air minimum. Au lieu d'utiliser des ventilateurs à vitesse variable, il pourrait être préférable de disposer dans son bâtiment de ventilateurs de différentes tailles qui seront utilisés par palier à leur capacité maximale (75 à 100% de leur capacité). Les économies d'énergie à l'utilisation seront alors considérables en plus d'assurer la durabilité des équipements et moteurs. L'installation d'un système de contrôle automatisé pour gérer la ventilation par palier permettra de maximiser l'économie d'énergie.

L'efficacité énergétique des ventilateurs se mesure en pied cubes par minute par watt ($\text{pi}^3/\text{min}/\text{W}$ ou CFM/W en anglais). Plus cette valeur est élevée, plus le ventilateur est efficace sur le plan énergétique. Toutefois, pour garantir l'efficacité du système, il faut s'assurer de choisir les ventilateurs qui sont adaptés aux besoins de débit d'air, qui se mesure en pied cubes par minute (pi^3/min ou CFM en anglais). Un ventilateur surdimensionné par rapport aux besoins annulera l'effet positif de son efficacité énergétique supérieure.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Les principales améliorations possibles relèvent du choix de ventilateurs efficaces et de l'utilisation de systèmes d'automatisme afin de démarrer/arrêter/ralentir les ventilateurs au moment approprié. L'efficacité des ventilateurs peut en effet varier d'un rapport de un à deux selon les modèles. Hydro-Québec, dans le cadre de son programme *Produits efficaces- Équipement agricole - Ventilateurs*, pourra subventionner une partie du coût d'achat de ventilateurs qu'elle aura identifiés comme efficaces sur le plan énergétique.

c) Impacts agronomiques

Le principal obstacle à la ventilation naturelle seule est la diminution de la production résultant d'une ventilation insuffisante dans la saison chaude. C'est pourquoi il semble préférable d'adopter un système hybride combinant ventilation naturelle et ventilation mécanique. Le confort des vaches en été s'en trouve amélioré et la production laitière également.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Le coût d'achat de gros ventilateurs à courroie est de l'ordre de 1500 à 2000 \$ l'unité. Les contrôles coûtent environ 900 \$ par groupe de 3 ou 4 ventilateurs (thermostats et relais inclus). Pour ce qui est des entrées d'air, elles peuvent être comptées à \pm 10 \$ du pied carré d'ouverture à pratiquer (Fortier, 2002)¹¹. S'il y a des portes et des fenêtres dans le bout de l'étable, elles peuvent être utilisées comme prises d'air. Différentes solutions sont proposées par des fournisseurs de ventilation au Québec pour la ventilation de grandes étables. Selon Garon *et al.* (2005), les propositions varieraient de 25 000 \$ à 41 500 \$ pour les étables à stabulation entravée et de 17 230 à 32 390 \$ pour les étables en stabulation libre. Dans les deux cas, les propositions incluent non seulement les ventilateurs d'été mais aussi les instruments de contrôle, les ventilateurs d'hiver, les entrées d'air, etc. Le coût d'investissement associé à l'installation d'un système de ventilation efficace varie selon qu'il s'agit d'une nouvelle installation, d'une modification d'une installation déjà en place ou du remplacement d'équipements en fin de vie.

e) Économies d'énergie et PRI

Pour être à même d'effectuer un calcul de rentabilité, la consommation électrique du système de ventilation existant doit être calculée. Tel que mentionné, cette consommation varie énormément d'une entreprise à l'autre¹². La période de récupération de l'investissement dépend également des économies d'énergie réalisées et doit être évaluée au cas par cas, selon les installations déjà en place et les caractéristiques du bâtiment. De plus, pour calculer la rentabilité de l'investissement, les gains potentiels en productivité des vaches peuvent être pris en considération en plus du gain en efficacité énergétique, selon la problématique rencontrée. Par ailleurs, pour certaines fermes fonctionnant avec un système de ventilation naturelle, la ventilation tunnel peut représenter une augmentation du coût de l'énergie puisque l'objectif sera d'améliorer le bien-être des animaux (et donc leur productivité) plutôt que de diminuer la facture énergétique.

Les économies d'énergie générées par le remplacement d'un ventilateur standard par un ventilateur efficace varient entre 20 et 25%. Les installations par pallier bien optimisée peuvent générer des économies encore supérieures.

L'écart de prix d'achat entre les modèles standard et efficace n'est pas toujours important, et dans certains cas, peut être nulle. Le coût à l'achat plus élevé peut être par ailleurs compensé par la durée de vie accrue des nouveaux ventilateurs efficaces (15 ans au lieu de 10 ans) et par leur efficacité énergétique récurrente à chaque année d'utilisation.

f) Entreprises, contacts et références

L'Université de l'Illinois effectue des tests d'équipements de ventilation. Les résultats sont disponibles à l'adresse : <http://www.bess.uiuc.edu/search.asp>.

¹¹ Source : http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/chaudiereappalaches/journalvisionagricole/2002Juin/0206_4.htm

¹² Hydro-Québec a effectué certains calculs sur les économies d'énergie reliées à l'emploi de ventilateurs efficaces. Toutefois, il n'a pas été possible d'obtenir ces données à ce jour.

2.4 LES POMPES À VIDE DU SYSTÈME DE LACTATION

Le fonctionnement du système de lactation est responsable de près du quart de la consommation d'énergie électrique d'une ferme laitière. Cette consommation d'énergie s'explique essentiellement par le fonctionnement des pompes à vide permettant d'extraire le lait et de l'acheminer jusque dans le réservoir à l'air le long de la ligne à lait. Avec le progrès technologique, sont apparues des pompes à vide à vitesse variable, plus efficaces sur le plan énergétique.

a) Description de la technologie

L'utilisation d'une pompe à vitesse variable permet d'ajuster la vitesse du moteur du système de lactation. Le principe consiste à maintenir un niveau d'aspiration constant, selon le besoin de retrait d'air, en jouant directement sur la vitesse de la pompe à vide. Dans une pompe à vide conventionnelle, l'admission d'air dans le système par un régulateur de vide permet l'ajustement de la quantité d'air nécessaire au fonctionnement du système de traite à chaque instant¹³ mais le moteur de la pompe tourne à une vitesse constante. Avec une pompe à vide conventionnelle, le moteur est donc généralement sollicité à une puissance supérieure aux besoins réels. Un régulateur de vitesse permet au moteur électrique de fonctionner à un régime adapté et donc de réduire globalement la consommation d'énergie. L'utilisation d'une pompe à vitesse variable permet aussi de rallonger la durée de vie du moteur car un moteur fonctionnant à haut régime s'use plus vite qu'un moteur fonctionnant plus lentement¹⁴.

b) Impacts agronomiques

Si des problèmes de tensions parasites ont parfois été notés avec les premiers modèles, il semble que ces problèmes aient été résolus avec les modèles plus récents de pompes à vitesse variable. D'après les informations recueillies, il n'y a pas d'autres impacts agronomiques.

c) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Selon les données de NYSERDA (2003), l'installation de système à vitesse variable permet de réduire en moyenne la consommation d'électricité d'un tiers pour les pompes à vide. Selon le *Dairy Farm management Guide*, la réduction de consommation d'électricité peut aller jusqu'à 60 %. Selon les résultats d'essais effectués sur quatre fermes comportant entre 185 et 430 vaches (Sanford 2004), la diminution de consommation d'électricité varierait entre 43 % à 68 %. On remarque que les gains se font plutôt durant la période de traite où les besoins en vacuum peuvent varier alors que pendant la période de lavage, le moteur est généralement sollicité au maximum de sa capacité, avec une pompe conventionnelle aussi bien qu'avec une pompe à vitesse variable. D'après les expériences menées à la ferme expérimentale de l'ITA de St-Hyacinthe, la pompe à vitesse variable testée a permis une réduction de consommation d'électricité de l'ordre de 65 %.

¹³ Source : www.focusonenergy.com.

¹⁴ Source : www.wisconsinpublicservice.com/farm.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Si l'on compare avec une pompe conventionnelle, l'installation d'un variateur de vitesse entraînerait un coût supplémentaire d'environ 4000 à 5000 \$, ce qui est un ordre de grandeur comparable à celui observé dans NYSERDA (2003). Dans ce dernier cas, le coût d'achat et d'installation a été en moyenne de 3600 \$ pour les fermes en stabulation entravée et de 4100 \$ pour les fermes en stabulation libre (NYSERDA 2003). Au niveau de la diffusion de la technologie, les pompes à vitesse variable représenteraient jusqu'à 75 % des nouvelles ventes, pour certains distributeurs.

Ce type d'investissement est plus vite rentabilisé sur des fermes de grande taille que sur des petites exploitations car la durée de la traite et donc de l'utilisation des pompes est plus courte sur les petites exploitations. Les pompes à vitesse variable n'entraînent pas de coûts d'opération supplémentaires mais la formation et la qualification des vendeurs installateurs sont importantes (bon réglage au départ). Certains modèles de pompes à régulateur de vitesse fonctionnent sans huile à l'intérieur du module, ce qui réduit les coûts de maintenance et évite d'avoir à gérer les huiles usées.

e) Économies d'énergie et PRI

D'après l'expérience menée à la ferme Maskita de l'ITA Campus Saint-Hyacinthe, la facture d'électricité passerait d'environ 580 \$ par année avec la pompe existante à un peu plus de 200 \$ avec une pompe à vitesse variable, pour deux traites d'une durée d'une heure 40 minutes chacune, soit une économie d'environ 375 \$ (environ 5500 kWh à 6,8 ¢/kWh) par année pour un troupeau de 42 vaches. En considérant un investissement de 4000 \$ à 5000 \$, ceci donne un PRI de 11 à 13 ans. Dans l'étude du NYSERDA, la PRI moyenne se situait entre 4,5 et 5 ans, variant d'un minimum de 7 mois à un maximum de 10 ans, selon les fermes. Cette PRI plus courte s'explique par les tarifs d'électricité plus élevés qu'au Québec et par le temps de traite plus long étant donné la plus grande taille des troupeaux. Ainsi, comme mentionné, la PRI diminue avec la taille du troupeau et doit être évaluée selon les caractéristiques spécifiques de la ferme.

f) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

Ferme Pellerat (Jean-Guy Pelletier à St-Roch-des-Aulnaies)

Ferme de l'ITA St-Hyacinthe

2.5 L'ÉCLAIRAGE EFFICACE

Étant donné l'importance des dépenses en éclairage dans une ferme laitière, il convient de s'intéresser à certaines technologies permettant de réduire ces dépenses tout en garantissant un maintien de la productivité des vaches. En effet, des recherches indiquent qu'un éclairage de 108 à 215 lux durant une période de 16 à 18 heures suivi d'une période de noirceur de 6 à 8 heures entraîne un accroissement de la production de lait de 5 à 16 % (comparativement à 13,5 heures d'éclairage et moins/jour). Ainsi, plutôt que de « moins éclairer », il semble donc judicieux de « mieux éclairer ».

a) Description de la technologie

Les technologies présentant le plus fort potentiel sont les lampes à halogénures métalliques et les lampes fluorescentes. Ces dernières ont une longévité largement supérieure aux lampes incandescentes utilisées habituellement (10 000 à 20 000 heures contre 750 à 2000 heures). Les lampes incandescentes sont également moins efficaces que les lampes fluorescentes (15 à 20 lumen/watt contre 50 à 80) (Fortier, 2005; Dussault et Naud, 2005). Lors du remplacement de lampes incandescentes par des lampes au mercure ou des lampes fluorescentes, le producteur doit garder à l'esprit l'importance de bien calibrer son installation par rapport aux « besoins » de son troupeau. Le type d'éclairage efficace peut dépendre de la hauteur des bâtiments et de sa configuration (stabulation libre ou entravée, hauteur et forme du toit), de certains paramètres de régie comme le nettoyage des bâtiments, etc. (Fortier et al., 2005). Ainsi, des lampes à halogénures métalliques peuvent être particulièrement intéressantes pour des élevages en stabulation libre situés dans un bâtiment avec un plafond haut. Dans certains cas, des équipements étanches peuvent être souhaitables, bien que plus dispendieux à l'achat. Comme pour toute autre équipement, il faut tenir compte des conditions d'utilisation (poussière, humidité, acidité, variations de température) dans le choix des équipements d'éclairage. Des informations sur les meilleurs choix d'équipement sont disponibles sur le site Internet du programme d'Hydro-Québec *Produits efficaces - Équipement agricole*¹⁵. Dans le cadre de ce programme, Hydro-Québec offre des remises après achat sur certains produits.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Dans l'échantillon de fermes étudiées dans l'État de New York (NYSERDA, 2003), un éclairage plus efficace (par exemple un éclairage fluorescent) a permis de réduire la consommation d'électricité d'environ 3500 kWh par an par ferme. Selon OMAFRA (2006), la réduction de la consommation d'énergie pour l'éclairage serait de l'ordre de 75 % avec un éclairage efficace.

c) Impacts agronomiques

Une luminosité adéquate favorise de bons rendements et un éclairage performant permet donc d'améliorer aussi la production laitière.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Dans les fermes ayant participé au programme d'audit énergétique dans l'État de New York, l'installation d'un système d'éclairage efficace nécessitait en moyenne un investissement de l'ordre de 1600 \$ (estimation d'après NYSERDA, 2003). Cependant, le coût des équipements d'éclairage est variable selon la dimension des bâtiments et selon qu'il s'agisse d'un nouveau bâtiment ou de modifications à un bâtiment existant. Dans certains cas, il sera possible de remplacer des lampes à incandescence par des lampes fluorescentes sans installer de fils supplémentaires ou faire des modifications importantes. Un ordre de grandeur des coûts d'installation d'un nouveau système d'éclairage par un électricien est de 4000 à 10 000 \$, incluant la main d'œuvre et les équipements. Bien que le coût unitaire des équipements plus efficaces soit généralement plus élevé que celui des

¹⁵ À l'adresse : <http://www.hydroquebec.com/produitsefficaces>.

équipements conventionnels, la facture finale pour les deux types d'équipements peut être relativement proche. En effet, un nombre moins important d'unités d'éclairage est nécessaire avec les équipements plus efficaces d'une part et, d'autre part, certains programmes subventionnent l'achat de tels équipements (exemple : programme de remboursement partiel par Hydro-Québec). Les équipements d'éclairage plus efficaces n'engendrent pas de coûts d'opération supplémentaires. On note par ailleurs que leur plus grande durée de vie implique des changements moins fréquents.

e) Économie d'énergie et PRI

D'après les données de NYSERDA (2003), l'économie d'énergie liée à l'emploi d'éclairage efficace serait de l'ordre de 400 \$ par an. Pour les étables existantes, le remplacement de lampes incandescentes par des lampes fluorescentes compactes de 26 à 42 watt peut diviser par 2,5 à 4 les besoins en énergie (Fortier *et al.*, 2005). Selon Hydro-Québec, la PRI est de trois à cinq ans pour les éclairages fluorescents T8 et de un à trois ans pour les fluorescents compacts. Selon OMAFRA (2006), ce type d'équipement peut être rentabilisé dans une période d'environ quatre ans. D'après NYSERDA (2003), la PRI moyenne se situe entre quatre et cinq ans pour ce type d'équipement.

3. PRODUCTION PORCINE

Le secteur porcin fait une utilisation relativement peu intensive et très diversifiée de l'énergie, qui compte pour approximativement 3 % des dépenses d'exploitation. Toutefois, certains postes de consommation d'énergie accaparent une part importante des coûts totaux en énergie et méritent qu'on s'y attarde pour explorer les possibilités d'économie que l'utilisation d'équipements plus efficaces pourrait permettre de générer. Les points critiques de consommation d'énergie identifiés au premier volet de l'étude pour le secteur porcine sont le chauffage localisé des porcelets, le chauffage des espaces, la ventilation et l'épandage et le traitement des déjections. Certaines technologies visant ces points de consommation sont offertes sur le marché telles que les tapis chauffants, les murs solaires et les échangeurs de chaleur.

3.1 LE CHAUFFAGE LOCALISÉ DES PORCELETS : LES TAPIS CHAUFFANTS

a) Description de la technologie

Le tapis ou matelas chauffant est utilisé dans les maternités et pouponnières porcines et sert à réchauffer la partie du plancher de la cage de mise bas réservée aux porcelets. Le tapis chauffant est un tapis matelassé souple ou rigide, de forme rectangulaire, fabriqué de matériaux de composites (plastique renforcé de fibre de verre, polyéthylène) et dotés d'éléments chauffants. Ce type d'équipement est généralement combiné à un thermostat qui permet de régler la température souhaitée. Ce dispositif permet de régler le chauffage des porcelets de façon adaptée à leur croissance (diminution progressive de la chaleur des tapis), sans incommoder la truie par une température trop élevée.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Sur le plan de la consommation d'énergie, les tapis chauffants sont plus performants que les lampes infrarouges puisqu'ils sont moins énergivores. La puissance nominale requise pour un tapis chauffant équipant une cage double de mise bas est de 120 watts contre deux lampes infrarouge de 175 watts. D'après des tests effectués par Manitoba Hydro, le tapis chauffant consommerait jusqu'à 65 % moins d'énergie qu'une lampe pour une durée d'utilisation équivalente. En effet, la consommation quotidienne d'électricité d'une maternité de 42 cages de mise bas doubles est passée de 353 kWh avec des lampes infrarouges à 121 kWh avec des tapis chauffants. Par ailleurs, parce qu'un tapis chauffant exige le tiers de la puissance d'une lampe, son utilisation permet de réduire la puissance installée et, potentiellement, l'appel de puissance maximal de la ferme¹⁶.

¹⁶ Les entreprises agricoles qui consomment des volumes importants d'électricité sont facturées pour l'énergie consommée (kWh) et pour la puissance appelée (kW) lorsque la puissance installée, c'est-à-dire la puissance totale de tous les équipements reliés à l'entrée électrique, dépasse le seuil de 50 kW.

c) Impacts agronomiques

Contrairement aux lampes infrarouges, les tapis chauffants ne contribuent pas à réchauffer l'air ambiant. Ceci évite donc de générer de l'inconfort pour les truies qui réduirait l'allaitement des porcelets et entraînerait donc un sevrage à un poids plus léger. En effet, la température optimale pour le confort de la truie se situe à environ 68°C alors qu'elle est de 80°C pour les porcelets. Le tapis chauffant réduit également les risques de piétinement et d'étouffement des porcelets puisque ceux-ci bénéficient d'une plus grande superficie de confort et ne sont pas obligés de s'agglutiner en dessous de la source de chaleur (la lampe infrarouge) ou près de la truie¹⁷.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

D'après Hydro-Québec, le coût d'investissement est moindre avec les tapis chauffants qu'avec les lampes infrarouges. Pour une loge double, le coût du tapis chauffant (tapis seulement) est estimé entre 250 et 325 \$ contre 560 \$ pour les lampes infrarouges (lampes, abat-jour et tapis amovibles). Alors que les lampes infrarouges doivent être changées périodiquement (après 8 à 9 mois d'utilisation), le tapis chauffant a une durée de vie d'environ 15 ans. Basé sur ces paramètres, l'économie annuelle est estimée à 15,66 \$ par loge double. Le tapis chauffant est d'un entretien très simple et ne présente pas de coûts d'opération autres que les coûts en électricité. Le tapis chauffant peut également être utilisé en combinaison avec une lampe infrarouge d'une puissance de 100 watts (au lieu des 400 watts habituels) pour les premières 24 heures de vie des porcelets.

e) Économies d'énergie et PRI

Selon Hydro-Québec, l'économie générée par l'utilisation de tapis chauffants par rapport à des lampes infrarouges est de 16 \$/jour pour 42 cages de mise bas doubles. Ceci représente une économie de 4750 \$ pour une période de 300 jours. Toujours selon les données d'Hydro-Québec, la période de récupération interne pour l'équipement d'une pouponnière en tapis chauffants serait de 1,42 an et ce sans compter sur les remises offertes par Hydro-Québec dans le cadre de son programme produits efficaces Équipements agricole - Tapis chauffants.

f) Entreprises, contacts et références

Des tapis chauffants sont utilisés sur plusieurs fermes dont la maternité et la pouponnière de Nutrinor à Héberville.

Les entreprises IEL et le réseau Coop sont des distributeurs de ce type d'équipement. À l'heure actuelle trois fournisseurs sont autorisés pour le programme Produits efficaces d'Hydro-Québec soit Équipements G.D.L. Ltée (St-Bernanrd de Beauce), Équipements Modernes St-Félix (C.S.A. Uniferme à St-Félix de Vallois) et Plante Agri-concept inc (St-Henri de Lévis)¹⁸.

¹⁷ Manitoba Hydro. Heat Pad Update, Research for better hog production, Automne 2002.

¹⁸ <http://www.hydroquebec.com/produitsefficaces/agricole/tapis/index.html>

3.2 LE CHAUFFAGE DES ESPACES ET LA VENTILATION : LE MUR SOLAIRE

En production porcine, le système ventilation/chauffage est un élément très important pour la régie du troupeau. S'il sert d'abord et avant tout à contrôler la température à l'intérieur des bâtiments, il joue également un rôle important dans le maintien de la qualité de l'air intérieur. Enfin, il s'agit du principal poste de consommation d'énergie d'une ferme porcine.

La grande majorité des mesures permettant d'améliorer les performances énergétiques de la ventilation sont de nature comportementale ou du moins réfèrent à une amélioration des pratiques conventionnelles de ventilation telles que le bon dimensionnement des ventilateurs (en fonction de l'espace à ventiler, de la régie d'élevage, etc.), un bon entretien des ventilateurs (garder les ventilateurs propres permet de maintenir leur niveau de performance), une isolation adéquate, un meilleur contrôle du débit minimum des ventilateurs, un meilleur contrôle de la teneur en humidité, une diminution de la température de consigne, etc. Ainsi, il n'y a pas à proprement dit de nouvelles technologies permettant une amélioration notable des performances énergétiques de la ventilation. La modification des pratiques comportementales semble donc la voie à privilégier pour améliorer l'efficacité énergétique en ventilation (un des exemples les plus évidents étant la diminution de quelques degrés de la température de consigne, nombre d'élevages étant encore « surchauffés » par rapport à ce qui serait vraiment nécessaire¹⁹.

Dans un second temps, il existe de nouvelles technologies telles que les murs solaires ou de nouveaux systèmes comme la ventilation centralisée, des exemples de celle-ci pouvant être trouvés en France notamment. La justification de tels systèmes repose à la fois sur des considérations énergétiques (diminution du coût) et des éléments agronomiques et environnementaux (meilleure qualité de l'air donc augmentation du bien-être et de la santé des animaux).

Au Québec, on trouve de plus en plus d'utilisateurs des murs solaires. Cette technologie a d'ailleurs fait l'objet d'une évaluation par le Centre de développement du porc du Québec (CDPQ) à la ferme Marisol, une pouponnière porcine située à St-Sylvestre-de-Beaurivage.

a) Description de la technologie

Dans les situations où l'apport d'air neuf et de chauffage est nécessaire comme en production porcine par exemple, un **mur solaire** peut contribuer à réduire de façon significative les dépenses en énergie. Au Québec, la technologie *Solarwall* a été adoptée par un nombre croissant de producteurs. Cette technologie utilise l'énergie solaire en combinant l'effet de la convection et du rayonnement solaire sur une tôle noire perforée qui permet de préchauffer l'air (système actif) qui entre dans le bâtiment d'élevage. 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 :

- la tôle noire perforée est chauffée par la radiation solaire;

¹⁹ S. Lemay, IRDA, communication personnelle.

- 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 plenum vers un corridor de préchauffage situé dans l'entre toit du bâtiment et ensuite est distribué dans les chambres d'élevage (Guimont *et al.*, 2004).

L'énergie captée par le mur solaire est la lumière du soleil et non la chaleur. Ainsi, il peut générer autant d'énergie en hiver qu'en été (pour une même durée d'ensoleillement) en autant que l'orientation du mur soit adéquate (orienté vers le haut en été et vers le sud en hiver, sur un mur ou sur une structure légèrement incliné). L'effet chauffant du mur solaire peut être complètement arrêté en été; il ne contribue donc pas à augmenter la température intérieure des bâtiments à un moment où cela ne serait pas souhaitable.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

D'après les résultats observés dans une pouponnière de 1000 places, l'utilisation d'un mur solaire a fourni une chaleur équivalente à 900 à 1400 litres de propane de novembre à avril, soit de 20 à 30 % du propane habituellement consommé (Guimont *et al.*, 2004). L'économie maximale d'énergie survient dans les périodes les plus froides. Ainsi, cette technologie offre un potentiel d'économie d'énergie plus important dans les climats plus froids car la différence entre la température extérieure et la température souhaitée à l'intérieur du bâtiment est plus importante. D'après un promoteur, les murs solaires actuellement installés dans les pouponnières généreraient une économie d'énergie entre 20 % et 50 % selon les cas.

c) Impacts agronomiques

Outre l'aspect économie d'énergie, il semble que le mur solaire permette de maintenir une meilleure qualité de l'air ambiant dans les bâtiments, ce qui contribue à minimiser les risques de maladies et de mortalité et ainsi d'améliorer les rendements de la production. En effet, en période de grand froid, la ventilation des bâtiments est souvent réduite au minimum afin de limiter les coûts de chauffage, ce qui a un impact négatif sur la qualité de l'air pour les animaux et peut affecter les performances zootechniques. Le mur solaire permet de faire entrer de l'air plus chaud dans les bâtiments et donc de maintenir un niveau convenable de ventilation sans générer un surcoût au niveau du chauffage. Une étude visant à évaluer l'impact agronomique relié à l'amélioration de la qualité de l'air découlant de l'utilisation d'un mur solaire est actuellement en cours de réalisation dans le secteur avicole.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Le coût d'acquisition d'un mur solaire dépend en partie de la situation du producteur : s'il s'agit d'un nouveau bâtiment, le coût du mur solaire est intégré dans le coût de construction du bâtiment et il ne semble pas y avoir de surcoût par rapport à un bâtiment

conventionnel. Dans les cas où il s'agit d'intégrer un mur solaire à un bâtiment existant, l'investissement est variable selon les cas. Pour la tôle uniquement, le coût d'achat est de l'ordre de 10 à 11 \$/pi². Un ordre de grandeur des coûts d'équipement et d'installation est d'environ 10 000 \$ pour une pouponnière conventionnelle de 1000 places. Ce coût peut être réduit de façon importante par des subventions de différentes institutions (Gaz Métro, Ressources naturelles Canada, etc.). La durée de vie de ce type d'équipement serait d'environ 25 ans. Les panneaux solaires ne demandent pas d'entretien particulier et peuvent même entraîner une diminution des frais d'entretien du système d'entrée d'air puisque le mur solaire agit comme filtre et limite l'entrée de poussières et autres débris dans le système de circulation d'air.

e) Économies d'énergie et PRI

Selon les estimations de *Solag*, un mur solaire peut générer des économies de l'ordre de 2500 \$ par année. D'après les expériences de différents producteurs, l'investissement dans un mur solaire peut être rentabilisé dans une période de deux à trois ans en prenant en compte les subventions éventuelles, ou de quatre à cinq ans sans subventions.

f) Entreprises, contacts et références

Énerconcept, CDPQ (Henri Guimont, Réjean Leblanc),
Solag (Réal Savaria), www.solag.net
<http://www.enerconcept.com/cgi-ole/cs.waframe.singlepageindex>

g) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

Ferme Marisol (St-Sylvestre-de-Beaurivage)
Ferme Memo (Durham-Sud)
Ferme l'Entrecôte (Wickham)

3.3 LE CHAUFFAGE DES ESPACES ET LA VENTILATION : LE RÉCUPÉRATEUR DE CHALEUR

a) Description de la technologie

Les échangeurs d'air avec récupération de chaleur permettent de réduire la consommation d'énergie l'hiver. Le principe consiste à mettre en contact les conduites d'entrée et de sortie d'air afin de préchauffer l'air froid entrant par l'air chaud évacué (Bourgeois 2005). Outre le chauffage de l'air entrant, le système permet aussi une déshumidification de l'air, ce qui améliore le bien-être des animaux.

b) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Le coût unitaire d'un échangeur d'air est d'environ 5000 \$, ce qui inclut les accessoires. Ce coût peut être moindre si le producteur dispose déjà des équipements de ventilation. Les coûts d'opération correspondent aux coûts de fonctionnement des ventilateurs nécessaires pour faire circuler l'air dans le conduit.

c) Économies d'énergie et PRI

Deux études de cas ont été réalisées par l'IRDA soit une dans un élevage de porcs sur litière et un second dans un poulailler également sur litière. Dans le premier cas, les économies d'énergie associées à l'utilisation du récupérateur de chaleur ont été estimées à 1352 \$ pour une année, une réduction de tout près de 75 %. Si l'on ne tient compte que des économies en chauffage, ceci donne une période de récupération de l'investissement d'un peu plus de 8 ans. Ces résultats ne peuvent toutefois être transposés à un élevage conventionnel.

Au coût actuel de l'énergie, le coût d'acquisition d'un tel équipement ne permet pas de rentabiliser l'investissement à l'intérieur d'une période de dix ans. Toutefois, dans certains cas particulier comme l'élevage sur litière, le récupérateur de chaleur peut permettre de régler des problèmes d'humidité et d'économiser jusqu'à 50 % des frais de chauffage liés principalement à la lutte contre l'humidité. Ainsi, cette technologie s'adresse davantage à des problématiques particulières.

d) Entreprises, contacts et références

Daniel-Yves Martin, IRDA-Polymair

e) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

L'utilisation de récupérateurs de chaleur et d'échangeurs d'air dans une étable laitière et dans une porcherie à la ferme MG Lévesque, à l'Ange-Gardien, est décrite dans un article de l'UtiliTerre de novembre 2005 (Bourgeois 2005). Certains des échangeurs d'air utilisés sur cette exploitation ont été installés par la compagnie Del-Air.

3.4 L'ÉPANDAGE ET LE TRAITEMENT DES LISIERS

L'épandage du lisier est un poste de coût qui tend à croître sur les entreprises porcines depuis les dernières années. Le resserrement des contraintes environnementales et l'augmentation de la densité animale par unité de surface ont pour effet de faire augmenter les superficies nécessaires à l'épandage du lisier et à augmenter les distances entre les lieux d'entreposage des lisiers et les lieux d'épandage. Bien qu'il existe des études comparant l'énergie consommée par les différents types d'équipement d'épandage, il reste que la façon la plus simple de diminuer ces coûts est de réduire la quantité de lisier à épandre.

a) Description de la technologie

Les performances de différents équipements d'épandage ont été analysées dans une étude réalisée en 2004 (Vincent et Flibotte 2004). Les différentes technologies observées étaient :

- Les citernes à aéro-aspersion basse (interdites depuis le 1^{er} avril 2005)

- Les rampes d'épandage
- L'irrigation

Notons aussi qu'il existe un large éventail de technologies permettant de réduire la quantité de lisier à épandre ou du moins la teneur en phosphore de ce lisier, ce qui permet aussi d'augmenter la quantité de lisier qu'il est possible d'épandre sur une parcelle donnée et donc de réduire la consommation de carburant liée au transport du lisier. Parmi ces technologies, il existe différentes techniques de biodigestion, de séparation et de compostage. Certaines de ces technologies figurent dans un rapport d'évaluation réalisé pour la FPPQ (2005). Les différentes technologies se distinguent par exemple selon que les sous-produits issus du traitement peuvent être entièrement utilisés à la ferme ou rejetés dans l'environnement sans impacts négatifs majeurs (traitement complet) ou qu'une partie de ces sous-produits doivent être traités dans un centre de traitement de déchets. En raison de leur coût relativement élevé, on note cependant que la plupart de ces technologies s'appliquent plus particulièrement pour des exploitations de taille importante et connaissant des problèmes de surplus de phosphore.

Pour l'épandage, les différents modèles peuvent être distingués notamment par le diamètre des tuyaux et la largeur de la rampe. Des tuyaux plus gros (par exemple 6 pouces) sont plus recommandés pour les producteurs élevant à la fois des bovins laitiers et des porcs car le lisier de vache peut être trop épais et boucher des conduits trop petits. Pour des producteurs de porcs uniquement, une rampe avec des tuyaux plus petits (ex. 3 po.) peut suffire.

Les systèmes d'irrigation consistent à relier directement une rampe installée sur le tracteur à la fosse à lisier par un tuyau et à envoyer le lisier par une pompe. Ce système implique cependant des coûts de main d'œuvre importants en raison du temps nécessaire pour la mise en place des tuyaux. D'après Vincent et Flibotte (2004), les systèmes d'irrigation sont plus efficaces lorsque le site d'épandage est relativement proche de la fosse à lisier (moins de deux kilomètres). Au-delà d'une telle distance, il devient nécessaire d'investir dans un réservoir mobile et l'épandage par système d'irrigation perd de son intérêt économique.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement (efficacité énergétique)

D'après les données de Vincent et Flibotte (2004), les rampes permettent d'épandre légèrement plus de lisier par voyage que les systèmes à aéro-aspersion basse²⁰ (environ 21 m³ par voyage pour les unes contre 18 m³ par voyage pour les autres), ce qui tendrait à montrer une consommation moindre de carburant pour une même quantité épandue. Cependant, la vitesse d'épandage était supérieure avec les systèmes à aéro-aspersion basse par rapport aux rampes (3,2 voyages/heure contre 2,6).

Les chantiers d'épandage utilisant un système d'irrigation observés dans l'étude de Vincent et Flibotte (2004) avaient une vitesse moyenne d'épandage de 134 m³ par heure contre 58 m³ par heure avec l'aéro-aspersion basse et 55 m³ par heure avec une rampe.

²⁰ Bien que cette méthode d'épandage soit interdite dorénavant au Québec, les données de comparaison tirées de l'étude de Vincent et Flibotte sont présentées à titre informatif.

Un moyen simple de réduire les coûts de carburant réside aussi dans l'organisation de l'épandage, par exemple en minimisant la longueur du trajet, en ayant un chemin le plus praticable possible, etc. Une citerne de plus grande capacité peut diminuer les coûts en carburant mais elle peut aussi augmenter le risque de compaction du sol.

c) Coûts d'investissement

Le coût d'acquisition d'une rampe d'épandage est d'environ 12 000 \$. Le MAPAQ a réalisé une fiche d'information sur la transformation d'un système à aéro-aspersion en un dispositif avec rampe pour environ 2500 \$. Cependant, ce système « ne permet pas d'épandre sur une largeur supérieure à deux fois la largeur de l'épandeur », ce qui augmente donc le nombre de passages dans le champ et la consommation de carburant.

d) Coûts d'opération

Dans l'étude de Vincent et Flibotte (2004), le coût de l'épandage par m^3 était respectivement de 3,70 \$, 4,26 \$ et 2,28 \$ pour les systèmes à aéro-aspersion basse, les rampes et les systèmes d'irrigation, ceci incluait les frais fixes et les frais variables et tenait compte des opérations de chargement du fumier, du transport et de l'épandage. Les systèmes d'irrigation semblent donc plus performants d'un point de vue économique mais nécessitent une configuration particulière des champs et ceci constitue une des limites au développement de ce type de système au Québec. De plus, cela implique un temps d'installation relativement important.

La rentabilité des différents équipements d'épandage ou de traitement de lisier dépend aussi de facteurs tels que la distance à parcourir pour épandre et la disponibilité ou non des terres pour épandre. D'après Gingras *et al.* (2000), la gestion standard des lisiers avec épandage dans le champ reste plus économique tant que le producteur est propriétaire des terres et que celles-ci sont situées à moins de 30 km de la ferme. D'après ces auteurs, le coût de la gestion des lisiers serait d'environ 3,30 \$/ m^3 lorsque les terres d'épandage sont situées aux abords de la fosse à lisier mais augmenterait à environ 8,30 \$/ m^3 lorsque les terres sont à 30 km de l'exploitation. Avec une gestion par traitement complet (biodigestion ou séparation mécanique par exemple), le coût passerait d'environ 10,50 \$/ m^3 si les champs d'épandage sont à proximité de la fosse à lisier à près de 11,80 \$/ m^3 si elles sont à 30 km.

Rappelons que différents organismes ont mené ou mènent actuellement des études afin de comparer ou développer différentes solutions pour le traitement et l'épandage du lisier, dont le CDPQ, la FPPQ, les clubs-conseils, etc.

e) Entreprises, contacts et références

Mario Vincent et Sébastien Flibotte (Club Agrinove)
Équipement Dallaire

f) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

Des démonstrations à la ferme d'équipements sont régulièrement organisées par des clubs conseil en agroenvironnement.

3.4.1 TRÉMIES-ABREUVOIR ET BOLS ÉCONOMISEURS²¹

Bien qu'il existe des études comparant l'énergie consommée par les différents types d'équipement d'épandage, il reste que la façon la plus simple de diminuer ces coûts est de réduire la quantité de lisier à épandre.

Dans une porcherie, le gaspillage d'eau survient surtout lors de la distribution de l'eau aux porcs. Il est fait mention, dans une fiche produite dans le cadre des interventions agroenvironnementales de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ) « Trémies-abreuvoirs et bols économiseurs », que l'usage de trémies-abreuvoirs ou de bols économiseurs d'eau comparativement aux tétines, permettra de :

- réduire de 35 % le volume de lisier produit dans le bâtiment comparativement aux tétines;
- baisser les besoins d'entreposage d'environ 25 % en engrangement et de 28 % en pouponnière.

a) Description de la technologie

Une trémie-abreuvoir permet la distribution à volonté de l'eau et de l'aliment solide dans le même équipement. Quant à la trémie sèche, cette dernière est utilisée seulement pour distribuer l'aliment solide. Avec ce type d'équipement, la distribution de l'eau se fait par un équipement indépendant soit, un bol économiseur. La trémie-abreuvoir et le bol économiseur permettent de réduire le gaspillage de l'eau.

b) Impacts agronomiques

Les trémies-abreuvoirs et les bols économiseurs d'eau, comparativement aux tétines, permettent une réduction importante de la quantité d'eau utilisée pour abreuver les porcs.

c) Coûts d'investissement et d'opération

D'après la fiche technique provenant de la FPPQ et un rapport provenant du CDPQ²², les coûts associés à l'installation de trémies-abreuvoir et bols économiseurs peuvent varier de 10 \$/place à 16,10 \$/place (engraissement).

²¹ Cette section a été rédigée en collaboration avec Isabelle Bouffard et Raymond Leblanc.

²² « Abreuvoirs économiseurs d'eau pour porcs en engrangement - Comparaison de la consommation d'eau et des performances zootechniques de différents types d'abreuvoirs utilisés au Québec », Août 2005.

d) Économies d'énergie et PRI

En considérant la réduction annuelle de la quantité de lisier à épandre (réduction de 35 % de la production de lisier) pour un cheptel de 1 000 porcs à l'engraissement (une diminution de 621 m³ à un coût d'épandage de 2,70 \$ /m³), le PRI se situe entre 6 et 10 ans. Il est à noter que le coût moyen d'épandage retenu est de 2,70 \$ / m³ pour les cas où les terres se situent entre 2 et 5 kilomètres. Advenant que les distances d'épandage soient supérieures à 5 kilomètres, le PRI sera donc meilleur.

e) Entreprises, contacts et références

François Pouliot (CDPQ)

De nombreuses entreprises commercialisent les trémies-abreuvoirs et les bols économiseurs d'eau (voir les noms des entreprises se retrouvant sur la fiche de la FPPQ, voir site internet de la FPPQ : http://www.leporcduquebec.qc.ca/fppq/savoir-4_4.html)

3.4.2 LES TOITURES SUR LES FOSSES À LISIER²³

a) Description de la technologie

L'installation d'une couverture sur les structures d'entreposage du lisier comporte plusieurs avantages (agronomiques et environnementaux). Comme chaque entreprise a des besoins différents, diverses options sont offertes aux producteurs. Les informations apparaissant dans cette section proviennent majoritairement d'une fiche produite dans le cadre des interventions agroenvironnementales de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ) « Les couvertures sur les fosses à lisiers».

Les recouvrements des fosses à lisier peuvent prendre plusieurs formes : structures permanentes, rigides et étanches, structures temporaires souples et perméables. Bien sûr, chaque type de recouvrement a des caractéristiques différentes en ce qui a trait à la réduction des odeurs et des pertes azotées, à l'accumulation des précipitations ainsi qu'à leur coût.

b) Impacts agronomiques et environnementaux

Voici quelques avantages reliés à la mise en place d'une couverture :

- Réduction des odeurs;
- Réduction des distances séparatrices exigées;
- Réduction du volume de lisier;
- Augmentation de la capacité d'entreposage;
- Concentration des éléments fertilisants;
- Diminution des pertes ammoniacales;
- Diminution du coût d'épandage.

²³ Cette section a été rédigée en collaboration avec Isabelle Bouffard et Raymond Leblanc.

Une couverture apporte donc plusieurs impacts agronomiques intéressants.

c) Coûts d'investissement et d'opération

Il semblerait que les couvertures rigides seraient les plus populaires, particulièrement celles avec un recouvrement de tôle. Les couvertures gonflables, très populaires pendant plusieurs années, ont connu une baisse de popularité due à des avaries reliées au vent et à l'accumulation de glace et de neige. Les problématiques en rapport avec les couvertures gonflables auraient fait diminuer l'offre de ces produits.

Bien sûr, les coûts de construction d'une couverture varient dépendamment de la structure sélectionnée, comme le montre la Figure 3.1.

Figure 3.1
Coût des couvertures pour une fosse de 30 mètres de diamètre²⁴

Type de couverture	Coût brut			Coût net	
	Total (\$)	Unitaire (\$/m ²)	(\$/p.p.) ¹	D = 2 km (\$/p.p.) ¹	D = 15 km (\$/p.p.) ¹
Bois et bardaues d'asphalte	49 500	70	1,19	0,87	0,57
Béton	74 200	105	1,49	1,17	0,87
Couverture gonflable	37 500	53	1,35	1,03	0,73
Bâche flottante	77 800	110	2,80	2,48	2,18
Paille ²	1 100	1,5	0,25	0,25	0,25

¹ p.p. : porc produit.

² Le coût de la paille est de 150 \$/t..

Source : Tiré de FPPQ, *Les couvertures sur les fosses à lisier*.

d) Économies d'énergie et PRI

La fiche concernant les couvertures sur les fosses à lisier produite par la FPPQ contient également un tableau illustrant le seuil de rentabilité de la mise en place d'une couverture sur une fosse à lisier.

²⁴ Tableau provenant de la fiche produite dans le cadre des interventions agroenvironnementales par la FPPQ « Les couvertures sur les fosses à lisiers ». Le tableau considère la production annuelle de 4 200 porcs en engrangement, une production de 0,71 m³ de lisier par porc produit, un coût d'épandage de 2,70/m³ à moins de 2 km et de 5,30/m³ à 15 km.

Figure 3.2
**Calcul d'un seuil de rentabilité économique pour l'installation d'une couverture pour
une fosse existante et pour une nouvelle fosse²⁵**

Paramètre		Structure	Nouvelle structure	
		existante ¹	Sans toiture ²	Avec toiture ³
Lisier à épandre	m ³ /an	2 374	4 230	3 500
Coût structure	(\\$)	-	90 800	81 600
Coût toiture	(\\$)	49 480	-	49 480
Coût total	(\\$)	49 480	90 800	131 080
Coût annuel ⁴	(\$/an)	5 007	7 675	11 905
Gain économique en azote	(\\$)	414	-	611
Seuil de rentabilité	(\$/m ³)	9,28	4,96	4,96
Augmentation de capacité	(m ³)	495	n.a.	n.a.

¹ Diamètre de 30 m et profondeur de 3,66 m; bois et bardeau d'asphalte.

² Diamètre de 36,4 m et profondeur de 3,66 m.

³ Diamètre de 30 m et profondeur de 4,27 m; bois et bardeau d'asphalte.

⁴ Accumulation de précipitations de 700 mm; durée d'entreposage de 300 jours; dépréciation annuelle de 4 % et 5 % respectivement pour fosse et couverture; intérêt, entretien, taxes et assurances de 5,1 %.

Source : Tiré de FPPQ, *Les couvertures sur les fosses à lisier*.

Ce tableau permet de constater que l'installation d'une couverture sur une fosse à lisier existante permet d'économiser annuellement 414 \$ en gain d'azote et d'épandre 495 m³ de moins de lisier. Donc, pour une toiture dont le coût s'élève à 49 480 \$, le PRI se situe entre 16 ans et 28 ans, dépendamment si la distance d'épandage est de moins de 2 kilomètres ou si cette distance est supérieure à 15 kilomètres (2,70 \$/m³ ou 5,30/m³). De plus, lorsque celle-ci permet de combler un apport de lisier supplémentaire, l'installation d'une toiture sur une fosse existante est moins onéreuse que la construction d'une nouvelle fosse.

Dans le cas où une nouvelle structure d'entreposage est nécessaire, la fiche technique de la FPPQ nous démontre que le coût supplémentaire associé à la construction d'une toiture est de 4230 \$/année et que les gains récurrents sont de 611 \$/année pour le gain économique en azote et de 1971 \$/année ou de 3869 \$/année pour la diminution de lisier à épandre dépendamment des distances devant être parcourues (coût d'épandage de 2,70 \$/m³ à moins de 2 km et de 5,30 \$/m³ à 15 km). Le PRI varie donc entre 11 ans et 19 ans.

e) Entreprises, contacts et références

Sylvain Pigeon, BPR.

Fiche technique produite dans le cadre des interventions agroenvironnementales par la FPPQ « Les couvertures sur les fosses à lisiers », voir site Internet de la FPPQ : http://www.leporcduquebec.qc.ca/fppq/savoir-4_4.html.

²⁵ Idem note précédente.

4. PRODUCTION D'ŒUFS DE CONSOMMATION ET D'INCUBATION

La production d'œufs de consommation et d'incubation, tout comme la production avicole en général sont des secteurs peu intensifs en énergie. Les coûts d'énergie comptent pour moins de 3 % des frais monétaires en production d'œufs de consommation. La production d'œufs d'incubation exige davantage d'énergie parce que la densité d'élevage est inférieure et les besoins de chauffage des bâtiments par conséquent supérieurs. Dans cette production, les coûts de chauffage peuvent atteindre 4 % des frais monétaires totaux.

Le principal poste de consommation d'énergie associé au secteur des œufs d'incubation est donc le chauffage des bâtiments. La ventilation, la réfrigération des œufs et le séchage du fumier sont les autres postes de consommation, bien que moins significatifs. En production d'œufs de consommation c'est la ventilation qui accapare la plus grande part de la dépense en énergie. Différentes technologies sont à la disposition des entreprises du secteur pour améliorer leur consommation d'énergie. Toutefois, à la lumière de la recherche effectuée, il semble que les entreprises de ce secteur semblent déjà près d'une situation optimale en termes d'équipements efficaces.

4.1 LA VENTILATION

La ventilation est une fonction cruciale dans les entreprises avicoles parce qu'elle permet de maintenir une bonne qualité de l'air essentielle pour la santé des animaux. Selon les experts consultés, il n'y aurait pas d'innovations technologiques importantes permettant de diminuer de façon significative la consommation d'énergie de ce type d'appareil. Les seuls éléments soulevés étant la nécessité de bien adapter les dimensions des ventilateurs à la taille des bâtiments et aux besoins de débit d'air et de se procurer les ventilateurs présentant les meilleures caractéristiques en termes d'efficacité énergétique lors du renouvellement de ceux-ci (cf. section 2.3). Pour la ventilation des bâtiments avicoles, il semble donc que la question de la consommation d'énergie n'est pas un des éléments cruciaux dans le choix du système à mettre en place. Mentionnons toutefois que l'installation d'un mur solaire afin de préchauffer l'air de ventilation en hiver permet d'améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments dans les productions avicoles où l'on ne retrouve généralement pas de systèmes de chauffage (œufs de consommation, par exemple). Cette solution, bien qu'elle améliore la qualité de la ventilation, ne conduit pas à des économies d'énergie.

4.2 LE CHAUFFAGE DES OISEAUX PRODUCTEURS D'ŒUFS D'INCUBATION

En production d'œufs d'incubation, les bâtiments doivent être chauffés en hiver puisque la densité d'élevage n'est pas suffisante pour assurer le maintien d'une température optimale pour les animaux avec un niveau de ventilation adéquat. Une des façons de diminuer la dépense en énergie pour le chauffage est de recourir à un mur solaire.

a) Description de la technologie

Le mur solaire est décrit en détail à la section 3.2 qui porte sur le chauffage des bâtiments en production porcine. De plus en plus de murs solaires sont installés sur des entreprises avicoles au Québec.

Le mur solaire utilise l'énergie du rayonnement solaire pour préchauffer l'air entrant dans les bâtiments. 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:

- 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 plenum vers un corridor de préchauffage situé dans l'entre toit du bâtiment et ensuite est distribué dans les chambres d'élevage (Guimont *et al.*, 2004).

L'énergie captée par le mur solaire est la lumière du soleil et non la chaleur. Ainsi, il peut générer autant d'énergie en hiver qu'en été (pour une même durée d'ensoleillement) en autant que l'orientation du mur soit adéquate (orienté vers le haut en été et vers le sud en hiver, sur un mur ou sur une structure légèrement inclinée). L'effet chauffant du mur solaire peut être complètement arrêté en été; il ne contribue donc pas à augmenter la température intérieure des bâtiments à un moment où cela ne serait pas souhaitable. L'économie maximale d'énergie survient dans les périodes les plus froides. Ainsi, cette technologie offre un potentiel d'économie d'énergie plus important dans les climats plus froids car la différence entre la température extérieure et la température souhaitée à l'intérieur du bâtiment est plus importante. Le mur solaire peut également être utilisé avec un système de ventilation naturelle. Dans ce cas, il ne fonctionne que lorsque le système est en ventilation minimale.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Le mur solaire permet de préchauffer l'air entrant dans les bâtiments d'élevage et ainsi de réduire la consommation de carburant pour le chauffage des poulaillers en hiver. Ce

préchauffage de l'air peut également permettre d'augmenter le débit de ventilation et ainsi améliorer la qualité de l'air intérieur des bâtiments.

c) Impacts agronomiques

Outre l'aspect économie d'énergie, le mur solaire permet de maintenir une meilleure qualité de l'air ambiant dans les bâtiments, ce qui contribue à minimiser les risques de maladie et de mortalité et ainsi d'améliorer les rendements de la production. En effet, en période de grand froid, la ventilation des bâtiments est souvent réduite au minimum afin de limiter les coûts de chauffage, ce qui a un impact négatif sur la qualité de l'air (ammoniac et degré d'humidité trop élevés) pour les animaux et peut affecter les performances zootechniques. Le mur solaire permet de faire entrer de l'air plus chaud dans les bâtiments et donc de maintenir un niveau convenable de ventilation sans générer un surcoût au niveau du chauffage. Une étude visant à évaluer l'impact agronomique relié à l'amélioration de la qualité de l'air découlant de l'utilisation d'un mur solaire est actuellement en cours de réalisation dans le secteur avicole. Les résultats seront disponibles d'ici deux ans.

d) Coûts d'investissement et d'opération

La grande majorité de murs solaires sont installés sur de nouvelles constructions (plus des trois-quarts des projets au Québec). D'après un promoteur, le coût d'installation d'un mur solaire sur un bâtiment neuf serait nul si l'on tient compte des subventions accordées en vertu des différents programmes d'aide gouvernementale visant les gaz à effet de serre et les énergies renouvelables. Sur un bâtiment existant, le coût d'installation s'élèverait à environ 10 000 \$, montant qui peut être réduit également par des subventions gouvernementales (Gaz Métro, Ressources naturelles Canada, etc.). Le coût d'acquisition d'un mur solaire dépend donc en partie de la situation du producteur : s'il s'agit d'un nouveau bâtiment, le coût du mur solaire est intégré dans le coût de construction du bâtiment et il ne semble pas y avoir de surcoût par rapport à un bâtiment conventionnel. Dans les cas où il s'agit d'intégrer un mur solaire à un bâtiment existant, l'investissement est variable selon les cas. Pour la tôle uniquement, le coût d'achat est de l'ordre de 10 à 11 \$/pi². La durée de vie de ce type d'équipement serait d'environ 25 ans. Les panneaux solaires ne demandent pas d'entretien particulier et peuvent même entraîner une diminution des frais d'entretien du système d'entrée d'air puisque le mur solaire agit comme filtre et limite l'entrée de poussières et autres débris dans le système de circulation d'air.

e) Économies d'énergie et période de récupération de l'investissement

En production avicole, l'économie d'énergie générée par l'utilisation d'un mur solaire dépend des modifications apportées à la ventilation, mais serait de l'ordre de 20 à 40 %. Tel que mentionné, des gains supplémentaires découlant de l'amélioration de la qualité de l'air peuvent également être comptabilisés. Dans le cas d'un bâtiment neuf, la récupération de l'investissement se ferait en moins d'un an si l'on considère un coût d'investissement nul comparativement à un mur conventionnel. Un temps de recul supplémentaire serait nécessaire pour obtenir des chiffres représentatifs pour le secteur avicole.

f) Entreprises, contacts et références

M. Réal Savaria, *Solag*

g) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

De nombreuses entreprises du secteur avicole ont installé des murs solaires. Mentionnons notamment Agri-Œufs de St-Hyacinthe, Centre avicole St-Jean-Baptiste, Ferme Jean-Noël Gagné à St-Bernard, Ferme Yves Bonin à St-Thomas-de-Joliette et les couvoirs Réal Côté.

4.3 LA RÉFRIGÉRATION DES OEUFS

La réfrigération des œufs est un poste de consommation d'énergie relativement mineur sur les entreprises avicoles. Les entrepôts réfrigérés sont généralement de petite taille et la température de conservation des œufs est relativement élevée, soit 13°C. Comme dans le cas de la ventilation, il n'y a pas de nouvelles technologies qui présenteraient actuellement un intérêt dans le secteur pour diminuer les coûts d'énergie. Les solutions technologiques récentes s'adressent à de gros consommateurs d'énergie pour les besoins de réfrigération. Par exemple, dans le secteur des supermarchés, on utilise des compresseurs, qui, au lieu de s'arrêter complètement, comportent un système de délestage qui fait tourner le moteur sur un nombre plus réduit de cylindre lorsque la charge de refroidissement est moins importante. Cette technologie permet de réduire la consommation d'énergie mais ne se justifie pas pour des températures de réfrigération et des coûts d'énergie tels que ceux que l'on retrouve dans le secteur avicole. De même, les charges de réfrigération et les températures de consignes des réfrigérateurs en production avicole ne justifient pas l'installation de système de récupération de chaleur.

4.4 LE SÉCHAGE DU FUMIER

Le séchage permet de valoriser le fumier de volaille par exemple lorsqu'un producteur se retrouve avec un problème de gestion de son fumier. La grande majorité des producteurs d'œufs de consommation et d'incubation trouvent facilement preneurs pour leur fumier ou lisier selon le cas, soit sur leur propre terre ou sur celle d'un autre producteur²⁶. Toutefois, avec le resserrement des normes environnementales, notamment la norme phosphore (on sait que le fumier de volaille est très riche en phosphore), et l'abondance de l'offre d'engrais de ferme, de plus en plus de producteurs sont susceptibles de se retrouver avec des surplus à gérer. Le séchage du fumier pour le valoriser sur le marché des engrains destinés au marché résidentiel ou commercial (terrains de golf par exemple) peut offrir des perspectives intéressantes.

²⁶ Selon le portrait agroenvironnemental, près de 92 % du fumier de poule est géré sous forme liquide dans le secteur des œufs de consommation et un peu plus du tiers des entreprises sont en production hors-sol.

a) Description de la technologie

Il est possible de sécher le fumier de volaille à l'aide d'un **mur solaire**. Dans le cas de la ferme Gelée, les panneaux solaires sont reliés à un ventilateur à vitesse variable afin d'optimiser l'énergie disponible. Le fumier est exposé à l'air réchauffé par l'énergie solaire tandis qu'il chemine sur un convoyeur. Ce système permet d'abaisser le taux d'humidité de 75 % à 25 %.

L'entreprise Agrigesco, un producteur d'œufs de consommation commercialise également une technologie de séchage du fumier de volaille. La technologie, appelée **Seconov**, consiste à sécher le fumier à l'aide de l'air chaud récupéré du bâtiment d'élevage. Le fumier est transporté sur des courroies jusqu'à un séchoir situé dans un bâtiment distinct du bâtiment d'élevage. Il est placé sur une plate-forme perforée au travers de laquelle est soufflé l'air provenant du poulailler. Le fumier sec est par la suite déposé sous la cellule de séchage ou une vis le rassemble et l'expédie vers une structure d'entreposage. Cette technologie n'utilise donc aucune source d'énergie autre que celle requise pour faire fonctionner les ventilateurs de séchage.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Les technologies de séchage du fumier permettent d'économiser les frais liés à l'entreposage et à la disposition du lisier de volaille. Les frais liés au pompage, au transport et à l'épandage sont ainsi épargnés ou réduits. Toutefois, le séchage implique une manutention du fumier solide et éventuellement des étapes subséquentes de transformation pour la commercialisation, incluant le transport. Le fumier sec peut également être utilisé comme combustible pour les besoins de chauffage s'il y a lieu.

c) Impacts agronomiques

Selon les promoteurs des deux technologies présentées, le séchage du fumier comporterait un certain nombre d'avantages sur le plan agronomique. Il permettrait de réduire de manière importante les odeurs, de diminuer les quantités d'ammoniac dans l'air, augmentant d'autant le contenu en azote du fumier et de réduire la quantité de mouches à proximité.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

L'installation d'un séchoir Seconov coûterait environ de 5 à 6 \$ par poule en incluant le prix des équipements (2,50 \$/poule pour 100 000 pondeuses), les modifications au poulailler et la construction du séchoir et de la structure d'entreposage. Le fonctionnement du séchoir n'entraînerait pas d'autres coûts d'opération que la ventilation et l'entretien, peu exigeant, des équipements.

e) Économies d'énergie et PRI

Pour le séchage à l'aide d'un mur solaire, l'économie d'énergie serait de 534 GJ/année selon le constructeur, pour le séchage de 3300 kg de fumier par jour. Cette chaleur était fournie auparavant par du bois de chauffage et équivaudrait à une économie annuelle de 8000 \$. Dans le cas du séchoir Secovov, il n'y a pas réellement d'économie d'énergie directe. Les économies sont plutôt reliées à la manutention du lisier, incluant son

entreposage, son transport et son épandage. Il n'a pas été possible d'obtenir de données précises sur les coûts évités.

f) Entreprises, contacts et références

www.solarwall.com

<http://www.seconov.ca/fr/Default.htm> (producteur et détaillant du système de séchage)

g) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

Ferme les Œufs d'Or à Val d'Or (séchage et transformation en compost)

Élevage et Grains Gelé, Cookshire,

http://www.matrixenergy.ca/ee/solarwall/projects/ee_solarwall_projects_%C3%A9levage_2.htm

5. GRANDES CULTURES

La production de grandes cultures exige une grande consommation d'énergie sous forme de carburant diesel pour le fonctionnement de la machinerie agricole. L'importance de l'énergie dans les dépenses d'exploitation varie d'une production à l'autre, mais représente en moyenne près de 10 % des frais monétaires. Le diesel compte pour plus de la moitié des dépenses en énergie. Les technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des opérations au champ sont donc d'un intérêt prioritaire. En production de maïs, le séchage du grain constitue le second poste de consommation d'énergie en importance. Cette opération post-récolte mérite donc également qu'on s'attarde aux nouvelles technologies permettant de réduire la consommation d'énergie pour le séchage.

5.1 LE TRAVAIL RÉDUIT DU SOL

Comme la consommation de carburant en production de grandes cultures est directement liée au nombre d'opérations culturales, les techniques de production permettant de réduire le nombre de ces opérations peuvent constituer une solution potentielle pour diminuer les coûts d'exploitation. Parmi les opérations culturales, le travail du sol est le type d'opération le plus énergivore. Il existe un continuum de pratiques de travail du sol allant du labour conventionnel au semi direct en passant par la culture sur billons. Aujourd'hui, les pratiques de travail réduit du sol présentent un avantage sensible sur les pratiques conventionnelles en raison du nombre réduit de passage de la machinerie agricole, sans perte de rendement notable. En général, la transition vers ces nouvelles pratiques nécessite cependant quelques années (deux à cinq années, selon le type de sol) et un important effort d'apprentissage de la part des producteurs. **Le choix d'adopter des pratiques de travail réduit est motivé d'abord et avant tout par un objectif agro-environnemental et de développement durable et non par un objectif de réduction d'énergie même si ce résultat est incontestable.** Cette décision doit d'ailleurs s'inscrire dans le cadre d'une démarche agro-environnementale et bénéficier du support de professionnels qui sauront épauler le producteur à travers les différentes étapes de son apprentissage, et ce, durant plusieurs années.

a) Description de la technologie

Il existe différentes techniques de production permettant de réduire la consommation de carburant en production de grandes cultures. **Le travail réduit du sol** consiste à effectuer un travail du sol moins en profondeur et moins intensif que le labour traditionnel. Il peut en principe être réalisé dans tous les types de sol. En travail réduit du sol, le travail primaire est fait par un chisel ou un offset qui consomme moins de carburant que le labour conventionnel. **Le semi direct** consiste à semer directement sur les résidus de la culture précédente en contrôlant les cultures concurrentes par des applications d'herbicides. Il n'y a aucune opération de travail du sol d'effectuée. Le semi direct fonctionne mieux lorsqu'il y

a une bonne rotation des cultures (une bonne rotation incluant un minimum de trois cultures et une alternance entre légumineuses et graminées). Le semi direct nécessite une transition sur plusieurs années. Les premières années nécessitent un travail minimum du sol par chisel, disques ou vibroculteur. Il sera possible de travailler ensuite en semi direct lorsque le sol aura recouvré ses propriétés naturelles.

La **culture sur billons** se divise en cinq étapes : confection des billons, ensemencement et décapage des billons, sarclage et incorporation d'engrais, sarclage et reconstruction des billons et, pour finir, la récolte. La culture sur billons nécessite des équipements spécifiques tels qu'une billonneuse.

De façon générale, les différentes techniques de travail réduit du sol impliquent l'utilisation d'un semoir adapté, généralement plus coûteux que les semoirs conventionnels, mais ces techniques réduisent de façon substantielle le nombre des opérations dans le champ.

b) Impacts agronomiques

Comme mentionné, les techniques de travail réduit du sol se sont développées d'abord et avant tout pour des motifs agronomiques plutôt qu'économiques. Le travail réduit permet une diminution de la compaction du sol et réduit l'érosion. Il permet également d'augmenter de façon importante le taux de matière organique du sol et de diminuer les besoins en fertilisants. En effet, une réduction du travail du sol permet une augmentation très importante de son activité biologique (activité des micro-organismes et des insectes du sol) et, ainsi, de rendre disponible pour les plantes une grande quantité d'éléments fertilisants. L'amélioration de la qualité du sol permet une meilleure rétention de l'humidité.

Il semblerait que la diminution des rendements soit très faible, voire nulle, avec l'adoption du semi direct. Le semi direct nécessite cependant quelques adaptations des pratiques culturales telles que l'incorporation directe du lisier ou l'utilisation d'un sarcloir lourd pour contrôler les mauvaises herbes (Lamarre 2001). Il semble également que la culture sur billons permette de diminuer les coûts d'achat de fertilisants, et de pesticides.

Toutefois, le passage au semi direct nécessite un certain nombre de pré-requis qui peuvent représenter des investissements importants dans certains cas. Une culture en semi direct doit se faire sur un sol bien égoutté, ce qui suppose un très bon niveling avec une pente qui ne soit pas trop prononcée. Tel que mentionné, le passage vers le semi direct nécessite une transition qui permettra de corriger le PH du sol et de diminuer progressivement la compaction du sol. Pour assurer le succès du semi direct les facteurs suivants doivent être retrouvés sur l'exploitation : un sol en santé, un système adéquat de rotation des cultures, une machinerie adaptée, une bonne gestion des résidus, une minimisation des passages dans les champs, une fertilisation adaptée et un contrôle des mauvaises herbes (Michon, 2006). L'ensemble de ces prérequis nécessite donc un apprentissage important de la part du producteur qui doit modifier de façon importante ses méthodes de travail et sa régie de cultures. Il s'agit d'un élément à ne pas négliger lorsque l'on parle de semi direct.

c) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Le travail réduit du sol diminue également la taille du parc de machinerie et donc des investissements et des frais d'intérêts. Toutefois, le producteur qui est en travail conventionnel et qui souhaite faire la transition devra effectuer de nouveaux investissements pour faire la transition mais pourra vendre les équipements dont il n'aura plus besoin une fois cette transition terminée. Le Tableau 5.1 présente le coût des équipements nécessaires aux différentes techniques de production.

Tableau 5.1
Comparaison du coût des équipements de travail du sol requis pour un travail conventionnel et un travail réduit du sol

	Conventionnel	Travail réduit
Charrue	50 000	
Chisel		18 500 à 25 000
Herse lourde	22 000	
Vibroculteur	18 000	
Sarclieur	13 500	
Billonneur		
Semoir	30 000	50 000 à 60 000
Total	133 000	

Source : CRAAQ 2006 et Georges Lamarre, communication personnelle.

En travail réduit, un semoir spécialisé doit être utilisé. Ce semoir est plus cher que les semoirs conventionnels car il est conçu pour gérer les résidus de culture restés sur le sol.

D'après des informations obtenues, la culture sur billons pour le maïs-grain requiert également un investissement moindre qu'en système conventionnel, soit des investissements totaux de 215 000 \$ contre 325 000 \$ pour les pratiques conventionnelles (Bérubé *et al.*, 2006).

Le travail réduit du sol n'implique pas de coûts d'opération supplémentaires par rapport aux pratiques conventionnelles, dans la mesure où la technique est bien maîtrisée. Au contraire, le travail réduit du sol, en réduisant le nombre d'opérations dans le champ, permet de réduire les coûts d'opération en main-d'œuvre et pour l'entretien des machineries.

d) Économies d'énergie et PRI

Le semi direct possède un avantage sur les pratiques conventionnelles équivalent à un écart de marge brute estimé à 28 \$/ha en moyenne. Le semi direct permet de réduire le temps passé au champ de 60 minutes par hectare et de diminuer les risques d'érosion de 60 % (Lamarre, 2006). En considérant un coût de 0,75 \$/litre, ceci donne des économies allant de 7,50 à 18,50 \$ par hectare.

La consommation de carburant serait de 32,6 l/ha pour semer du maïs en pratique conventionnelle contre 22,8 l/ha avec l'utilisation d'un chisel au lieu d'une charrue et 14,5 l/ha pour la culture sur billons et 8 l/ha en semi direct (Bérubé *et al.*, 2006). Le

potentiel de diminution de la consommation de carburant se situe donc dans une fourchette de 25 à 75 % selon les différentes techniques de travail réduit du sol.

Le principal avantage économique des techniques de travail réduit du sol est la diminution des dépenses en carburant et du temps de travail passé au champ. La diminution de la taille du parc de machinerie entraîne également une diminution des frais d'entretien de celle-ci. Le semi direct permet également des économies en fertilisants et en herbicides, et diminue de façon importante le besoin d'enlèvement des roches.

Les résultats obtenus par un producteur²⁷ qui pratique le semi direct depuis plusieurs années ont mené à des économies de l'ordre de 56 000 \$ pour une superficie de 200 ha, soit 10 000 \$ en carburant, 8000 \$ en frais d'entretien des machineries, 13 000 \$ en fertilisants et 25 000 \$ en amortissements et frais d'intérêts. Ceci équivaut à une économie de 280 \$/ha soit l'équivalent d'une augmentation de rendement de 2 tonnes à l'hectare à un prix du maïs de 140 \$. La consommation de carburant par unité de surface est de 30 litres/ha au lieu de 90 à 120 litres/ha en conventionnel.

Le travail réduit du sol pour la production de grandes cultures est en plein essor au Québec depuis quelques années. De plus en plus d'agronomes sont aptes à fournir un conseil-expert aux producteurs intéressés à examiner cette solution. Des clubs se sont créés qui se spécialisent dans le semi direct dans presque toutes les régions du Québec (clubs Action semi direct). Le producteur souhaitant examiner cette possibilité pour contrôler ses coûts de carburant et diminuer le temps de travail au champ pourra donc trouver des ressources pour l'accompagner dans cette transition.

e) Entreprises, contacts et références

Georges Lamarre, Guy Beauregard

Culture sur billons : Ferme Monlou et filles (La Présentation), Club Action Billon

Ferme Longprés (Les Cèdres)

5.2 LE SÉCHAGE DU GRAIN

Différentes pratiques et technologies existent actuellement pour le séchage du maïs et des céréales. Rappelons pour commencer que la question du séchage est une préoccupation plus importante pour le maïs que pour les céréales car, dans le cas du maïs, il faut ramener le taux d'humidité de 25-30 % à 14-16 % pour le commercialiser tandis que l'écart est moins important pour les céréales.

La Fédération des producteurs de cultures commerciales a participé en 1995 à une étude technique sur la question du séchage des grains pour évaluer la rentabilité des différentes technologies proposées, notamment sur le plan des coûts de l'énergie. Les techniques de

²⁷ Présentation de M. Jocelyn Michon, producteur, lors du colloque *L'Énergie au Saguenay-Lac-St-Jean c'est durable*, Agrinova, 26 octobre 2006.

séchage à l'air ambiant, séchage à basse température et de séchage à haute température y sont documentées. Trois méthodes d'économie d'énergie sont également présentées soit la récupération de l'air de séchage, la dryération et le refroidissement en silo. De nombreuses approches alternatives à l'étude ou en essai sont également documentées (micro-ondes, l'induction électromagnétique, séchage par convection sur jet d'air ou sur lit fluidisé, conduction à l'aide de particule de zéolite ou de sable, infrarouge, etc.). D'après les informations recueillies auprès de certains experts ayant collaboré à cette étude, il n'y a pas d'innovations technologiques importantes ayant fait leur apparition depuis et les technologies faisant l'objet de recherche et développement à l'époque n'ont pas débouché vers une étape de commercialisation, à part peut-être pour la récupération de chaleur.

L'information la plus récente qu'il a été possible d'obtenir sur la récupération de chaleur dans les séchoirs à grain date du début des années 1990²⁸. D'après les informations présentées, l'installation d'un système de récupération de chaleur ou d'un échangeur de chaleur permettrait de diminuer l'utilisation de l'énergie de 20 à 40 % pour un même début du séchoir. L'augmentation des coûts de l'énergie ne peut que contribuer à améliorer l'intérêt économique de ce type d'équipement. L'avantage de ces systèmes est qu'ils peuvent être installés à l'intérieur de séchoirs déjà existants (séchoir vertical à colonnes). Les contacts effectués n'ont pas permis de documenter les coûts d'installation de ces équipements ni l'importance de leur utilisation sur les exploitations agricoles du Québec.

Les techniques de séchage utilisées en 1995 demeurent donc les mêmes aujourd'hui. Toutefois, les différentes améliorations technologiques apportées aux différentes composantes de ces équipements et surtout, l'ajout de dispositifs de contrôle informatisés permettant d'optimiser l'utilisation de l'énergie ont permis une amélioration de l'efficacité énergétique de ces équipements.

Par ailleurs, avec l'augmentation des coûts de l'énergie, certaines pratiques plus ou moins innovantes ont été remises de l'avant soit le séchage en crib et le séchage sur pied du maïs. Les deux pratiques permettent de réduire les coûts de séchage mais génèrent aussi des coûts à d'autres postes.

5.2.1 LE SÉCHAGE EN CRIB

a) Description de la technologie

Le séchage en crib était une méthode de séchage du maïs utilisée sur les exploitations agricoles il y a quelques décennies. L'augmentation des coûts de l'énergie pourrait annoncer le retour de cette méthode. À l'heure actuelle, la non-disponibilité de récolteuses adaptées pour la récolte du maïs destiné au séchage en crib constitue un frein

²⁸ MAAARO 1990. Récupération de l'énergie pour le séchage du maïs-grain, fiche technique, Agdex no. 111/736.

à l'adoption de cette méthode²⁹. Des essais à partir d'une récolteuse-éplucheuse provenant d'Europe seront réalisés à l'automne 2006 sur des fermes québécoises.

b) Impacts agronomiques

Le séchage en crib pourrait permettre d'obtenir un poids spécifique du grain supérieur au grain séché au carburant. Le séchage en crib produit des rafles représentant jusqu'à 20 % du poids sec de l'épi. Ces rafles ont un pouvoir calorifique élevé (15 GJ/t, soit l'équivalent de 592 litres de propane) qui pourrait être valorisé pour le chauffage (PAGES 2006). Toutefois, il est important de souligner que la vente des stocks peut seulement se faire à compter du printemps. Le séchage en crib impose donc une période de non-disponibilité des grains donc pourrait compromettre une stratégie de vente étalée dans le temps.

c) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Les techniques de séchage utilisées actuellement au Québec sont le séchage par lots, qui se pratique plus souvent sur les petites et moyennes exploitations et le séchage en continu, qui se pratique plutôt sur les exploitations de plus grande taille. Il n'existe pas à proprement parler de technologie dominante. D'après le CRAAQ (données de 1995)³⁰, le coût de séchage serait légèrement inférieur à 25 \$ par tonne pour le séchage continu à recirculation d'air et légèrement supérieur à 24 \$ par tonne avec un séchoir en fournées à recirculation de grain. On pourrait donc parler d'un léger avantage pour les systèmes de séchage en continu, mais il semble que le facteur plus décisif soit la qualité des équipements plutôt que le choix d'un système ou d'un autre et, à ce titre, certains équipements européens offriraient de meilleures performances que les équipements actuellement disponibles au Québec³¹.

d) Coûts d'opération et économies d'énergie

Le séchage en crib permettrait de réduire la consommation de carburant d'environ 317 litres par hectare soit environ 140 \$ par hectare³². Néanmoins, le séchage en crib implique des coûts de main d'œuvre plus importants lors de la reprise des grains. Le Tableau 5.2 présente une comparaison des coûts du séchage au gaz propane et en crib.

²⁹ Fiche *Le retour du crib* produite dans le cadre du Programme d'atténuation des gaz à effet de serre. http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/feuillet_crib.pdf

³⁰ AGDEX 736/821b, juin 1995.

³¹ Georges Lamarre, Mapaq, communication personnelle.

³² Les calculs du PAGES ne tiennent cependant pas compte des infrastructures et des coûts de main-d'œuvre.

Tableau 5.2
Comparaison de la quantité de carburant utilisée pour le séchage en séchoir conventionnel et pour le séchage en crib

	Séchage au gaz propane (litres/ha)	Séchage en crib
Récolte	15	11
Transport au lieu de séchage	7	9,4
Séchage	320	0
Égrenage	0	5
Total	342	25,4

Source : Tiré de : *Le retour du crib*, Programme d'atténuation des gaz à effet de serre 2006.

e) Coûts d'investissement et PRI

Selon les données du PAGES (2006), la construction d'un crib en bois coûterait approximativement 150 \$ par pied linéaire et un crib en métal environ 200 \$ par pied linéaire. Un pied linéaire permet de sécher entre 0,8 et 1 tonne de maïs. Si l'on considère un coût de séchage de 25 \$ par tonne pour un séchage à base de carburant, la période de récupération de l'investissement, basé uniquement sur le coût direct de séchage abstraction faite du coût du séchoir, serait de 6 ans pour un crib en bois et de 8 ans pour un crib en métal.

f) Entreprises, contacts et références

Gilles Tremblay (CÉROM), essai à St-Bruno-de-Montarville de séchage sur champs.
Ferme Mondoux, La Présentation

5.2.2 LES AUTRES MÉTHODES DE SÉCHAGE DES GRAINS

Le CÉROM a réalisé une expérience de séchage sur pied du maïs à l'hiver 2005. Sur la base de ses résultats expérimentaux, il semble que cette pratique n'entraîne pas de perte trop importante en termes de rendement et permette même d'obtenir une qualité de grain très satisfaisante. En effet, lors de cette expérience, les grains récoltés en avril 2006 avaient un poids spécifique moyen de 67,5 kg/hl alors que ce poids moyen était de 63,7 kg/hl en octobre 2005. Une diminution du contenu moyen des grains en toxines a aussi pu être observée au cours de cette expérience (Tremblay 2006).

Bien que cette technique pourrait être intéressante pour diminuer la consommation de propane pour le séchage du grain, elle n'est qu'à l'étape expérimentale au Québec et comporte des risques importants à cause des conditions climatiques (risque de gel).

Ainsi, bien que les techniques de séchage en crib ou sur pied, permettent de réduire les dépenses en énergie pour le séchage, ces techniques comportent certains inconvénients :

- Le séchage sur pied du maïs peut impliquer une perte des rendements en présence d'espèces nuisibles pour les récoltes (bernaches, chevreuils, etc.);
- Le séchage sur pied, comme le séchage en crib, implique que le maïs ne peut être commercialisé qu'au printemps suivant et le producteur est donc limité dans ses choix commerciaux;
- Le séchage sur pied comporte des risques importants dus au gel hâtif.

Le séchage des grains avec mur solaire est pratiqué en Europe. Toutefois, des essais effectués au Canada ont confirmé que ce type de séchage n'est pas adapté aux conditions climatiques québécoises au moment où c'est nécessaire puisqu'il ne permet pas de générer suffisamment de chaleur en temps voulu³³. En effet, les besoins pour le séchage des grains sont situés à l'automne, période de l'année où la durée d'ensoleillement est la plus courte.

L'utilisation de résidus (par exemple les rafles de maïs) pour en faire la combustion pour produire la chaleur nécessaire au séchage peut représenter une solution intéressante pour des producteurs ayant accès à de tels résidus à un prix avantageux par rapport au prix des combustibles conventionnels. Au fur et à mesure que le prix des combustibles fossiles augmente, la rentabilité relative de sources d'énergie alternatives comme les résidus de culture devient plus intéressante.

³³ Réal Savaria, Solag, communication personnelle.

6. PRODUCTION EN SERRE

Le secteur serricole est le secteur le plus intensif en énergie de tous les secteurs de production agricole. La consommation d'énergie d'une serre dépend en grande partie de l'étendue de la période de production et de la présence ou non d'éclairage de photosynthèse. Plus la période de production est longue, plus les besoins en chauffage sont importants. Ainsi, la dépense en énergie d'une serre sera d'environ 10 % des dépenses totales pour une serre non chauffée, et de plus de 50 % des dépenses totales pour une serre chauffée ayant recours à l'éclairage de photosynthèse.

Étant donné l'importance des dépenses énergétiques dans ce secteur et l'évolution rapide des coûts de l'énergie dans les dernières années, incluant l'abrogation du tarif BT, plusieurs efforts de recherche en efficacité énergétique ont été réalisés au cours des dernières années. Parmi ceux-ci mentionnons la production d'un guide d'aide à la prise de décision réalisé à la suite de la décision de la Régie de l'énergie de procéder à l'abrogation du tarif BT, pour aider les producteurs en serre dans la modernisation de leurs équipements de chauffage et dans l'optimisation de leur efficacité énergétique. Ce guide permet de mesurer l'isolation de l'enveloppe thermique, les différentes pertes de chaleur et les besoins en énergie dans l'objectif d'identifier des recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique et calculer la rentabilité de leur mise en place. Ceci inclut également le choix d'un système de chauffage. Mentionnons également la production par le CIDES de 7 fiches techniques présentant des technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique dans les serres. De plus, le CIDES, en partenariat avec le MAPAQ, le SPSQ et Hydro-Québec, réalise présentement un projet d'audits énergétiques dans les serres afin de diagnostiquer la situation en termes d'efficacité énergétique et d'identifier le potentiel d'amélioration. Ce projet fait état notamment d'un inventaire préliminaire de technologies et de pratiques de gestion permettant d'améliorer l'efficacité énergétique et de diminuer les coûts d'énergie. Les technologies inventoriées concernent l'isolation, les toiles thermiques, les tapis chauffants, l'éclairage efficace, les moteurs à haute performance et les chauffe-eau instantanés. Les pratiques de gestion telles que l'installation de contrôles par ordinateur, l'entretien des différents équipements et la régie des cultures (température, humidité, cycles des cultures, etc.) sont également mentionnées.

Les points critiques de consommation d'énergie documentés dans le cadre du premier volet de l'étude sont le chauffage et l'éclairage de photosynthèse. Certaines technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique reliée à ces deux points critiques de consommation sont présentées dans les lignes qui suivent. Il est important toutefois de mentionner que la problématique d'efficacité énergétique en production serricole est éminemment complexe. La recherche de solutions pour une entreprise donnée doit commencer d'abord et avant tout par la réalisation d'un audit énergétique qui prend en considération l'ensemble de l'activité de la serre, sa taille, la période de production, le type de culture, le type de régie, les caractéristiques et la configuration des bâtiments, etc. De ce point de vue, le projet d'audits énergétiques supporté par Hydro-Québec

constitue certainement une initiative utile et cohérente pour ce secteur. L'information apportée par la documentation d'une technologie donnée, considérée pour elle-même et non dans le système de production dans sa globalité représente donc un intérêt limité. Par ailleurs, les équipements permettant un meilleur contrôle des fonctions de climatisation, ventilation et chauffage ne sont pas l'objet de la présente étude puisqu'ils ne constituent pas des technologies efficace au sens où nous l'entendons ici. Néanmoins, dans le secteur des serres en particulier, les mesures comportementales et les équipements permettant d'améliorer la gestion de la consommation d'énergie sont d'une grande importance et peuvent mener à des économies d'énergie dépassant les économies réalisées en modifiant une technologie donnée.

6.1 LE CHAUFFAGE DES SERRES

Au Québec, il y aurait plus de 90 % des serres qui auraient recours à une forme ou une autre de chauffage selon les données du SPSQ. Parmi eux, une majorité a recours au mazout (huile no.2) qui est devenu dans les dernières années une source d'énergie de moins en moins abordable. La recherche d'une meilleure efficacité énergétique ou de sources d'énergie alternatives est donc devenue un sujet de préoccupation important.

Il existe différents types de solutions pour améliorer l'efficacité énergétique du chauffage des serres : une modification des pratiques de régie et de gestion (température de consigne et conduite climatique, ventilation, aménagement de la serre, etc.), un changement dans la source d'énergie utilisée, une modification des équipements de chauffage et surtout une amélioration de l'isolation. L'énergie la moins chère est celle qui n'est pas consommée; cette maxime prend tout son sens en production en serre où les bâtiments, de par leur revêtement, sont particulièrement perméables aux pertes de chaleur. De nombreux efforts ont été réalisés depuis plusieurs années dans le secteur serricole pour sensibiliser les producteurs à la nécessité d'améliorer l'isolation et de minimiser les pertes de chaleur dans les serres. Tel que mentionné, le CIDES a réalisé un total de sept fiches techniques sur des technologies ou des pratiques permettant de diminuer les coûts d'énergie. Ces fiches techniques portent sur :

- L'isolation des serres par l'installation d'isolants dans les murs
- L'isolation des serres à l'aide d'un écran thermique
- Les infiltrations d'air
- L'entretien des fournaises
- La distribution de chaleur
- L'isolation des tuyaux d'eau chaude
- La déshumidification des serres

Par ailleurs, le Syndicat des producteurs en serre a publié récemment une fiche d'information intitulée « Les systèmes de chauffage ». Cette fiche énumère, entre autres, les 10 meilleures pratiques pour réduire ses coûts énergétiques. Elle propose aussi une

démarche en deux étapes; d'abord, dresser son profil énergétique et ensuite rechercher des possibilités et des solutions.³⁴

Lors d'un colloque sur la production en serre tenu à Toronto à l'automne 2006, les résultats d'un projet d'audits énergétiques ont été présentés par AgEnergy Co-Operative. Un total de 27 recommandations visant à épargner des coûts d'énergie ont été proposées. Les principales recommandations sont les suivantes :

- Des mesures visant le système de chauffage déjà en place : ajustement et entretien, ajout d'un récupérateur de chaleur, ajout de contrôles automatiques. Permettent des économies d'énergie allant jusqu'à 10 %.
- Des mesures visant l'économie d'énergie électrique : gestion de la demande³⁵, l'installation d'éclairage efficace (fluorescents compacts ou T8) dans les lieux de travail autres que les zones de croissance des plantes. Installation de contrôles pour la ventilation et l'utilisation de ventilateurs efficaces. Installation de moteurs à vitesse variable, conversion à la ventilation naturelle (dans certains cas seulement). Permet des économies d'énergie allant jusqu'à 20 ou même 30 %.
- Des mesures visant la récupération de chaleur et le contrôle de l'humidité.
- Des mesures visant l'amélioration de l'isolation : installation d'écrans thermiques, isolation des murs nord à l'aide de bulles d'air avec ou sans une couche d'aluminium, des murs est, ouest et sud, du plancher et du périmètre, isolation du toit avec des bulles soufflées entre les deux parois de polyéthylène (jusqu'à 52 % d'économie d'énergie), utilisation d'écrans thermiques multiples. Permet des économies variant de 0,5 à plus de 50 % selon le cas.

Le recours à l'une ou l'autre des solutions proposées dépend des caractéristiques propres à chaque serre, caractéristiques qui sont très variables. Une recommandation ne peut donc s'appliquer à l'ensemble des serres. Les technologies qui sont documentées dans les lignes qui suivent sont les tapis chauffants et les écrans thermiques. La géothermie, qui présente un intérêt particulier pour le secteur serricole fait quant à lui l'objet d'une section spécifique dans la seconde partie de ce rapport.

Les écrans thermiques

a) Description de la technologie

Les écrans thermiques sont des toiles rétractables qui sont déployées pendant la nuit pour réduire les pertes de chaleur lorsque la température extérieure diminue et qu'il n'y a plus

³⁴ Fiche technique disponible sur le site Internet d'Agri-Réseau au www.agrireseau.qc.ca.

³⁵ La gestion de la demande vise les producteurs qui sont facturés pour un appel de puissance. La gestion de la demande consiste à répartir dans le temps la demande d'énergie électrique (la puissance appelée) pour limiter la puissance maximale appelée, qui est la puissance facturée au consommateur.

de rayonnement solaire. Elles peuvent également servir d'ombrage en été lorsque le rayonnement solaire est trop intense et peut causer des dommages à la plante. Les écrans thermiques sont généralement constitués de couches de polyester et d'aluminium qui ont pour effet de réfléchir la chaleur dans la serre et ainsi de réduire l'échange de chaleur entre la serre et le milieu extérieur.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une isolation à proprement dit, l'écran thermique permet d'améliorer de manière importante l'isolation des serres. Les économies d'énergie qu'il permet de réaliser dépendent de nombreux facteurs dont principalement la période de production et le type de construction (serre individuelle ou jumelée). L'économie d'énergie varie de 10 à près de 50 % selon les différentes sources de données consultées. Un ordre de grandeur réaliste serait de 20 à 30 %.

c) Impacts agronomiques

Le principal impact agronomique associé à l'installation d'un écran thermique est la possibilité de fournir un ombrage en été permettant de réduire les pertes de rendement liées à un trop grand rayonnement pendant l'été.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Selon les données contenues dans la fiche d'information du CIDES (données de 2000), le coût d'investissement d'un écran thermique était de l'ordre de 22 \$/m² pour des serres jumelées et de 31 \$/m² pour une serre individuelle. Ce montant inclut la toile (16 \$/m²), la mécanisation (2,60 \$/m² et 10 \$/m²) et la main-d'œuvre (3,90 \$/m² et 5 \$/m²). Une autre source d'information indiquait un coût d'achat « clé en main » de l'écran thermique de 2 \$/pi², soit 21,50 \$/m²³⁶.

e) Économies d'énergie et PRI

Toujours selon le CIDES (données de 2000), les économies d'énergie permises par l'installation d'une toile thermique s'élèveraient à 7 \$/m² pour une production sur toute l'année à 2,50 \$/m² pour une production de mars à octobre. La période de récupération de l'investissement correspondant à ces deux cas de figure est respectivement de 3 ans et d'un peu plus de 12 ans. Ces calculs ont été effectués en utilisant un prix du mazout de 0,46 \$/litre. Au prix actuel du mazout, qui atteint près de 0,69 \$/litre³⁷ depuis le début de 2006, la période de récupération de l'investissement serait encore plus courte, soit respectivement de 10,50 \$/m² et de 3,75 \$/m² pour des PRI de 2 ans et 8 ans respectivement pour un même coût d'investissement. L'augmentation des prix du mazout rend donc cet investissement intéressant pour un plus grand nombre de serres présentant des périodes de production plus courtes.

³⁶ André Carrier, Mapaq Chaudière-Appalaches, communication personnelle.

³⁷ Prix moyen pondéré du mazout pour les 10 premiers mois de 2006. Le prix payé par les producteurs en serre peut être inférieur s'ils bénéficient d'escamptes au volume. Source : Site Internet de la Régie de l'énergie, novembre 2006, <http://www.regie-energie.qc.ca/energie/archives/huile/huilehebdo2006.pdf>.

f) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

De plus en plus de serres se dotent d'écrans thermiques pour diminuer leurs coûts de chauffage. Mentionnons les serres Savoura à Portneuf et les serres Claude Lizotte à St-Jean-Chrysostome qui sont des exemples de serres de tailles très différentes.

6.2 LE CHAUFFAGE DES PLANTS : TAPIS CHAUFFANTS ET PLANCHER CHAUFFANT

Plusieurs technologies sont utilisées pour chauffer les plants dans les serres. Outre les pratiques permettant d'améliorer l'efficacité énergétique pour la génération de chaleur, il existe des technologies permettant d'améliorer l'efficacité énergétique au niveau de la diffusion de la chaleur dans la serre. Plus exactement, il s'agit de distribuer la chaleur là où elle est le plus utile, c'est-à-dire au niveau du système racinaire des plants, plutôt que de chauffer l'air ambiant de la serre. Ceci permet de maintenir une température ambiante plus basse et donc de réduire les dépenses en énergie, tout en conservant ou en améliorant la qualité de la production d'un point de vue agronomique.

Pour cela, plusieurs technologies existent :

- circulation d'eau chaude à travers des serpentins disposés sur les tables de culture;
- tapis chauffants disposés sur les tables;
- plancher chauffant.

a) Description de la technologie

Le chauffage du système racinaire des plants par des serpentins installés sur les tables est une technologie un peu plus ancienne que le chauffage par tapis chauffants. Ce système repose sur l'installation de serpentins en métal ou en plastique sur la table de culture, entre les plants, et où l'eau chauffée par une bouilloire apporte la chaleur souhaitée aux plants. Cette technologie serait cependant moins performante que le chauffage par tapis chauffants car une partie de la chaleur est perdue dans l'air.

Avec un chauffage par tapis chauffants, les plants sont posés sur des tapis ou des dalles disposés sur les tables. Il existe différents types de tapis : certains sont chauffés par un système de câblage électrique incorporé dans les tapis, d'autres reprennent le principe du chauffage à l'eau chaude. Ce type d'équipement serait plus performant que le chauffage par serpentins en raison de la meilleure isolation des tapis chauffants, qui réduit donc la perte de chaleur observable avec les serpentins³⁸. Il s'agit aussi d'une solution plus facile à mettre en œuvre que le chauffage par le sol car les coûts d'investissement sont moins importants et surtout l'installation de tapis chauffants ne nécessite pas de modifications des installations existantes. Les tapis chauffants sont utilisables pour la production en potées, pour les boutures ou pour les jeunes plants.

³⁸ Gilles Cadotte, CIDES, communication personnelle.

Depuis peu, un nouveau type de tapis chauffant a fait son apparition au Québec, il s'agit d'un matelas capillaire chauffant qui intègre des tuyaux d'irrigation et de chauffage. Il a été développé en collaboration avec l'Université Laval. Ce tapis combine le chauffage et l'irrigation racinaire.

Ce matelas chauffe les racines au lieu de l'air ambiant, mais de plus il réchauffe automatiquement l'eau d'irrigation provenant du matelas en agissant comme réservoir et réseau de distribution de l'eau. Par absorption capillaire, l'eau tiède d'irrigation est acheminée au substrat au moyen de trous de drainage sous les pots, ce qui permet d'élever la température du substrat sans l'assécher. Ce système accélère la croissance de la plante et réduit la consommation d'eau et de fertilisants en diminuant le lessivage.

Le chauffage par plancher chauffant est le système le plus récent et il se retrouve de plus en plus fréquemment dans les serres de construction récente. C'est notamment le cas en Ontario où de plus en plus de serres utilisent ce type de système. Il est plus adapté pour les cultures en potées ou les jeunes plants et moins conseillé pour les boutures. L'installation d'un chauffage par le sol se fait généralement dès la construction de l'infrastructure. En raison du coût plus élevé de ce type d'équipement, il est plus facile de le rentabiliser en produisant toute l'année plutôt que sur sept ou huit mois.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

D'après l'expérience menée par le CIDES portant sur l'usage de tapis chauffants pour des productions de tomates, de poivrons et de concombres, l'utilisation de tapis chauffants permet de diminuer la consommation d'énergie par rapport au maintien d'une température ambiante plus élevée par un système de chauffage conventionnel (chauffage de l'air ambiant).

Pour le poivron, l'utilisation de tapis chauffants a permis de réduire de 15 % la quantité totale d'énergie sans éclairage artificiel et de 22 % avec éclairage artificiel. Une combinaison de tapis chauffants et d'éclairage par lampes au sodium à haute pression, avec une température ambiante chaude, réduit de moitié la consommation d'énergie par plant par rapport à un chauffage au gaz uniquement (2,99 kWh contre 5,79 kWh respectivement). Ceci correspond à un coût en énergie de 0,209 \$ par plant, avec la solution la plus efficace, contre 0,358 \$ par plant, avec le chauffage au gaz.

Pour la tomate, la solution la plus énergivore était le chauffage au gaz et une ambiance chaude (4,16 kWh) et la plus efficace correspondait à l'utilisation de tapis chauffants combinés à des lampes au sodium à haute pression dans une ambiance froide (3,02 kWh). Ceci correspondait à un coût de 0,257 \$ par plant pour la première solution et 0,212 \$ par plant dans le second cas. Dans l'expérience menée par le CIDES, l'éclairage artificiel semblait « contribuer davantage à la réduction des coûts d'énergie par plan » que le tapis chauffant.

Pour le concombre, l'utilisation du tapis a permis une réduction de la consommation d'énergie par plant d'environ 30 %, la réduction étant légèrement plus importante dans la

zone d'ambiance froide que dans la zone chaude. Ceci s'est traduit par une réduction du coût d'énergie de 21 % dans la zone chaude contre 25 % dans la zone à ambiance froide.

L'expérience menée par le CIDES et les différentes combinaisons analysées entre température d'ambiance, éclairage artificiel ou naturel et tapis chauffant ou non, permettent aussi de mettre en avant la spécificité des combinaisons optimales pour chaque production. En effet, la solution la plus économique en dépenses énergétiques pour la production de poivrons était une ambiance chaude, avec un chauffage par tapis chauffant et un éclairage aux lampes HPS; pour la production de tomates, c'était une combinaison entre un éclairage 100 % HPS, sans tapis chauffant et une ambiance froide; pour les concombres, la combinaison tapis chauffant et éclairage aux lampes HPS dans une ambiance froide donnait les meilleurs résultats. Il est possible que ces résultats dépendent aussi des caractéristiques de la serre utilisée pour réaliser cette expérience. Pour un producteur, il conviendrait donc d'analyser aussi les caractéristiques de sa serre et les besoins agronomiques spécifiques à sa production pour trouver la meilleure combinaison des différentes technologies disponibles.

Les expériences menées au centre de recherche en sériculture de la Louisiana State University ont montré une réduction de près de 30 % des coûts en énergie avec un système de chauffage au sol par rapport à un système de chauffage par l'air ambiant. Dans le cadre d'une expérience sur la production de tomates, ce système de chauffage a permis d'augmenter les rendements des plants de tomates de 6,8 %.

c) Impacts agronomiques

En réduisant la durée nécessaire pour faire pousser les plants, les tapis chauffants permettent de retarder la mise en route de la production et ces quelques jours supplémentaires vers la période de mi-mars à avril peuvent permettre de ne pas chauffer les serres alors que les températures sont encore fraîches. Les planchers chauffants permettent d'obtenir une température plus uniforme, ce qui augmente le pourcentage des plants qui arriveront à maturité en même temps et qui facilitent donc la mise en marché. La masse thermique plus importante des planchers chauffants permet de stocker la chaleur et continue donc à fournir de la chaleur aux plants même en cas d'interruption du fonctionnement de la bouilloire, lors d'une panne par exemple. Ceci permet donc d'éviter des pertes importantes lors de pannes de ce type. Cependant, cet avantage peut devenir un désavantage dans certains cas car le temps de réponse pour diminuer la température sera plus important en raison de l'inertie de la masse thermique.

d) Coûts d'investissement et PRI

En raison des coûts d'investissement élevés, le choix d'un plancher chauffant se fait dès la construction d'une nouvelle serre. La plus grosse partie de la consommation d'énergie dans le secteur des serres se fait entre la mi-décembre et la mi-mars. Les producteurs qui n'opèrent pas, ou partiellement seulement, leurs serres durant cette période auront plus de difficulté à rentabiliser un investissement dans un plancher chauffant. Ceci est un des paramètres expliquant la diffusion plus répandue de cette technologie en Ontario par

rapport au Québec car les serres y fonctionnent sur une période plus longue³⁹. La réduction de la consommation d'énergie permise par les technologies plus efficaces doit être suffisamment importante pour justifier un investissement tel qu'un plancher chauffant. Ainsi, cette technologie s'adresse davantage à de grandes serres qui produisent sur une longue période de production et qui ont donc un besoin élevé en chauffage.

Concernant le nouveau matelas capillaire chauffant, il est recommandé d'ajouter un isolant sous le matelas afin de maximiser les économies d'énergie⁴⁰. On peut utiliser des panneaux de styromousse, mais l'inconvénient est qu'ils sont fragiles et le risque de cassure est élevé si on marche sur les tables. Le thermo-foil plus flexible est cependant plus cher (valeur de $\pm 2.15\$ / m^2$). Selon le distributeur, le coût du tapis est de $30,56 \$ / m^2$. On doit y ajouter un réservoir d'eau chaude s'il n'est pas déjà présent, (valeur de $\pm 650 \$$ pour un réservoir de 40 gal.) et de la tuyauterie pour les raccordements (valeur variable selon la superficie à couvrir).

La période de retour sur l'investissement, pour l'achat du tapis uniquement, a été calculée par le distributeur en situation expérimentale et s'élève à 3,3 ans pour une utilisation annuelle⁴¹. Des données en situation commerciale seront bientôt disponibles.

e) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

Les serres *Le Cactus Fleur* utilisent un système à serpentins permettant un chauffage des plants au niveau des racines.

Les *Serres Daniel Lemieux* de St-Rémi, *les Serres et Jardins Girouard* de Ste-Madeleine ainsi que les *Serres Fortier* de St-Nicolas utilisent le matelas capillaire chauffant. Un projet de démonstration, en collaboration avec Hydro-Québec, devrait fournir des données validées vers la fin de l'année 2007.

D'après l'information obtenue, il n'y aurait pas de serres installées avec un plancher chauffant à l'heure actuelle au Québec.

6.3 L'ÉCLAIRAGE DE PHOTOSYNTHÈSE : LES LAMPES À HAUTE PRESSION AU SODIUM ET LES DIODES ÉMETTRICES DE LUMIÈRE (LED)

a) Description de la technologie

La croissance des plantes dans le secteur des serres repose sur une combinaison de différents éléments, dont l'éclairage, qu'il soit naturel ou artificiel. De façon générale, les techniques d'éclairage artificiel permettent de raccourcir la durée de la période de croissance des plants, ce qui implique des dépenses moindres en énergie. Différents types d'éclairage peuvent être utilisés dont notamment l'éclairage par des lampes au sodium à haute pression (HPS) et à l'aide de diodes émettrices de lumières (LED). L'amélioration de

³⁹ Gilles Cadotte, CIDES, communication personnelle.

⁴⁰ Sylvain Élie, Soleno textiles, communication personnelle.

⁴¹ Sylvain Élie, Soleno textiles, communication personnelle.

l'éclairage de photosynthèse peut aussi passer par l'utilisation de luminaires et de réflecteurs plus performants permettant une meilleure répartition de l'éclairage et une meilleure absorption de la lumière, donc une plus grande efficacité et une diminution de la consommation d'énergie. Une étude réalisée par le CIDES (Brossard *et al.*, 2005) a comparé les performances de trois types d'éclairage soit l'éclairage aux DEL en combinaison avec des lampes HPS, l'éclairage à l'aide de lampes au sodium à haute pression (HPS) uniquement et l'éclairage naturel pour des cultures de transplants de tomates, de concombres et de poivrons. D'autre part, des essais de combinaisons de nouveaux réflecteurs et de lampes HPS récentes⁴² ont été réalisés aux Serres du Saint-Laurent récemment⁴³. Ces essais visaient à accroître la performance de luminaires 400W en termes d'efficacité énergétique et de productivité des cultures par l'emploi d'ampoules et/ou de réflecteurs mieux adaptés.

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

L'étude du CIDES visant à évaluer l'efficacité de la technologie des DEL pour la production en serre a mené à la conclusion que « la technologie DEL est actuellement nettement inadéquate pour l'éclairage artificiel en serre avec une efficacité de l'ordre de 10 fois inférieure à celle des lampes à décharge HPS en terme de photosynthèse »⁴⁴. Les résultats ont montré que, pour le poivron, la période de culture a été en moyenne de 41,5 jours avec un éclairage aux HPS uniquement contre 43,5 jours avec un éclairage combiné aux DEL et HPS. Pour la tomate, l'éclairage aux HPS uniquement a permis de réduire d'un quart la durée de culture, soit une durée moyenne de 10 jours alors que l'éclairage combiné DEL et HPS a permis une durée moyenne de culture de 11,5 jours. Il ressort globalement que les lampes DEL sont donc moins performantes que les lampes HPS.

Concernant le projet réalisé aux Serres du St-Laurent⁴⁵, la première étape du projet a démontré qu'il est possible d'accroître l'efficacité des luminaires de 16 % en utilisant des ampoules SON-T Green Power de Philips plutôt que des ampoules conventionnelles Alto de Philips. La distribution de la lumière sur la partie utile des cultures peut également être améliorée de 10 % à 15 % en ajoutant un réflecteur plus performant que le réflecteur Sylvania tel que celui conçu par Kavita et distribué par Harnois.

La deuxième étape du projet visait à quantifier la performance lumineuse dans le temps de même que la performance énergétique des équipements identifiés au laboratoire lors de la première étape. Les ampoules SON-T Green Power et les réflecteurs Kavita/Harnois ont été évalués sur une période de deux années pour une culture de tomate sur dalles en situation réelle chez Savoura. Les tests ont été réalisés dans une chapelle d'une superficie de 278,4 m² où l'on a comparé l'efficacité énergétique des deux types d'ampoules (Son-T et Alto). Bien que la puissance active consommée par une ampoule de type Son-T (458,31 Watts) n'est supérieure que de 2,5 % à celle de l'ampoule ALTO (447,17 Watts),

⁴² Notamment une ampoule développée par Philips, la SON-T Green Power.

⁴³ Source : Claude Laniel, communication personnelle.

⁴⁴ Source : André Laperrière, Laboratoire des Technologies de l'Énergie d'Hydro-Québec (LTE).

⁴⁵ L'information sur ce projet de recherche provient du Syndicat des producteurs en serres du Québec.

l'augmentation de l'efficacité énergétique due au remplacement de l'ampoule ALTO par la SON-T a été de l'ordre de 14,7%.⁴⁶

c) Impacts agronomiques

L'éclairage artificiel permet en général d'augmenter la superficie foliaire par rapport à un éclairage naturel uniquement. Il permet de raccourcir la durée de la période de croissance des plantes.

d) Coûts d'investissement et économies d'énergie

L'investissement nécessaire au coût d'achat de la nouvelle lampe HPS (SON-T Green Power) s'élève à 23 \$, soit 13,95 \$ de plus que la lampe Alto de Philips couramment utilisée qui a un coût d'achat de 9,05 \$. De plus, il faut prévoir changer le réflecteur pour un modèle plus performant et adaptable à la lampe SON-T Green Power pour un coût de 21,50 \$ plus 2,50 \$ pour l'installation (marque Kavita/Harnois).

Avec ce type d'équipement, les économies d'énergie peuvent être estimées à près de 110 000 \$ pour un complexe serricole de 31 000 m² produisant 37,91 kg/m² de tomates pour une consommation d'énergie spécifique de 7,064 kWh/kg. Le coût supplémentaire associé au remplacement des ampoules et réflecteurs est estimé à environ 300 000 \$ (7528 luminaires à 39,95 \$, incluant le réflecteur). La période de récupération de l'investissement selon ce scénario serait donc d'un peu moins de 3 périodes d'éclairage artificiel (2,74 périodes).

Ainsi, pour un même niveau de production, ces deux éléments combinés ont donné des résultats probants dans l'efficacité énergétique et on a calculé une période de retour sur l'investissement de 2,74 ans uniquement. À cela on peut ajouter l'accroissement de la productivité dû à un éclairage adapté à la photosynthèse des plantes. Mentionnons toutefois qu'il s'agit d'une étude de cas réalisée sur un grand complexe serricole. La période de récupération de l'investissement pour un complexe de plus petite taille ou abritant un autre type de culture doit être évaluée au cas par cas en tenant compte des caractéristiques spécifiques à chaque serre.

e) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

L'entreprise Théorème innovation développe actuellement des lampes DEL au Québec. Les Serres du Saint Laurent inc. (Savoura) ont effectué des essais de nouveaux réflecteurs et de lampes HPS récentes, en particulier la SON-T Green Power de Philips.

⁴⁶ Tiré de Rapport final «Efficacité énergétique de l'éclairage photosynthétique en serre» préparé pour Unité Prospection et Évaluation Direction Efficacité énergétique Hydro-Québec. Étude réalisée par les spécialistes d'Hydro-Québec, de Spectralux, de l'Université Laval et de Savoura.

7. PRODUCTION MARAÎCHÈRE

Le secteur maraîcher se caractérise par une très grande diversité des productions et la variété des entreprises (taille, spécialisation, etc.) qui y oeuvrent. En conséquence, les problématiques et les interventions énergétiques ne peuvent être uniformes, selon par exemple que l'on s'adresse à une entreprise maraîchère de grande taille spécialisée dans la production de brocolis ou une exploitation qui récolte une variété de légumes sur des superficies plus modestes. De la même façon, la culture de carottes et de choux présente des différences agronomiques importantes. Autrement dit, les réponses technologiques pour diminuer la facture énergétique en production maraîchère sont complexes.

Dans ce cadre, pour la présente étude, les recherches se sont attardées aux cinq principales productions maraîchères du Québec (carotte, chou, laitue, oignon et brocoli). Parmi les trois points critiques de consommation d'énergie identifiés, soit l'usage de carburant pour les travaux dans les champs, la réfrigération des récoltes au champ ou en entrepôt et l'utilisation des pompes pour l'irrigation des cultures, l'accent est mis sur le premier. En effet, la consommation de carburant occupe une large place dans les dépenses du secteur (58 % de la consommation totale énergétique) et représente le dénominateur commun entre toutes les entreprises maraîchères. L'intervention la plus efficace en matière d'économie d'énergie semble donc pouvoir être faite par un travail réduit du sol (diminution des passages au champ et donc des carburants utilisés). Par ailleurs, la substitution des carburants traditionnels par une forme plus économique, moins chère à l'achat ou présentant un rendement énergétique plus élevé, peut également être envisagée. Le développement en matière de sources d'énergie alternatives sera abordé dans la deuxième partie du rapport.

7.1 LE TRAVAIL RÉDUIT DU SOL

Bien qu'il ne soit pas en tant que tel une innovation technologique, le travail réduit du sol est un changement de pratiques culturales qui peut avoir une certaine influence sur la facture énergétique. La promotion du travail réduit du sol repose d'abord et avant tout sur ses avantages environnementaux : diminution de l'érosion, amélioration de la structure du sol, etc. Par définition, le travail réduit du sol se traduit aussi par des passages au champ moins fréquents, et donc par une réduction de la consommation en carburant. Le semi direct est maintenant bien connu et relativement répandu en grandes cultures au Québec. La section 5.1 a traité de ce sujet en plus amples détails. Son utilisation en production maraîchère est toutefois moins connue.

a) Description de la technologie

Le travail réduit du sol est moins intensif que les méthodes conventionnelles de préparation du sol. Cette pratique culturale s'effectue par un travail primaire (brise le sol

ou le soulève) qui nécessite un ou 2 passages d'outils tels que le chisel ou pulvérisateur lourd. Ensuite, la préparation du lit de semence. Le travail réduit du sol laisse des résidus de récoltes sur au moins 30 % de la surface du sol après le semi. Les charrues à versoirs sont généralement privilégiées pour ce genre de travail (Club conseil en agroenvironnement, site Internet).

Une des techniques permettant le travail réduit du sol est la culture sur billons, une méthode de semi qui s'effectue sur des buttes (billons) permanentes façonnées l'année précédente à l'aide d'un sarcleur-billonneur. La culture sur billons vise également à minimiser l'usage de fertilisants et herbicides de synthèses (Action Billon, site Internet).

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Par rapport aux méthodes culturales traditionnelles, la culture sur billons exige davantage de précision et d'implication de la part du producteur et un bon encadrement technique pour apprivoiser la méthode de travail. La culture sur billons requiert également des équipements adéquats et bien ajustés. Aussi, la présence des billons amène des contraintes pour les déplacements dans les champs (Action Billon, site Internet).

c) Impacts agronomiques

La culture sur billons apporte plusieurs avantages agronomiques : amélioration du contrôle mécanique des mauvaises herbes, hausse de la température du sol dans le billon, meilleur drainage tout en conservant l'humidité par capillarité, réduction de l'érosion hydrique et éolienne, amélioration de la structure du sol (réduit la compaction), augmentation de la fertilité du sol, possibilité d'augmentation des rendements, favorise la réduction des herbicides et fertilisant (transition vers la régie biologique) et autres bénéfices environnementaux au plan de l'eau, du sol et de l'air (Action Billon, site Internet).

Cependant, le contrôle des mauvaises herbes apparaît critique en production maraîchère avec un simple contrôle mécanique. Il faut initialement un champ exempt d'infestation et des conditions optimales en cours de saison pour arriver à contenir une prolifération de mauvaises herbes. Le contrôle des mauvaises herbes est particulièrement difficile dans la culture de l'oignon parce qu'il porte une faible compétition aux mauvaises herbes (NC State University, 2004).

Ce problème, lié à la lutte contre les mauvaises herbes, a d'ailleurs retardé l'adoption de pratiques de travail réduit du sol en production maraîchère. De la même façon, les semoirs commerciaux adaptés au semi direct ont été développés pour plusieurs grandes cultures, mais n'ont fait que nouvellement leur apparition pour les légumes. La nature généralement intensive des cultures maraîchères a aussi ralenti l'adoption du travail réduit du sol dans ce secteur de production. En production maraîchère, les intrants sont élevés en matière de plants, de fertilisants, de pesticides et de dépenses reliées aux récoltes (main-d'œuvre surtout) contrairement aux cultures commerciales comme le soya et le maïs, la profitabilité du travail réduit doit donc être importante pour justifier son adoption.

D'autres considérations s'ajoutent : sans un ameublement suffisant du sol au printemps, les champs peuvent être trop compactés et mal drainés, retardant ainsi le démarrage de la

culture et donc le moment des premières récoltes. Certaines productions sont plus sensibles à ce problème que d'autres, la carotte par exemple nécessite un sol très ameubli. Dans le même sens, le sol demeure plus frais sous le chaume au printemps. Si le transplanter travaille mal dans ce résidu de récoltes, là aussi il y a risque de retarder les cultures et la maturité des plants sera moins uniforme. Dans une culture maraîchère commerciale, la variabilité de maturité représente un problème coûteux, surtout pour les légumes comme le chou où les plants ne sont récoltés qu'une fois. Il peut ne pas être rentable de faire revenir des travailleurs pour récolter les plants qui n'étaient pas matures au moment de la récolte principale.

Enfin, parmi les autres inconvénients d'un travail réduit du sol, on note celui de l'augmentation possible de la compaction du sol à long terme. Des études menées sur un horizon de 1 à 4 ans ont démontré des problèmes de compaction sévères qui empêchaient la machine à transplanter de pénétrer le sol. Dans le chou, cela a entraîné des chutes de rendement de 65 % par rapport aux méthodes traditionnelles de travail du sol.

L'amélioration des équipements en production maraîchère pour des pratiques de travail réduit du sol devrait permettre de résorber une partie des difficultés rencontrées et d'assurer des rendements équivalents aux pratiques conventionnelles. Différentes productions ont été cultivées avec succès en travail réduit du sol, notamment les choux, les carottes et les oignons (NC State University, 2004). Au Québec, jusqu'à maintenant, c'est essentiellement en production maraîchère biologique que sont utilisées les méthodes de conservation du sol. Biologiques ou non, à grande échelle, il semble encore difficile d'appliquer de telles méthodes en production maraîchère⁴⁷.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Le travail réduit du sol étant encore très peu répandu, il n'a pas été possible de documenter des coûts d'investissement reliés à son adoption. L'aspect économique du travail réduit du sol dans le secteur maraîcher n'a jamais été documenté au Québec à notre connaissance.

e) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

En France, un projet mené dans la culture de choux a comparé les effets de deux pratiques différentes de travail du sol, l'une dite classique avec retournement et outils animés (rotobèche, cultirâteau, remise à plat annuelle et travail des passages de roues), l'autre en planches permanentes avec des outils à dents (cultibutte et vibroplanche, outils à dents sur la base de la méthode Wens-Mussler⁴⁸, sans retournement, avec maintien des passages de roues non travaillés).

⁴⁷ Communication personnelle Claude Bilodeau, enseignant en Gestion et exploitation d'entreprise agricole, Cégep de Victoriaville.

⁴⁸ Il s'agit de méthodes de billonnage et de travail minimal du sol qui limitent généralement les interventions aux premiers 4 centimètres du sol.

Après 4 ans d'essais, aucune différence n'était observée sur les rendements en culture de chou, mais une réduction du temps de travail du sol de 30 % était constatée avec les planches permanentes. Malheureusement, les résultats de l'étude ne présentent pas de quantification en termes d'économies de carburant (Info du réseau, 2005).

f) Entreprises, contacts et références

Bref, bien que les pratiques de conservation (travail minimum du sol) soient en expansion dans le secteur maraîcher, il semble qu'elles soient encore présentes de façon marginale et peu souvent sur de grandes superficies. Les recherches dans ce domaine sont beaucoup stimulées par le mode de production biologique dont les méthodes de préparation du sol en production maraîchère visent à favoriser la vie dans le sol. Les techniques de planches permanentes et de billons y sont donc notamment privilégiées. D'ailleurs, le Cégep de Victoriaville devrait offrir un cours à l'hiver 2007 sur ces différentes méthodes culturelles en production maraîchère biologique. Certains producteurs maraîchers conventionnels (non biologiques) font également des essais pour planter des pratiques de travail minimum du sol. Les Jardins Paul Cousineau et fils inc. tentent l'implantation de billons permanents dans certaines productions. En théorie, cette pratique devrait permettre d'atteindre des économies de carburant allant jusqu'à 35 %.

7.2 LE REFROIDISSEMENT

La plupart des légumes nécessitent un entreposage se situant autour de 0 °C (Leblanc, 2005). L'entreposage doit maintenir les conditions ambiantes adéquates (température, humidité, composition de l'atmosphère) les moins dommageables pour la saveur, la texture et l'apparence des produits maraîchers (AAC, 2002). À ce titre, les contenants et la manutention des produits horticoles revêtent également un rôle majeur, non seulement dans la préservation de la qualité des produits, mais aussi dans l'efficacité énergétique lors de l'entreposage.

La diminution rapide de la température des produits, appelée le pré-refroidissement, s'effectue par plusieurs méthodes, notamment par la circulation d'eau froide (0-2 °C) à travers les légumes ou encore avec des blocs de glace. Les recherches menées au cours des années 80 ont permis des gains énergétiques en remplaçant l'eau par un système de blocs de glace : alors que la méthode conventionnelle consommait 32,2 kWh par tonne de légumes à pré-refroidir, les blocs de glace n'utilisent que 5,4 kWh (incluant la fabrication de la glace) pour refroidir la même quantité de produits horticoles (Vigneault *et al.*, 1990). Notons cependant que les machines à glace ayant peu évolué depuis la dernière décennie (elles sont composées des mêmes compresseurs), leur consommation énergétique n'a donc pas changé depuis (Yves Amesse, communication personnelle).

Récemment, l'innovation la plus importante en termes de gain d'efficacité énergétique provient des contenants dans lesquels sont manutentionnés, entreposés et transportés les produits horticoles, dès la récolte au champ. Ces contenants peuvent être utilisés lors du pré-refroidissement des produits horticoles. La conception des contenants intervient

directement sur le transfert de chaleur entre l'air et les produits, et par conséquent sur le temps de pré-refroidissement et la consommation énergétique en entrepôt.

a) Description de la technologie

Depuis le début des années 2000, une nouvelle gamme de contenants standards de plastique, réutilisables et recyclables, est disponible pour remplacer la traditionnelle boîte de carton ondulé ou de bois⁴⁹. L'optimisation des ouvertures de ce nouveau contenant (leur nombre, leur taille et leur répartition sur le contenant) permet d'atteindre un meilleur échange de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur ainsi que le maintien d'une humidité adéquate. Le contenant permet également d'optimiser l'efficacité des méthodes connues de refroidissement⁵⁰. Ces contenants représentent aujourd'hui 25 % du marché nord-américain de la manutention des produits horticoles (à l'exception de gros légumes tels que la citrouille et le chou). Par contre, au Québec, ils sont pour l'instant moins répandus.

À l'heure actuelle, IPL inc. est le seul fabricant de ces contenants au Canada. Un manufacturier américain propose une boîte similaire et quelques autres fabricants seulement (six ou sept) existent dans le monde. Les producteurs maraîchers du Québec qui veulent acquérir ces caisses doivent donc s'adresser à IPL inc⁵¹.

b) Impacts agronomiques et autres

Selon une étude menée par l'Université de California, l'utilisation de ces contenants réduit les pertes de qualité et les rejets de produit de 15 %. Les contenants présentent d'autres avantages lors de leur manipulation. En plus d'être emboîtables et rétractables, ils s'empilent de façon croisée, ce qui leur confère une plus grande stabilité lors de la manutention avec les chariots élévateurs par exemple (Clément Vigneault, communication personnelle).

c) Coûts d'investissement et coûts d'opération

Le coût de ces nouveaux contenants est de 4 à 5 fois plus élevé que les boîtes de carton (10 \$ vs 2 \$ environ). Par contre, ils sont réutilisables une centaine de fois, ce qui en fait une option non seulement plus écologique mais économique à long terme. L'achat des contenants et leur utilisation en circuit fermé (incluant transport à vide, lavage et stérilisation) réduisent de 80 % les coûts d'emballage des produits horticoles. D'ailleurs, il serait plus économique d'acheter les boîtes que de les louer : la location d'un contenant utilisé en circuit ouvert ne réduit en moyenne les coûts d'emballage que de 15 % par rapport au contenant de carton.

⁴⁹ Il s'agit d'un contenant développé et breveté au Québec conjointement par un chercheur (Clément Vigneault) du centre de recherche et de développement en horticulture (CRDH) et de l'Université Laval. Elles sont fabriquées par la compagnie IPL inc. située à St-Damien de Bellechasse. Ce contenant est communément appelé *Smart Crate* ou *SC*.

⁵⁰ Glace concassée, refroidissement sous vide, refroidissement hydraulique et refroidissement à air comprimé.

⁵¹ Communication personnelle, Mario Lemay, IPL inc.

Par contre, l'option d'achat en circuit fermé présente certaines limites qui expliquent d'ailleurs le faible taux de pénétration de ces contenants au Québec : l'achat convient aux entreprises de grande taille qui possèdent par exemple plusieurs sites de production (intra et hors Québec), leur propre flotte de transport et qui utilisent les contenants pour la distribution et le transit des produits horticoles à l'interne. À l'inverse, une entreprise de taille plus petite, qui a un faible volume de production et qui confie le transport à un tiers ne pourra pas assurer le retour de ses contenants. Aux États-Unis, des « poolers » offrent la location des caisses et s'occupent de la logistique du transport, mais il faut une masse critique suffisante pour couvrir les coûts reliés à ces opérations. Pour l'instant au Québec, aucun système de pool n'existe⁵².

Sur le plan énergétique, l'énergie économisée pour le procédé de refroidissement relié à l'utilisation de ces contenants représente de 5 à 15 % de l'énergie utilisée pour le refroidissement des produits horticoles. Cette valeur varie selon le produit et le système auquel les contenants réutilisables de plastique sont comparés (Clément Vigneault, communication personnelle).

d) Sites de démonstration, fermes, projets pilotes

Dans les essais qui sont menés à l'heure actuelle, on tente d'optimiser la circulation de l'air à travers les produits dans les contenants. La ventilation conventionnelle, à l'horizontal, serait moins efficace qu'une ventilation verticale des boîtes. En effet, une cheminée verticale permettrait une uniformisation de la température interne plus rapide, et par conséquent un pré-refroidissement plus efficace (plus rapide). Sur le plan de la qualité des produits horticoles, la ventilation horizontale est aussi susceptible d'assécher les produits (couches inférieures des produits) par un refroidissement excessif (Clément Vigneault, communication personnelle).

Peu de nouveautés sont recensées en matière d'efficacité énergétique en entreposage, particulièrement pour le pré-refroidissement au champ. La recherche et développement des dernières années se sont orientés vers la substitution des gaz réfrigérants plutôt que sur les technologies de réfrigération. Le Québec serait en retard sur ce plan, notamment par rapport à l'Europe⁵³. Pour l'entreposage commercial, une des nouveautés repose sur la circulation de glycol ou autre saumure : des pompes de circulation de glycol fixées à l'extérieur du bâtiment permettent l'hiver, lorsque le glycol atteint des températures très froides, des échanges de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. La circulation du glycol ne nécessite que de petits moteurs (3 à 5 HP) plutôt que des moteurs de force élevée (50 HP). Ce système ne présente toutefois un intérêt que pour un entrepôt en opération toute l'année.

⁵² Une des avenues possibles pour le Québec serait l'adoption d'un système de consigne relié à l'utilisation de ces contenants par les producteurs maraîchers.

⁵³ Communication personnelle avec M. Yves Amesse de Réfrigération Amesse inc. À Beauharnois, 450-225-3682, 6 novembre 2006.

Les systèmes appelés « free cooling » pourraient être très intéressants pour les producteurs maraîchers. Il s'agit d'une technologie qui consiste à utiliser l'air froid de l'extérieur pour refroidir le glycol qui circule à travers des serpentins extérieurs et qui sert de système de réfrigération. Cette technique a l'avantage de ne pas assécher les fruits et légumes comme les systèmes traditionnels de réfrigération tels les climatiseurs domestiques qui diminuent le pourcentage d'humidité et rejette de l'eau à l'extérieur. Le « free cooling » donne une qualité de fruits et légumes supérieure en maintenant l'eau dans les fruits et légumes. Cependant, ce système doit être utilisé durant les mois de froid soit, de l'automne au printemps. On peut donc envisager une utilisation pour les pommes et les légumes d'hiver seulement. Quant au coût d'installation, on ne peut avancer aucun chiffre, car chaque cas est différent. Cela dépend du volume à refroidir, du type de fruits ou légumes à refroidir, de la température de conservation, du type d'isolation de l'entrepôt, etc.⁵⁴. Des données de recherche supplémentaires devront être générées pour que l'on puisse se prononcer sur la rentabilité de cette technologie par rapport aux méthodes employées actuellement.

7.3 LE SYSTÈME D'IRRIGATION

L'irrigation constitue aussi une activité où de nouvelles technologies peuvent apporter une certaine réduction des coûts énergétiques. Au Québec, les superficies irriguées en culture maraîchère représentent 13 711 hectares sur un total de 40 000 hectares, soit près de 35 % des superficies totales en production.

L'irrigation vise à distribuer de l'eau aux cultures afin de permettre leur développement normal lorsque les conditions de pluviométrie naturelles sont inadéquates. L'irrigation permet également d'assurer un apport d'eau suffisant pour les plantes en pleine croissance lors de moments critiques (formation des graines entre autres) et ainsi d'obtenir la qualité et les rendements attendus. Outre ce rôle, l'irrigation peut servir à protéger contre le gel en aspergeant les plants d'eau.

Si l'irrigation suscite à l'heure actuelle davantage de préoccupations en matière de gestion de l'eau et de qualité du produit horticole, un intérêt peut également être porté aux caractéristiques des différents systèmes et leurs impacts sur leur coût d'opération (énergie). Ainsi, les méthodes d'irrigation extensive sont appelées à disparaître étant donné leur consommation énergétique élevée, la main-d'œuvre qu'elles exigent et les réserves d'eau limitées (Shortt, 2006). Outre la gestion de l'irrigation (horaire, utilisation des bilans hydriques et d'instruments de surveillance d'humidité des sols pour ajuster les arrosages), de nouveaux systèmes ont fait leur entrée sur le marché.

Actuellement, les différents systèmes d'irrigation utilisés dans la production maraîchère le sont pour répondre aux besoins de régie des différentes productions. Le développement de l'irrigation goutte à goutte dans la production maraîchère est venu du besoin de bien

⁵⁴ Communication personnelle avec M. André Desrocher de Car Micheal. 514-735-4361

approvisionner la plante sous le paillis plastique. De cette façon, la plante obtient l'eau nécessaire au bon endroit et en quantité suffisante sans la gaspiller.

L'efficacité énergétique n'est pas l'objectif qui motive le développement de nouvelles techniques d'irrigation. Il a plutôt été question de faciliter de déplacement des équipements, de superficie couverte, de quantité d'eau nécessaire, de minimiser la main d'œuvre nécessaire à l'opération irrigation et de répondre au besoin en eau des plantes afin d'uniformiser leur croissance en vue de leur commercialisation. Deux facteurs sont en jeu dans l'efficacité énergétique, le dimensionnement des conduites et le choix des équipements. Le dimensionnement des conduites a une influence sur l'efficacité énergétique, car plus le tuyau est petit et plus il y a de la friction pour tirer une quantité d'eau nécessaire à la pompe. On appelle cela la perte de pression par friction. Ainsi, un tuyau de plus petite dimension cause une pression à la hausse à la pompe. Celle-ci doit donc augmenter sa capacité pour répondre à la demande et commande donc plus d'énergie. Des tables de calcul existent pour trouver la bonne combinaison, mais la règle est qu'il ne faut pas perdre plus d'une demi-livre de pression par 100 pieds de tuyau.

Malheureusement, plusieurs producteurs préfèrent regarder les coûts des tuyaux dans un ordre de grandeur de prix plutôt que dans un esprit d'efficacité énergétique (les tuyaux plus gros sont plus chers). Cette façon de penser et d'agir provoque de nombreux bris mécaniques et de l'usure prématuée. Le tuyau principal qui relie la pompe aux divers tuyaux secondaires doit avoir une capacité suffisante et cela est souvent négligé, car on ajoute des tuyaux secondaires pour agrandir le système d'irrigation, mais on ne pense pas augmenter la capacité du tuyau principal et on se retrouve encore avec des pertes de pression par friction.

Le deuxième facteur est le choix des équipements, car ceux qui demandent une forte pression sont plus énergivores. Ainsi, les canons demandent 80-90 lbs de pression tandis que le « solid set » demande 40-50 lbs, les rampes 20-30 lbs et le goutte à goutte 10-15 lbs. Donc, selon le type de production, la conception du système doit tenir compte des particularités des besoins en eau des plantes et de l'utilisation durable de l'eau combinée à son efficacité. Des calculs d'efficacité énergétique n'ont jamais été faits pour chacun des systèmes, car chaque situation est unique⁵⁵.

a) Description de la technologie

Plusieurs techniques d'irrigation existent (voir Tableau 7.1). Ces dernières années, les systèmes goutte-à-goutte ont la faveur parce qu'ils permettent une irrigation de précision, ou micro-irrigation, qui économise l'eau et l'énergie. L'irrigation localisée par rampes perforées présente les mêmes avantages (économie d'eau et économie d'énergie parce que fonctionne à faible débit). Outre l'acquisition de goutte-à-goutte plutôt que des technologies par aspersion, la recherche d'efficacité en irrigation se traduit par le remplacement des canons mobiles par des bras mobiles (GULIK et TAM, 2006).

⁵⁵ Communication personnelle avec M. Roland Harnois 1-888-427-6647

b) Comparaison avec les technologies utilisées actuellement

Parmi les producteurs qui pratiquent l'irrigation au Québec, 50 % ont recours à un système d'irrigation avec gicleur, 20 % possèdent des canons d'irrigation et la même proportion utilise un système goutte-à-goutte (Ferland, 2006). Or, il apparaît que les systèmes goutte-à-goutte distribuent l'eau plus près du sol et avec une pression de beaucoup inférieure aux systèmes à asperseurs, ce qui permet un gain non négligeable d'efficacité, autant sur le plan agronomique qu'énergétique (Harnois 2006, GULIK et TAM, 2006).

Tableau 7.1
Comparaison des différents systèmes d'irrigation sur le plan énergétique

Système	Utilisation	Avantage/désavantage énergétique	Coût à l'acre à l'achat
Système portatif par aspersion (canons) ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Légumes • Pépinières 	Coût élevé d'énergie (115 PSI à la pompe)	450 \$/acre
Système mobile enrouleur canon ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Légumes (sauf pour germination) • Épandage d'eau usée • Pommes de terre 	Coût élevé d'énergie (140 PSI à la pompe et 80 PSI au canon)	600 \$/acre
Système par aspersion « solid-set » ²	<ul style="list-style-type: none"> • Arrosage de légumes • Protection contre le gel par aspersion 	Coût moyen d'énergie (60 PSI à la pompe -HP requis : 45 approximatif)	3080 \$/acre
Système goutte-à-goutte type permanent ²	<ul style="list-style-type: none"> • Arbres fruitiers • Petits fruits 	Économie d'énergie (basse pression)	1115 \$/acre
Système goutte-à-goutte à ruban saisonnier ²	<ul style="list-style-type: none"> • Légumes 	Économie d'énergie (basse pression)	1235 \$/acre
Système enrouleur-rampe harnois ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Légumes (germination et irrigation) 	Moins consommateur d'énergie que l'enrouleur canon	600 \$/acre

Notes : 1= installations effectuées sur des superficies de 80 acres.

2= installations effectuées sur des superficies de 10 acres.

Source : Harnois, 2006.

c) Impacts agronomiques

Sur le plan agronomique, le principal désavantage du goutte-à-goutte est qu'il ne protège pas contre le gel puisque sa distribution d'eau ne permet pas, par définition, l'aspersion des feuillages. Par contre, il permet un apport uniforme et localisé de l'eau.

d) Coûts d'investissement et coûts d'opération

À l'achat, les systèmes goutte-à-goutte présentent des coûts à l'acre plus élevés (entre 1115 et 1235 \$/acre). Par contre, tel que mentionné, les coûts d'opération sont inférieurs puisque de basses pressions de fonctionnement suffisent.

DEUXIÈME PARTIE

LES SOURCES D'ÉNERGIE ALTERNATIVES DURABLES UTILISÉES EN MILIEU AGRICOLE

La première partie du rapport a fait état des technologies disponibles pour répondre aux points critiques de consommation d'énergie identifiés dans le premier rapport présenté au printemps dernier. Cette deuxième partie dresse le portrait de l'utilisation des sources d'énergie alternatives durables en milieu agricole. Les sources d'énergie suivantes sont documentées : l'énergie éolienne, l'énergie produite à partir de biogaz (méthanisation), de biocarburant (biodiesel) et de biomasse, la géothermie et l'énergie solaire.

Certaines de ces sources d'énergie peuvent être soit produites, soit consommées par le secteur agricole. Ce rapport s'intéresse aux sources d'énergie consommées par le secteur et non aux sources d'énergie produites pour être vendues par le secteur agricole. Ainsi, la production d'énergie à la ferme est considérée uniquement si elle est destinée à l'autoconsommation. Les projets d'implantation d'éoliennes pour produire de l'électricité vendue au réseau d'énergie d'Hydro-Québec ne sont donc pas considérés. De même, la production de maïs destiné aux usines de fabrication d'éthanol n'est pas non plus abordée.

Pour chaque source d'énergie les aspects suivants sont documentés lorsque l'information était disponible : sa nature et son fonctionnement, les applications possibles à la ferme, incluant les points forts et les points faibles liés à son utilisation, les facteurs économiques, les projets pilotes, projets de recherche et sites de démonstration relatifs à cette source d'énergie.

8. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

8.1 DESCRIPTION

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et qui n'émet aucune substance polluante. Les éoliennes peuvent convertir l'énergie du vent en forme plus utilisable, telle que l'énergie électrique, ou encore conserver l'énergie mécanique pour le pompage d'eau ou d'air (RNC, site Internet).

8.2 APPLICATIONS POSSIBLES À LA FERME⁵⁶

Sur une entreprise agricole, l'énergie éolienne a deux usages principaux, soit la production d'électricité ou l'activation d'une pompe. Notons que dans le cadre de la présente étude, **n'est pas considéré le développement énergétique éolien issu du processus d'appel d'offres lancé par Hydro-Québec Distribution pour la production d'électricité éolienne.**

⁵⁶ À moins d'avis contraire, l'information provient du Réseau canadien pour l'énergie renouvelable de Ressources Naturelles Canada (RNC) disponible au site Internet suivant : http://www.canren.gc.ca/tech_appl/index_f.asp.

En effet, cette production énergétique régie par le *Règlement sur l'énergie éolienne et sur l'énergie produite avec la biomasse* du gouvernement du Québec ne concerne pas l'autoproduction, mais implique le raccordement au réseau électrique d'Hydro-Québec pour la production d'énergie éolienne en complémentarité avec l'hydroélectricité. Bien que les producteurs agricoles puissent participer à cette industrie du vent par l'aménagement d'une partie de leurs terres en parc éolien, le présent document ne s'intéresse qu'à l'autoproduction sur la ferme, en autonomie du réseau électrique.

- Production d'électricité

L'installation d'éoliennes sur une entreprise agricole permet de générer de l'électricité en autoproduction par l'utilisation d'aérogénérateurs⁵⁷ de petite et moyenne dimension et de génératrices diesel. Les petits utilisateurs en région éloignée ou en recherche d'autonomie (sans raccordement à un réseau d'électricité) doivent se tourner vers un système hybride, qui ajoute par exemple une cellule photovoltaïque à l'éolienne afin de stocker l'énergie dans des batteries et obtenir un approvisionnement adéquat en électricité.

- Pompage d'eau et d'air

Outre la production d'énergie électrique, l'énergie mécanique du vent peut activer une pompe rotative ou alternative. Comme c'est le cas pour une éolienne traditionnelle, une éolienne de pompage est composée d'un rotor, d'une tour et d'un socle, mais la génératrice est remplacée par une pompe hydraulique⁵⁸. L'éolienne peut aussi servir à l'entraînement mécanique d'un compresseur d'air.

La capacité des éoliennes de pompage est relativement petite, étant limitée par le diamètre du rotor (10 mètres). Elles atteignent un débit maximal d'environ 200 litres à la minute, à partir d'une profondeur de 30 m.

Une éolienne peut également servir à l'entraînement indirect d'une pompe. Un aérogénérateur fournit alors l'électricité à des pompes situées à une certaine distance. Dans certains cas, l'éolienne active un compresseur d'air pour l'aération des étangs ou points d'eau mis à la disposition de l'abreuvement du bétail.

Points forts

- Il s'agit d'une forme d'énergie durable et propre (ne requiert pas de carburant, ne produit aucun gaz à effet de serre ni déchets toxiques ou radioactifs) qui réduit les émissions de CO₂⁵⁹;
- Impacts environnementaux minimisés par la petite taille des éoliennes par rapport aux parcs éoliens (corridors aériens pour les oiseaux, etc.), facilitant d'autant plus l'acceptabilité sociale;

⁵⁷ Générateur de courant électrique à partir de l'énergie cinétique du vent.

⁵⁸ Souvent l'arbre du rotor entraîne directement la pompe, une boîte de vitesses n'étant alors plus nécessaire.

⁵⁹ Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel (RNC, site Internet). Pour l'instant, dans le cadre des appels d'offre, c'est Hydro-Québec Distribution qui encaisse les crédits environnementaux.

- Installation relativement facile et disponibilité de plusieurs fournisseurs d'équipements au Québec et au Canada.

Points faibles

- Source d'énergie intermittente : on ne peut compter uniquement sur le vent pour l'approvisionnement en électricité, et surtout en période de pointe d'utilisation d'énergie;
- Il est important de clarifier à quelle fin servira l'éolienne. Un système de contrôle spécifique est nécessaire pour chaque application (pompage d'eau, d'air, etc.). Les éoliennes exigent un réglage précis pour produire efficacement de l'énergie;
- Dans certains cas, l'installation d'éoliennes de petite puissance n'est pas permise, en raison de certaines limitations juridiques concernant le zonage;
- Acceptabilité sociale pas toujours évidente, dans le cas d'une petite éolienne, elle concerne surtout le voisin immédiat;
- Nécessite un site adéquat : les petites éoliennes doivent être installées dans un endroit situé loin des habitations et sans obstacle majeur. L'espace doit être suffisant également pour la turbine, dans une zone qui est assez loin des bâtiments, des cimes des arbres et d'autres obstacles;
- Le programme Encouragement à la production d'énergie éolienne (EPÉÉ)⁶⁰ du gouvernement du Canada n'est valide que pour les parcs éoliens d'une capacité minimale de 500 kW, et dans les régions éloignées et le Grand Nord de 20 kW, donc les petits projets n'y ont pas accès;
- Par rapport au coût de l'électricité au Québec, la rentabilité de l'énergie éolienne est questionnée.

8.3 FACTEURS ÉCONOMIQUES

Du point de vue de l'autoproduction, le coût et la rentabilité de l'énergie éolienne reposent sur un ensemble de facteurs :

- Le coût initial de l'éolienne et de son installation

⁶⁰ Dans ce cadre, un « appui financier sera offert pour la production d'une nouvelle capacité de 1000 mégawatts d'énergie éolienne au cours des cinq prochaines années. L'incitatif financier couvrira environ la moitié du coût actuel de la surcharge associée à l'énergie éolienne au Canada par comparaison à des sources d'énergie traditionnelles. Cet incitatif sera offert aux producteurs d'électricité pendant les dix premières années d'un projet » (Ressources Naturelles Canada, site Internet).

- Des unités individuelles d'aérogénérateur de taille plus petite coûtent jusqu'à 3000 \$ le kilowatt
- Le taux d'intérêt à payer sur l'argent investi
- La quantité d'énergie produite selon l'intensité du vent
 - L'importance d'évaluer la vitesse du vent à l'endroit envisagé pour l'installation des éoliennes
- Le coût des énergies concurrentes

En considérant que ce type d'éolienne est fonctionnel pendant 15 ans et que le facteur d'utilisation est de 30 % (15 ans à 8 736 heures/année à 30 %), une éolienne serait productive environ 39 312 heures. De plus, il faut ajouter aux frais d'acquisition de l'aérogénérateur, les frais d'installation qui sont estimés au même montant que celui considéré pour l'acquisition. Il faut donc calculer 6 000 \$ par kilowatt installé, et ce, pour 39 312 heures donc le coût de revient est d'au moins 15¢/ kWh, et ce, si aucun dépassement de coût ne survient et que le facteur d'utilisation est de 30 %. De plus, les frais d'entretien sont estimés à 10 % de la capacité de l'aérogénérateur (10 kW = 1 000 \$)⁶¹. Il faut donc ajouter, en moyenne, de 1 à 1,5 ¢/kWh pour l'entretien. En contrepartie, la production d'électricité à l'aide de génératrices diesel peut varier entre 0,25 \$ et 1,00 \$ du kilowattheure. Dans les endroits éloignés, l'éolienne peut donc être une alternative intéressante. Ce coût est toutefois loin d'être concurrentiel avec le prix de détail de l'électricité payé par les entreprises agricoles (tarif D) qui est d'environ 7¢/kWh.

Au Québec, il semble donc que ce ne soit pas rentable pour un exploitant agricole à moins d'être largement subventionné ou encore dans le cadre d'un projet particulier. C'est le cas d'une ferme laitière à vocation pédagogique du Saguenay–Lac-Saint-Jean qui sera transformée en établissement écoénergétique et où l'on retrouvera de l'énergie éolienne à petite échelle pour les besoins de l'entreprise.

Les petites installations sont encore très peu présentes sur les exploitations agricoles. Les solutions traditionnelles pour les usages auxquels pourraient servir cette source d'énergie alternative (pompage, arrosage, abreuvement) conviennent aux producteurs agricoles. La plupart du temps, les producteurs utilisent des batteries qu'ils font recharger au besoin sur le réseau d'électricité existant. Il s'agit d'usages saisonniers et la pose et la recharge des batteries sont relativement simples à effectuer. L'éolien apparaît plus compliqué et nécessite des installations un peu plus élaborées (il faut, par exemple, installer un ancrage pour l'éolienne)⁶².

Le coût semble également être un facteur dissuasif pour les producteurs agricoles. En moyenne, que l'on parle de panneaux solaires ou de petites éoliennes, l'acquisition des équipements se situe entre 2800 et 5000 \$. Par exemple, le pompage sur une longue

⁶¹ Données provenant d'un site internet actuellement en construction par RNCAN; contact avec Claude Faucher de RNCAN.

⁶² Lili Haury, Écosolaire international, communication personnelle.

distance activé par un système de 4 panneaux solaires coûte 3800 \$ (incluant la pompe de surface).

À plus grande échelle, une éolienne de puissance plus élevée peut répondre aux besoins énergétiques globaux d'une entreprise agricole. Mais il s'agit d'investissement d'un tout autre ordre de grandeur et qui implique des considérations plus importantes pour le stockage de l'énergie dans l'optique de l'atteinte de l'autonomie énergétique. Une éolienne de 50 kW de puissance installée représente un investissement initial d'environ 250 000 \$ et les frais d'entretien sont encore mal connus (durée de vie utile des pièces, coût de remplacement, etc.). Mais surtout, à partir du moment où le réseau d'électricité est présent et avec les tarifs actuels, le coût de l'énergie est difficile, voire impossible à concurrencer. Un projet pourrait être rentable dans un contexte de rachat des surplus par Hydro-Québec (donc raccordement au réseau), à un prix qui couvre le coût de production de l'énergie obtenue par l'éolien⁶³.

Il semble donc qu'il n'y ait pour l'instant au Québec sur des entreprises agricoles aucun petit projet de production d'énergie éolienne, en autonomie du réseau, pour l'activation de pompes à air ou à eau par exemple, ou encore pour la production électrique où l'énergie produite serait stockée. Par exemple, le pompage d'air dans des étangs avec des éoliennes en acier ne résisterait pas aux conditions climatiques. Le pompage à eau est techniquement plus compliqué et son développement convient davantage pour un contexte africain plutôt que québécois. Finalement, stocker l'énergie coûte très cher et est polluant, ce qui annule l'avantage « vert » de l'éolien. Bref, au Québec, le coût actuel de l'électricité est bas et le restera pour les 5 prochaines années, ce qui rend les projets de petites éoliennes peu concurrentiels pour les producteurs agricoles⁶⁴.

8.4 ÉTUDES DE CAS, PROJETS PILOTES

L'essor du développement éolien depuis le début des années 90 au Québec repose, tel que mentionné, sur l'intervention de l'État pour développer l'industrie éolienne, en complémentarité et en tenant compte de la capacité du réseau d'Hydro-Québec. Dans cette optique, le développement éolien en cours au Québec, via les appels d'offre, positionne davantage les producteurs agricoles comme des acteurs passifs (mise à la disposition de leur terre) plutôt que d'encourager l'autoproduction sur leur ferme. Dans le même sens, on constate de plus en plus d'implantations de groupes d'éoliennes (parc éolien) afin d'obtenir des économies d'échelle, ce qui n'est pas compatible avec la production éolienne à petit volume sur une entreprise agricole. De récentes initiatives démontrent cependant la volonté des producteurs agricoles de contrôler davantage la production énergétique éolienne, par l'entremise notamment de coopératives de solidarité. Ces projets concernent néanmoins la production d'énergie dans l'optique d'une vente au réseau.

⁶³ Lili Haury, Écosolaire international, communication personnelle.

⁶⁴ Communication personnelle avec M. Jean-Louis Chaumel, expert en éolien, UQAR, 31 octobre 2006.

Au Canada, l'Association canadienne de l'énergie éolienne consacre une partie de ses activités au développement d'éoliennes de petites puissances (300 W à 300 kW). Dans ce cadre, des études de cas ont été menées. Deux concernent des entreprises agricoles.

- Ferme non raccordée au réseau dans le sud de l'Alberta (turbine de 10 kW)⁶⁵

Une entreprise agricole de l'Alberta a acquis un petit système éolien qui lui permet de fonctionner indépendamment du réseau. Le propriétaire désirait avoir une alimentation électrique autonome et réduire l'impact sur l'environnement de l'utilisation de l'énergie électrique de sa ferme et de sa maison. Le système d'énergie éolienne de l'entreprise agricole assure l'alimentation électrique de la résidence familiale (4 membres), d'un atelier d'usinage, d'un puits d'eau et l'éclairage de la cour.

Le courant électrique est produit par une éolienne de 10 kW installée sur une très haute tour de 33 mètres. Selon la carte du vent du Canada, la région a une vitesse de vent moyenne annuelle de 18 km/h (5 m/s) à 10 mètres de hauteur. Le courant produit par la turbine éolienne est stocké dans des batteries d'une capacité de 1000 Ah⁶⁶. Un onduleur de 5 kW alimente ensuite la ferme et la maison en courant alternatif de 120 et 240 volts. Afin de réduire les charges de pointe et la consommation d'énergie électrique, la plupart des appareils consommateurs d'énergie - la cuisinière, le sèche-linge, l'appareil de chauffage et le chauffe-eau - sont alimentés en gaz naturel. Le matériel complémentaire nécessaire pour le contrôle de l'énergie électrique comprend un commutateur inverseur, des dispositifs de contrôle du chargement des batteries, un système de surveillance et une protection du circuit. Lorsque les batteries sont chargées et que l'éolienne produit toujours de l'électricité, un régulateur de charge de délestage « décharge » le courant en excès pour le préchauffage de l'eau du chauffe-eau.

L'acquisition et l'installation de la turbine éolienne, de la tour, des batteries et du matériel complémentaire d'équilibrage du système ont totalisé 60 000 \$ (1997).

- Ferme non raccordée au réseau dans le centre de l'Alberta (turbine de 10 kW)

En 1989, un producteur de grandes cultures (blé) s'est installé une éolienne de 10 kilowatts pour combler ses besoins en électricité, y compris une résidence familiale de quatre membres, un atelier d'usinage, un puits d'eau et l'éclairage de la cour. L'exploitation était déjà raccordée au réseau, mais l'objectif de l'agriculteur était d'avoir un système indépendant des fluctuations de prix et qui aurait moins d'impact sur l'environnement, comparativement au charbon utilisé pour produire l'électricité du réseau. Là aussi, l'éolienne a une hauteur de 33 mètres et des batteries à électrolyte gélifié et à revêtement

⁶⁵ Source : Association canadienne de l'énergie éolienne,

<http://www.smallwindenergy.ca/fr/Overview/CaseStudies/OffGrid.html#Alberta1>

⁶⁶ Le courant doit d'abord être redressé, c'est-à-dire que le courant alternatif est converti en courant continu à une tension de 48 volts C.C.

en acier⁶⁷. L'installation a coûté 55 000 \$. Le système produisant plus d'énergie électrique qu'il n'en utilisait, le producteur agricole a ajouté un système de « charge de délestage » afin d'utiliser l'électricité excédentaire pour le chauffage des locaux.

- Ce qui est en développement pour le stockage de l'énergie éolienne (en Europe surtout):

La production d'hydrogène par hydrolyse, couplée à l'électricité issue d'éoliennes, est un moyen de stocker l'énergie éolienne lorsqu'on est en autonomie du réseau. On accumule l'hydrogène qui est transformé en électricité au besoin. Il y a des tentatives en ce sens en Norvège : on y a lancé en 2004 un projet qui vise une totale autonomie énergétique sur une de ses îles. Produite par des éoliennes, de l'électricité servira par hydrolyse à produire de l'hydrogène qui alimentera des piles à combustible. Le Danemark commence aussi à envisager de fabriquer de l'hydrogène à partir d'éoliennes. Il semble aussi que l'hydrogène puisse être directement utilisé dans les moteurs à combustion (de tracteurs par exemple). La compagnie AirLiquide (groupe international spécialisé dans les gaz industriels et médicaux et les services associés) y travaille. Ces technologies sont à l'étape de la recherche scientifique et ne seront pas disponibles pour des applications commerciales avant de nombreuses années.

⁶⁷ Type de système : Turbine éolienne à axe horizontal, pales au vent (en amont de la tour). Modèle : Générateur BWC EXCEL, puissance nominale de sortie : 10 kilowatts. Capacité de la batterie : 1000 Ah à 48 V C.C.

9. LA MÉTHANISATION (BIOGAZ)

9.1 DESCRIPTION

La méthanisation est un procédé de dégradation naturel de la matière organique (acides gras, graisses, protéines de déchets d'animaux, etc.) par une flore microbiologique en l'absence d'oxygène (processus anaérobie). La méthanisation consiste à capter les gaz (essentiellement le méthane) produits par la décomposition de ces matières organiques. Ce gaz hautement combustible peut être utilisé pour produire de la chaleur ou de l'électricité ou encore comme carburant dans des véhicules.

9.2 APPLICATIONS POSSIBLES À LA FERME

La production de biogaz concerne d'abord les entreprises de production animale. La gestion des déjections produites sur les entreprises animales, porcines en particulier, représente une des principales problématiques agroenvironnementales à l'échelle nord-américaine. La problématique de la gestion des lisiers et la pénétration encore relativement faible des technologies de traitement sur les fermes, à l'échelle commerciale, laissent place à beaucoup de recherche et de développement dans le domaine. Parmi les systèmes de traitement de lisier disponibles, un repose sur la méthanisation. Ce traitement produit des biogaz qui peuvent être utilisés comme source d'énergie de remplacement ou qui peuvent servir à générer de l'électricité. Ainsi, le système a un double emploi, mais jusqu'à maintenant la production d'énergie apparaît nettement secondaire. De plus, comme cela a été mentionné dans le cas de l'énergie éolienne, ce qui est analysé dans le cadre de la présente étude est la production à des fins d'auto-utilisation, et non pas la production d'électricité pour vendre au réseau d'Hydro-Québec. Jusqu'à maintenant, le contexte et la politique québécoise en matière énergétique ne sont pas adaptés pour favoriser le rôle des producteurs agricoles comme producteurs d'énergie. Pour que les exploitations agricoles se lancent dans la production de méthane qui est convertie en électricité, il est par exemple nécessaire qu'un tarif de rachat de l'électricité produite soit clairement déterminé. C'est ce qui a favorisé l'essor d'unités de production de biogaz en Europe, notamment en Allemagne.

Lorsque l'entreprise agricole souhaite maximiser la production de méthane afin de produire de l'électricité ou de la chaleur, la construction de digesteurs distincts des fosses de stockage de lisier est nécessaire. Ceux-ci sont toujours chauffés afin de maintenir la température à un niveau optimal pour les populations bactériennes. Si la matière organique digérée passe préalablement par l'étape du brassage, de la matière organique provenant d'autres sources peut être ajoutée aux déjections animales.

- Chauffage

Dans les zones climatiques où les bâtiments d'élevage doivent être chauffés, une unité de production d'eau chaude fonctionnant au méthane peut être ajoutée au système de bio-digestion. Cette bouilloire, dont la capacité varie en fonction du volume de méthane produit (selon la quantité de lisier à traiter), remplit alors une double fonction : la production d'eau chaude pour les besoins sanitaires des porcheries et l'alimentation de boucles de chauffage. Cet usage du méthane contribue alors directement à abaisser la consommation d'électricité ou de combustibles fossiles que l'entreprise utilise normalement. Les besoins en chauffage variant beaucoup d'une saison à l'autre, le méthane est donc ainsi valorisé que de façon ponctuelle, et il faut prévoir qu'à certaines périodes il sera simplement brûlé dans une torchère.

- Production d'électricité

Dans les régions où les politiques énergétiques rendent possible l'autoproduction d'électricité, il est possible d'ajouter une génératrice au système. Cette génératrice, qui peut être en opération pratiquement à l'année longue, peut combler une partie ou la totalité des besoins en électricité de l'entreprise. Lorsque la quantité d'électricité produite par la génératrice excède les besoins de l'entreprise, l'électricité en surplus pourra être retornée au réseau et créditée de la facture si le principe de la facturation nette⁶⁸ s'applique. De plus, le fonctionnement de cette génératrice dégage une quantité de chaleur non négligeable qu'il est possible de récupérer pour chauffer de l'eau.

Points forts

- Répond d'abord à un besoin de traitement des lisiers, ce qui peut être favorable à son adhésion par les entreprises agricoles. Comme traitement de lisier, la méthanisation à les avantages suivants :
 - Destruction des pathogènes et des odeurs;
 - Minéralisation des éléments fertilisants;
 - Faible volume de solide.
- Source d'énergie verte qui peut réduire la libération de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et ce, parce que le méthane capté est brûlé. Il n'est pas encore acquis que cet avantage puisse se traduire en gain financier pour les producteurs par la vente de crédits de carbone. Par contre, dans un contexte de préoccupation sociale à l'égard des changements climatiques, il peut être utilisé à titre d'argument de vente surtout si le producteur visé cherche à obtenir l'approbation de la communauté pour poursuivre ses activités d'élevage.
- La présence d'une problématique environnementale de disposition de lisier, d'odeur ou d'acceptabilité sociale est un facteur favorable à la diffusion d'une telle source d'énergie alternative à la ferme.

⁶⁸ Hydro-Québec Distribution utilise l'expression mesurage net.

Points faibles

- Les substrats ont des efficacités énergétiques inégales, allant de 50 kWh_{el}/tonne pour le fumier de vache à 140 kWh_{el}/tonne pour le fumier de volaille (Electricgaz, 2006);
- L'opération quotidienne du système nécessite une main-d'œuvre relativement qualifiée, à moins que le producteur détienne un contrat de service offert par le promoteur pour un suivi et contrôle en continu des opérations de la station (Groupe de travail, 2004);
- Méthane : il s'agit d'un biogaz à manipuler avec précaution parce qu'il s'agit d'un gaz hautement inflammable;
- Si l'opération n'est pas effectuée correctement, elle peut être potentiellement nuisible pour l'environnement : la méthanisation produit du CO₂ et du méthane, donc contribue à l'effet de serre (si le méthane n'est pas utilisé comme combustible);
- Nécessite des installations très sophistiquées;
- Le financement : les coûts sont tels qu'il faut bénéficier d'économies d'échelle pour que le système s'avère généralement avantageux et ce, surtout dans les provinces ou États qui n'offrent pas de subventions ou qui ne permettent pas la production d'électricité comme au Québec;
- L'ajout d'une bouilloire de haute capacité pour la production d'eau chaude n'apparaît pas une solution rentable à moins de conditions très particulières que l'on ne peut s'attendre à trouver sur une base régulière;
- La génération électrique grâce à l'incorporation d'une génératrice n'est intéressante que si la province ou l'État a une politique favorable à cet effet, ce qui n'est pas le cas au Québec en ce moment. Cette politique doit inclure une puissance installée maximum dépassant 50kW, la possibilité de facturation nette et préféablement le « green pricing ». Si la possibilité de vendre l'électricité en surplus n'existe pas, la génératrice doit être exclue.
- L'octroi de subventions semble essentiel à l'installation de telles unités sur les entreprises agricoles. Deux types de subventions existent, celles qui sont relatives à l'environnement et celles qui sont relatives à la production d'énergie. Le suivi de ces politiques est fondamental et elles doivent être diffusées aux producteurs.
- Répond d'abord à un besoin de traitement des lisiers. Comme traitement de lisier, la méthanisation a les désavantages suivants :
 - Teneur en eau de la fraction solide élevée;
 - Taux de capture du phosphore relativement moins élevé.

9.3 FACTEURS ÉCONOMIQUES

Sur la base des informations fournies par un promoteur, le coût de l'électricité produite par biogaz se situerait entre 0,075\$ et 0,11\$/kWh. La réalité se situe très probablement au-delà de cette estimation si l'on tient compte de l'ensemble des coûts. Lors de la *Journée sur la méthanisation des engrais de ferme* tenue le 26 janvier 2007, un représentant du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario faisait état dans sa présentation que, pour inciter les producteurs à produire de l'électricité à partir de la méthanisation des lisiers en Ontario, l'incitatif monétaire doit se situer entre 13 et 22 ¢/kWh. Ces coûts sont supérieurs au coût actuel de l'électricité au Québec, le rendant donc non concurrentiel du strict point de vue des coûts énergétiques (CAMIRAND, 2006). Toutefois, un producteur aux prises avec un problème de gestion des déjections animales que la biodigestion pourrait contribuer à résoudre pourrait conclure à la rentabilité d'un tel investissement.

9.4 ÉTUDES DE CAS, PROJETS PILOTES

En termes de pénétration en milieu agricole, les projets de biogaz sont très présents en Europe (5000 unités) et en Inde (plus de 100 000) par exemple, et extrêmement répandus et communs en Chine (des millions). Par contre, leur présence est beaucoup plus modeste en Amérique du Nord où l'on répertorie un peu plus de 200 projets aux États-Unis et une dizaine au Canada.

Au Québec, le procédé de traitement anaérobiose à température ambiante est opérationnel et en démonstration sur une ferme porcine à Sainte-Edwidge-de-Clifton (5000 porcs/année, Système Bio-Terre) depuis 1999. Pour l'implantation de cette technologie, la ferme a pu bénéficier du soutien technique et financier du Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ), d'une contribution de 200 000\$ dans le cadre du programme Prime-Vert, et d'un crédit d'impôt remboursable. Une seconde entreprise porcine a un système Bio-Terre. Il s'agit de la ferme St-Hilaire située à St-Odilon-de-Cranbourne, qui détient 3000 porcs en engrangissement et 470 truies pour une production de 9000 porcs par année. Une entreprise de poules pondeuses, Les Oeufs d'Or inc., située à Val-d'Or, a le système LIPP.

Dans les 3 cas, les entreprises utilisent le système pour la production de chaleur avec une bouilloire, pour remplacer le propane notamment. La production d'électricité pour revendre au réseau d'HQ n'est pas rentable pour le moment, puisque le prix payé par HQ est inférieur au coût de production de l'électricité à partir de biogaz. Ce coût est en moyenne de 0,075 à 0,11\$/kW, selon une moyenne des résultats obtenus sur des entreprises qui ont un système en opération depuis au moins 1 an, aux États-Unis et dans l'Ouest canadien⁶⁹.

⁶⁹ Éric Camirand, Électricité de Québec, communication personnelle.

En Ontario, une ferme laitière de 200 têtes s'est installée un digesteur anaérobiose afin d'atteindre l'autosuffisance énergétique. La transformation du fumier de vache en électricité s'est traduite par une diminution de la facture énergétique d'environ 2480 \$/mois pour représenter aujourd'hui entre 20-25 \$/mois (Buon *et al.*, 2006).

- En ce qui concerne les équipements et coûts nécessaires au projet, ils sont les suivants : Généatrice à moteur biénergie et un automate : 100 000 \$;
- Aménagement d'une mini-fosse pour le bioréacteur (capacité 500 m³) à même la fosse existante. Coût global de 200 000 \$, en plus du temps investi.

L'électricité produite par le biodigesteur représente 750 kWh/jour. Le méthane produit au quotidien est converti en électricité (36 %) et chauffage (48 %), le reste étant perdu sous forme de chaleur. La moitié de l'énergie produite sous forme d'eau chaude régularise la température du biodigesteur, le reste va au chauffage des deux maisons situées sur l'exploitation. Pour l'instant, le surplus d'électricité est donné au réseau d'Hydro-Ontario. Un contrat de 0,145 \$/kWh en période de pointe pourrait néanmoins être signé sous peu (Buon *et al.*, 2006).

Enfin, toujours en Ontario, un projet d'étude menée par l'Université de Guelph évaluera l'efficacité des digesteurs anaérobiques sur quatre fermes laitières de taille moyenne. L'étude repose sur un partenariat financier avec Agriculture et Agroalimentaire Canada, Thunder Bay Agricultural Research Station et les Producteurs laitiers du Canada en sont le coordonnateur.

10. LA GÉOTHERMIE

10.1 DESCRIPTION

Il existe différents systèmes de chauffage utilisant des sources géothermiques. Les pompes à chaleur géothermique utilisent la chaleur contenue dans le sol, ou l'eau (des nappes phréatiques ou de surface) et reposent sur différents types de systèmes (indirect ou à expansion directe, vertical ou horizontal). Les pompes à chaleur géothermique récupèrent la chaleur du sol via un fluide réfrigérant circulant à travers un puits horizontal ou vertical : pour les puits horizontaux, les boucles sont enterrées à environ un mètre sous le sol (ou moins) et occupent une surface correspondant à 1,25 à 2 fois la superficie à chauffer tandis que pour les puits verticaux, la profondeur du forage va dépendre des besoins en énergie et peut atteindre plusieurs dizaines voire centaines de mètres. Dans un système à expansion directe, le même fluide réfrigérant circule ensuite à travers un plancher chauffant, pour chauffer le sol, ou éventuellement à travers un serpentin situé devant un aérotherme, pour chauffer l'air. Dans un système indirect, on trouve d'abord un échangeur de chaleur primaire qui va utiliser du glycol pour capter et transmettre la chaleur du sol, puis un système secondaire où la chaleur est restituée à une boucle d'eau chaude, grâce à un groupe frigorifique inversé.

10.2 APPLICATIONS POSSIBLES

La géothermie a été expérimentée dans différents types d'exploitations agricoles au Québec, dans le reste du Canada et ailleurs, notamment des serres pour des cultures ornementales et des légumes, ainsi que des bâtiments d'élevage, notamment des porcheries. La fonction de cette source d'énergie est de fournir de la chaleur. On notera également que la géothermie peut aussi servir à chauffer des ateliers ou la résidence d'un exploitant agricole.

Dans les élevages porcins, l'énergie récupérée dans le sol alimente un plancher chauffant qui peut permettre un chauffage localisé des porcelets pour les maternités-pouponnières. En plus des avantages économiques liés à l'économie d'énergie, une amélioration des performances agronomiques peut aussi être observée grâce à ce chauffage localisé des porcelets (gain de poids des porcelets et confort des truies selon le même principe que pour les tapis chauffants) (d'après Minea, HydroQuébec, conversation personnelle).

Dans le secteur des serres, la géothermie suscite de plus en plus d'intérêt en raison des coûts de plus en plus importants en chauffage, dus à la hausse des prix de l'énergie. Dans le secteur des serres, cette source d'énergie pourrait théoriquement fournir jusqu'à 75 % de la consommation d'énergie annuelle d'une exploitation, le reste des besoins en

chauffage devant alors être assumés par un système d'appoint (chauffage au propane ou au mazout par exemple). Les systèmes de géothermie avec plancher chauffant présentent un intérêt particulier à cause de la capacité de stockage thermique du plancher qui permet un nivellement de la température entre le jour et la nuit, réduisant le besoin pour une source d'énergie d'appoint découlant de la demande en chauffage particulièrement élevé la nuit pendant l'hiver. En serriculture, les applications sont possibles aussi bien pour des cultures de fruits et légumes que dans les cultures ornementales. Le forage des puits se fait à proximité des serres et si la chaleur est diffusée par l'air plutôt que par un plancher chauffant, des cabinets de ventilation peuvent être installés sous les tables des cultures. L'entretien est minime dans le cas d'un plancher chauffant tandis que les filtres de ventilation doivent être changés régulièrement dans un système de ventilation, de la même façon qu'avec un chauffage au mazout.

Points forts

- Une des caractéristiques de la géothermie est la constance de la chaleur fournie par ce genre de système. Ceci peut constituer un avantage par exemple l'hiver car la charge de chauffage peut être particulièrement importante la nuit dans les serres;
- L'énergie fournie par le système de géothermie est une énergie gratuite. Contrairement aux énergies fossiles, elle ne risque pas d'augmenter dans le futur. Ainsi, selon les prévisions de prix futurs des autres sources d'énergie, la géothermie pourrait s'avérer une solution plus économique à moyen ou long terme;
- Stabilité de l'approvisionnement par rapport à d'autres énergies renouvelables;
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre;
- Pour le chauffage des serres, l'installation d'une pompe à chaleur géothermique peut se faire dans les bâtiments déjà existants sans entraîner de modifications importantes de la structure de la serre;
- Disponibilité de fournisseurs d'installations au Québec.

Points faibles

- L'investissement initial peut être assez élevé, notamment pour les puits verticaux. La période de retour sur investissement peut ainsi atteindre de 12 à 15 ans en raison du coût de construction plus important des puits.
- La superficie plus importante nécessaire pour les puits horizontaux peut constituer un frein à son adoption car il ne peut y avoir de constructions permanentes au-dessus des puits de captage de la chaleur. De plus, dans le cas des grandes serres, les superficies nécessaires peuvent être très importantes.

10.3 FACTEURS ÉCONOMIQUES

À l'heure actuelle, il existe certains programmes aux niveaux fédéral et provincial ainsi que chez Hydro-Québec soutenant l'investissement dans l'énergie géothermique. Certains de ces programmes ont toutefois été mis en place autant pour s'attaquer à la problématique des gaz à effet de serre qu'à la problématique des coûts énergétiques. En effet, la substitution de ce type d'énergie aux sources plus conventionnelles telles que le mazout ou le propane permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre de manière importante.

D'autre part, avec la hausse des prix de l'énergie, tant pour l'hydroélectricité que pour le mazout et le propane, la géothermie devient de plus en plus rentable. Selon les scénarios retenus et les spécificités des exploitations agricoles, il serait possible de rentabiliser l'investissement dans ce type d'installation en quatre à huit ans. Un ordre de grandeur de l'investissement nécessaire pour l'installation d'un système géothermique est d'environ 15 000 \$ pour un bâtiment de 1000 m² (ceci incluant le champ de captation, la pompe géothermique et le cabinet de ventilation ou un plancher chauffant). Cet ordre de grandeur peut varier selon la nature du puits (vertical ou horizontal). Dans un exemple d'une serre au Québec, le coût du projet initial était de 454 000 \$ (incluant les travaux de conception, l'achat et l'installation des équipements) duquel il faut déduire une subvention initiale d'Hydro-Québec de 154 000 \$ en raison des économies de kWh réalisées annuellement. Ceci implique donc un coût net du projet de 300 000 \$. Les économies annuelles réalisées sur l'exploitation étaient de 65 800 \$, ce qui implique donc une période de retour sur l'investissement de 4,5 ans. D'après une présentation d'Équatera, un promoteur de systèmes géothermiques, ce type de système permettrait des économies d'énergie de 60 % et plus.

De façon générale, il convient de prendre une perspective de moyen-long terme lors d'un projet de transition en géothermie. Par exemple, il y a eu un certain intérêt pour la géothermie en 1999-2000 en raison d'une hausse subite du prix du gaz naturel et du propane. Cet intérêt a diminué par la suite en raison d'une baisse des prix avant de reprendre au cours des dernières années. Selon Hydro-Québec, la période de retour sur investissement est d'environ sept ans pour des pompes à chaleur à expansion directe et un système à puits horizontal (fourchette de cinq à huit ans). De plus, il existe un risque de gel ou d'épuisement du puits car le système ne sert généralement dans ce cas qu'au chauffage et pas à la climatisation.

Pour les systèmes géothermiques, on parle généralement d'un coefficient d'efficacité de 4, ce qui signifie que pour 1 kWh demandé à Hydro-Québec pour faire fonctionner le système, 4 kWh sont restitués pour chauffer la serre ou le bâtiment d'élevage.

10.4 ÉTUDES DE CAS, PROJETS PILOTES

- Dans le cadre du *Programme favorisant l'utilisation de sources d'énergie non conventionnelles dans l'industrie serricole*, le MAPAQ a

subventionné en partie onze projets d'installation de systèmes de géothermie dans le secteur serricole. Ces systèmes sont encore en phase d'implantation et il faudra attendre au plus tôt au printemps 2007 pour connaître les résultats préliminaires. Mentionnons toutefois que pour plusieurs d'entre eux, les coûts initialement prévus ont été dépassés et que différents problèmes de faisabilité ont été rencontrés. Il faudra donc attendre un certain temps et avoir un certain recul pour juger de la pertinence et de la rentabilité d'installer des systèmes géothermiques en production serricole.

- Une serre expérimentale à Chicoutimi a installé un système géothermique à puits horizontal dans le but de tester un nouveau type de réfrigérant plus favorable à l'environnement et de valider le concept d'expansion directe et de chauffage par plancher radiant pour des serres.
- Les serres Riel à St-Rémi : le coût du projet était de 300 000 \$, avec une subvention de près de 129 000 \$ d'Hydro-Québec. Le MAPAQ a investi 50 000 \$ dans le projet et le producteur agricole a investi environ 150 000 \$. L'économie d'énergie permise par ce système était estimée à un peu plus de 61 000 \$ par an. Le promoteur (Équatera) indique donc une PRI de 2,5 années. Si le producteur devait supporter intégralement le coût de ce type d'investissement, il faudrait plutôt compter le double.
- Pour les Serres de la Vallée (à Ste-Véronique), le coût du projet était de 100 000 \$, dont les deux tiers étaient pris en charge par Hydro-Québec et le MAPAQ (subventions). L'investissement du client était de 35 000 \$. Les économies prévues pour ce producteur sont estimées à 19 000 \$ par an. La construction étant très récente, (fin 2005/début 2006), les premiers résultats tangibles sont attendus seulement cette année.
- L'ITA de St-Hyacinthe, en collaboration avec Hydro-Québec, va mettre en place un système à puits verticaux pour ses serres. Cette expérience sera plus proche des modèles de serre rencontrés au Québec que le prototype mis en place au Lac-St-Jean;
- Serres Frank Zyromski inc. a installé un système de chauffage géothermique;
- Serres Lavallée à Mont-Laurier.

Personnes contacts : Vasile Minea (HydroQuébec, Lac-St-Jean), Paul Paradis (Équatera)

11. L'ÉNERGIE PROVENANT DE LA BIOMASSE

11.1 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE

L'énergie de biomasse regroupe les formes d'énergie renouvelable d'origine végétale (c'est-à-dire résultant de la photosynthèse). Ces différentes formes d'énergie peuvent provenir du bois, des cultures agricoles ou d'autres résidus organiques (graisses animales ou végétales par exemple). Il existe différents systèmes de chauffage utilisant la biomasse comme source de combustible à la place du mazout ou du propane. Les principales sources de biomasse utilisées au Québec sont les granules de bois provenant des résidus des scieries. D'autres sources d'approvisionnement en biomasse directement produites par le secteur agricole sont en développement comme le fumier de poulet ou le panic érigé, une graminée qu'il est possible de transformer en granules pouvant être substituées au bois.

La culture du panic érigé aurait été identifiée comme une culture intéressante pour la production de fibres et d'énergie, dans l'Est de l'Ontario et le Sud-Ouest du Québec. Le panic érigé peut servir à la fabrication d'éthanol ou de granules utilisés pour le chauffage. Il s'agit davantage d'un nouveau débouché pour les producteurs agricoles cherchant à diversifier leurs productions que d'une culture pouvant servir comme source d'énergie à la ferme. En effet, les applications sont destinées au marché industriel, pour la production d'éthanol et l'industrie des pâtes et papiers, et non pas au marché agricole. Pour l'instant, l'intérêt pour la consommation à la ferme n'apparaît donc pas évident.

Un système de chauffage à la biomasse se compose généralement d'un réservoir de combustible (ou réservoir intermédiaire), d'une chambre de combustion, d'une chaudière et d'une colonne d'évacuation. Les producteurs utilisant le chauffage à la biomasse installent aussi (ou maintiennent) un système d'appoint fonctionnant au mazout ou au propane afin de compenser une éventuelle défaillance du système à la biomasse.

11.2 APPLICATIONS POSSIBLES À LA FERME

L'application principale de la biomasse comme source d'énergie est le chauffage de bâtiments. Le chauffage à la biomasse se retrouve de plus en plus en serriculture en raison des coûts croissants en énergie, mais aussi dans des élevages. En serriculture, l'installation de chauffage à la biomasse se rentabilisera plus rapidement sur les entreprises ayant une période de production couvrant des mois de grand froid puisqu'il permettra d'économiser davantage de coûts en combustible. Ainsi, la rentabilité d'un chauffage à la biomasse sera maximale dans des exploitations serricoles ayant des besoins en chauffage tout au long de l'année. Par ailleurs, le chauffage à la biomasse, parce que le coût du combustible est inférieur à celui du mazout ou du propane, peut éventuellement permettre de devancer la

production de quelques semaines. Cet aspect met en lumière la nécessité de faire une réflexion approfondie avant de précéder au choix du système de chauffage, en tenant compte des différents paramètres comme les besoins en chauffage, le cycle de production, le type de culture, la stratégie de commercialisation, etc.

Le chauffage à la biomasse peut aussi subvenir aux besoins en chauffage dans des productions animales, comme le porc. Il existe par exemple des systèmes de combustion alimentés avec des granules, du brand de scie ou des copeaux de bois pouvant chauffer une bouilloire dont l'eau sera ensuite distribuée selon les besoins des différentes zones du bâtiment d'élevage.

La production de chaleur peut être régulée par un thermostat et il existe des systèmes régulant l'alimentation en combustible du compartiment de combustion selon la température. Pour les systèmes utilisant un chauffage par eau chaude comme vecteur de chaleur, il sera souvent utile d'avoir un réservoir d'eau chaude permettant de maintenir un certain niveau de chaleur même en cas d'interruption temporaire de la combustion.

Points forts

- Le principal avantage d'un système de chauffage à la biomasse est la réduction des dépenses annuelles en chauffage, en particulier avec la hausse des prix des énergies fossiles. Par exemple, dans le cas des serres Fortier, l'utilisation du bran de scie au coût de 19 000 \$/an (incluant la manutention et la main-d'œuvre) a permis d'économiser 100 000 litres de mazout par an, dont le coût en 2006 dépasse les 65 000 \$.⁷⁰ Toutefois, avec l'évolution récente de la situation dans le secteur forestier, les approvisionnements en biomasse d'origine forestière pourraient être compromis. De même, les avancées du côté des autres débouchés pour la valorisation des sous-produits d'origine forestière pourraient éventuellement venir modifier le prix de ces sous-produits.
- Le chauffage à la biomasse est aussi une des solutions à la diminution des émissions de gaz à effet de serre en substituant des énergies moins polluantes à des carburants fossiles.
- Le chauffage à la biomasse va généralement permettre au producteur de prévoir plus facilement ses dépenses en énergie au cours du cycle de production, surtout si on compare aux hausses parfois brutales du prix des hydrocarbures.
- Il convient de noter que dans le cadre du Programme d'encouragement aux systèmes d'énergies renouvelables (PENSER) de RNCAN, 25 % du coût d'achat et d'installation d'un système de chauffage à la biomasse admissible (i.e. écoénergétique et produisant peu d'émissions) est remboursé jusqu'à hauteur de 80 000 \$.⁷¹

⁷⁰ Selon les données publiées par la Régie de l'énergie, le coût moyen du mazout pour les dix premiers mois de l'année 2006 s'est élevé à 0,69 \$/litre, avant escomptes de volume.

⁷¹ Pour être admissibles les systèmes doivent être mis en service avant le 31 décembre 2006.

Points faibles

- La disponibilité de la ressource peut être une source de problème dans la mesure où il peut être plus difficile ou plus coûteux de se procurer du bran de scie pendant les mois de décembre à février. Cette question est évidemment plus problématique pour les producteurs chauffant leur bâtiment durant cette période de l'année, ce qui n'est pas tout le temps le cas dans les productions serricoles. Le cas échéant, le producteur doit prévoir les infrastructures nécessaires au stockage de la biomasse pendant une période plus ou moins longue.
- La biomasse peut être difficile à manipuler et va nécessiter le développement d'une infrastructure pour son transport et son traitement. Dans le cas de producteur ne disposant pas de ressources à proximité de son exploitation, le transport de la biomasse jusqu'à l'exploitation agricole peut devenir un obstacle à l'adoption du chauffage à la biomasse en raison des coûts de transport.
- Le prix et la disponibilité des ressources en bois-énergie peuvent varier car la compétition peut être intense pour acquérir des fibres de bois de bonne qualité.
- De plus, la qualité du combustible utilisé peut varier, ce qui peut engendrer des problèmes d'encrassement et de gestion des cendres, voire de bris des équipements. Généralement, les coûts de main-d'œuvre vont être plus élevés avec ce type d'énergie qu'avec le chauffage au mazout ou au propane par exemple.
- Les améliorations possibles ont trait notamment aux performances des chaudières, notamment dans leur capacité à brûler de façon convenable des résidus de bois ou d'autres types de biomasse de qualité variable.
- Le manque de polyvalence des équipements implique un approvisionnement en granulés de bois d'une taille spécifique à la bouilloire, ce qui peut être limitatif.

11.3 ASPECTS ÉCONOMIQUES

Le coût d'installation d'un système de chauffage à la biomasse est variable selon les producteurs et le type d'exploitation. Selon diverses expériences, il semble possible de rentabiliser en quelques années seulement un chauffage à la biomasse, tant pour le chauffage dans des productions animales (ex : production porcine) que dans le secteur des serres (trois ou quatre années selon les cas). Le coût d'achat et d'installation d'un système de chauffage à la biomasse peut être d'environ 150 000 \$ pour chauffer un espace de 10 000 pieds carrés. Des subventions du MAPAQ, de Ressources naturelles Canada et de divers organismes peuvent substantiellement réduire cet investissement initial.

Sur les Serres Demers, le coût au kW/h est d'environ 0,025 à 0,0275 \$ avec le chauffage aux résidus de bois (en incluant le coût du combustible, les coûts de main-d'œuvre liés à l'entretien et à l'opération du système), contre 0,055 \$/kWh pour une chaudière au gaz naturel. Les inconvénients sont que les éventuelles pannes ont plus de conséquences que dans le chauffage au gaz naturel, car les réparations sont plus compliquées à effectuer. Les producteurs doivent aussi parfois faire un compromis entre le coût d'approvisionnement en matière première et les coûts d'opération (granules de bois de faible qualité, voire même le maïs-grain coûtent moins cher que des granules de bois de bonne qualité, mais vont générer plus de résidus dans la chaudière et donc un entretien plus fréquent).

11.4 ÉTUDES DE CAS, PROJETS PILOTES

Au Québec, les Serres Demers et les Serres Fortier possèdent tous deux des systèmes de chauffage à la Biomasse (granule de bois). De nombreuses autres serres sont également équipées de tels systèmes.

Ferme Schurman sur l'Île-du-Prince-Édouard⁷² : il s'agit d'une ferme porcine qui, à partir de 1985, a installé une chaudière à ballots de paille. À mesure que l'exploitation s'est agrandie, le producteur a modifié son système de chauffage, notamment en faisant l'acquisition d'un système à la biomasse alimenté au bran de scie. Le système permet de combler les besoins en chauffage d'une porcherie de 700 truies et d'un atelier et de la maison du propriétaire de la ferme. Dans cet exemple, le système est composé de deux appareils de combustion de 160 kW chacun. Le coût d'acquisition s'est élevé à environ 130 000 \$, mais ceci inclut les frais de modifications des bâtiments et la mise en place d'un système de chauffage sous le plancher. Le surcoût du système de chauffage à la biomasse par rapport à un système au mazout est estimé à 70 000 \$. Les dépenses annuelles pour acheter le bran de scie et des déchets de bois sec sont évaluées à 7 600 \$. Ceci permettrait de remplacer l'utilisation de 123 000 litres de mazout par an. En 2000, alors que le prix du mazout se situait à 0,45 \$/litre, ceci représentait une économie d'environ 55 000 \$. Aujourd'hui, alors que le prix du mazout s'élève à 0,69 \$/litre en moyenne depuis le début de 2006, ceci représente donc une économie de près de 85 000 \$. Les estimations réalisées dans le cadre de l'étude de Ressources naturelles Canada en 2001, faisaient état d'économies annuelles de 45 000 \$.

Denco Entreprises⁷³, une exploitation de serres basée au Nouveau Brunswick, a installé en 1992 un système de chauffage à la biomasse de 130 kW, alimenté aux copeaux de bois. Le coût d'acquisition du système était en 1992 de 16 000 \$, qui correspondait à l'acquisition du brûleur, de la chaudière et de la cheminée. Le système de diffusion de la chaleur a été transformé au fur et à mesure que l'entreprise s'est développée. Le propriétaire de cette

⁷² RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Étude de cas, systèmes de chauffage à la biomasse, Schruman farm Ltd*, 2001, 6 p.

⁷³ RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Étude de cas, systèmes de chauffage à la biomasse, DENCO Entreprises*, 2001, 6 p.

entreprise estime que le coût d'installation du système de chauffage à la biomasse a été amorti en trois ans et demi. Il n'a pas été possible d'obtenir de données sur le coût d'acquisition des copeaux de bois permettant de faire fonctionner le système.

12. LES BIOCARBURANTS

12.1 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE

Il existe différentes formes de biocarburants, selon le type de plante et le procédé de transformation dont ils sont issus :

- Biodiesel : les biocarburants issus des plantes oléagineuses, fabriqués à partir d'huiles végétales obtenues par pressage des graines, ou «huiles brutes», de soya ou de canola. On trouve aussi dans cette catégorie les esters méthyliques d'huile végétale, obtenus par transformation chimique de ces huiles végétales;
- Bioéthanol : les biocarburants obtenus à partir d'alcool produit avec des plantes contenant du sucre ou de l'amidon;
- Biogaz : les biocarburants produits par fermentation anaérobiose de matière organique (graisses animales, déchets alimentaires, déchets végétaux, cultures, etc.) qui peuvent ensuite être utilisés comme carburant une fois purifiés. Les biogaz ont fait l'objet d'une section distincte (section 9 sur la méthanisation).

La filière éthanol est la plus fréquemment évoquée, mais elle constitue davantage un nouveau débouché pour le secteur agricole, en tant que producteur d'énergie, qu'un moyen de réduire les dépenses en énergie à la ferme. En Amérique du Nord, l'éthanol est fabriqué généralement à partir de maïs et de céréales comme le blé et l'orge. Il est ensuite utilisé soit comme ingrédient de mélange dans les carburants utilisés par le grand public (mélange à faible teneur en éthanol), soit comme carburant pour des véhicules spéciaux dits polycarburants (mélange à haute teneur en éthanol). Pour l'instant, la production d'éthanol est davantage développée que la production de biodiesel. En effet, la capacité de production d'éthanol au Canada était estimée en 2004 à 217 millions de litres contre 10 millions de litres pour le biodiesel et elles pourraient atteindre respectivement 1400 et 500 millions de litres à l'horizon 2010⁷⁴. Toutefois, puisque la très grande majorité des équipements agricoles fonctionnent à base de diesel, l'utilisation de l'éthanol pour des applications à la ferme ne présente pas un grand intérêt. Dans le cadre de cette étude, la filière éthanol ne sera donc pas analysée.

⁷⁴ François Dupont, Coop Fédérée. Présentation effectuée dans le cadre du colloque sur les perspectives 2006.

Le biodiesel est beaucoup moins inflammable que le diesel de pétrole, qui brûle à 50 °C (120 °F). Le biodiesel pur (B100) ne s'allume que si la température atteint au moins 150 °C (300 °F). Le point éclair (la température à partir de laquelle le produit s'allumera quand il sera exposé à une étincelle ou à une flamme) d'un mélange de biodiesel, suivant la composition, se situe entre ces températures.

Une des questions les plus courantes sur l'utilisation du biodiesel touche à son rendement par temps froid. Un temps glacial peut nuire au rendement des mélanges à haute teneur de biodiesel (teneur supérieure à 5 % de biodiesel). Les températures minimales assurant un bon fonctionnement du biodiesel varient suivant les matières premières de fabrication. Les solutions des problèmes par temps froid sont les mêmes que les solutions adoptées pour le diesel de pétrole. Les mélanges allant jusqu'à B5 servent davantage, en principe, par temps glacial.

En dehors des filières consistant pour les producteurs à produire les cultures servant de matières premières pour les industries du secteur de l'énergie produisant des biocarburants, il existe des filières courtes permettant avec des investissements réduits de produire le carburant nécessaire au fonctionnement des tracteurs et de la machinerie. Par exemple, une de ces filières courtes est celle de l'Huile Végétale Pure (HVP), qui se caractérise par une pression à froid de graines oléagineuses (colza, tournesol), suivie d'une décantation et d'une filtration. Il résulte de ce processus un coproduit, appelé tourteau gras, qui peut être utilisé en alimentation animale, pour l'alimentation des porcs ou des bovins (Source : Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement).

Il s'agit donc des mêmes huiles dont on se sert en cuisine, seules les conditions sanitaires de fabrication diffèrent. Les moteurs diesel peuvent accepter une variété d'huiles, de sources aussi variées que le tournesol, le canola, le soya ou des huiles usagées comme les huiles de friteuse d'un restaurant. Il convient cependant de garder un certain niveau de qualité pour ces huiles en les filtrant afin d'éviter les risques d'encrassement des filtres du moteur et une diminution des performances.

Plusieurs projets reposant sur cette technologie se sont d'ailleurs développés récemment, notamment en France. Il semble que la rentabilité de ces projets repose non seulement sur la plus grande autonomie en matière d'énergie mais aussi sur la production de protéines végétales utilisables à la ferme. En raison des investissements nécessaires, il semble que les projets collectifs mettant en commun la presse utilisée pour produire l'huile végétale pure disposent d'un certain avantage en termes de rentabilité. Il existe des presses mobiles facilitant ce partage de la ressource. Il est possible que la rentabilité de ce type de solution soit plus vite atteinte en raison des coûts plus élevés du carburant en Europe.

12.2 UTILISATIONS POSSIBLES À LA FERME

Le biodiesel, comme son nom l'indique, peut être substitué au diesel utilisé pour faire fonctionner les tracteurs et les machines agricoles utilisées à la ferme. Il peut être utilisé pur ou mélangé à du diesel. On distingue par exemple le B100, le B20 ou le B5 selon que le

carburant est composé à 100 % de biodiesel, à 20 % ou à 5 %, le reste étant du pétrodiesel. On peut mélanger le biodiesel à toute concentration avec le diesel de pétrole et l'utiliser dans un moteur diesel sans apporter de modification ou après avoir apporté une légère modification au moteur ou à l'infrastructure d'alimentation en carburant (installation d'un système de carburation spécial afin d'optimiser le fonctionnement du moteur selon le carburant). Avec les moteurs récents utilisant la technologie d'injections à rampe commune (« common rail »), on manque de recul pour savoir si les carburants « verts » comme le biodiesel ont une influence négative sur la fiabilité des moteurs ou sur leur niveau de performance. Au Canada et au Québec, les températures plus froides impliquent qu'il faut soit utiliser des biodiesel à faible teneur en carburant d'origine végétale (B2 à B20), soit utiliser un système de préchauffage du carburant. Les mélanges courants sont le B2, le B5, le B10 et le B20.

L'huile végétale pure peut être utilisée comme carburant pour les tracteurs. Selon des expériences menées en France, elle peut être utilisée en mélange à 30 % avec du carburant diesel sans modification des moteurs. Elle peut aussi être utilisée à des taux plus élevés mais il peut être nécessaire pour cela de modifier le circuit de carburation du moteur. L'huile végétale pure peut aussi être utilisée comme combustible pour le chauffage. Il faut cependant utiliser un système de préchauffage de l'huile avant de pouvoir la brûler. Cette technique semble plus développée en Allemagne pour l'instant.

Points forts

- Le biodiesel est produit à partir de ressources renouvelables locales, qu'il s'agisse de produits agricoles ou de résidus agro-industriels comme les déchets d'abattoir, l'huile de cuisson recyclée, l'huile vierge impropre à l'alimentation. Il peut en résulter une nouvelle valeur pour des produits qu'on destinait auparavant aux dépotoirs, d'où de nouveaux marchés pour les industries locales et la réduction des coûts d'élimination des déchets du gouvernement et de l'industrie.
- Le biodiesel est non toxique et totalement biodégradable, ce qui le rend plus facile à manipuler et meilleur pour l'environnement. Par exemple, un déversement de biodiesel se dégradera plus vite qu'un déversement de carburant pétrodiesel. Le biodiesel offre aussi des avantages pour la qualité de l'air, dont une baisse des émissions d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone et de particules.
- Au cours du cycle de vie -- de la culture d'oléagineux ou de la récupération des déchets animaux à la fabrication et à l'utilisation du biodiesel --, le biodiesel pur produit quelque 64 à 92 % d'émissions de gaz de serre en moins que le diesel de pétrole, suivant l'huile ou la graisse utilisée dans la production. Un mélange à 20 % de biodiesel avec du diesel de pétrole (B20) produit quelque 12 à 18 % d'émissions en moins et un mélange à 2 % (B2) produit 1 à 2 % d'émissions en moins. Le biodiesel peut ainsi contribuer à répondre aux

préoccupations suscitées par les changements climatiques. En outre, quand on utilise des déchets en les transformant en biodiesel, on les détourne des dépotoirs où ils auraient pu produire du méthane, lequel contribue aux changements climatiques.

Points faibles

- Jusqu'à présent, les essais observés au Canada, notamment en Saskatchewan, mettaient en évidence les limites de l'utilisation des biodiesel comme additif au diesel. Des essais menés en Saskatchewan semblent indiquer en effet que les performances des biodiesels varient selon la proportion de biodiesel par rapport au pétrodiesel. L'étude, qui portait sur la consommation de carburant et les émissions de GES pour des opérations de travail du sol secondaire et de semi de soya, montrait des performances très proches entre le diesel et le biodiesel B20 (mélange de 20% de biodiesel et de 80% de diesel) en termes de consommation de carburant et d'efficacité énergétique. Cependant, une efficacité énergétique plus faible et une consommation plus importante de carburant ont été observées pour les biodiesels B50 et B100 (contenant respectivement 50 % et 100 % de biodiesel)⁷⁵. La substitution complète du biodiesel au diesel sur les fermes ne semble pas pour l'instant très pertinent d'un point de vue économique. Néanmoins, une substitution partielle par l'incorporation d'huile végétale pure dans le diesel semble possible.
- La définition de standards de qualité et l'existence de programmes d'exemption de taxes reliés à l'utilisation de ce type de carburant est encore incertain et varie d'une province à l'autre et d'un pays à l'autre.

12.3 ASPECTS ÉCONOMIQUES

Le prix d'achat d'une presse serait d'environ 5800 \$ en France et varierait entre 2500 \$ et 11 250 \$ aux Etats-Unis, selon les modèles⁷⁶. Le coût total pour produire 6000 litres de biodiesel et 12 tonnes de tourteau (sous-produit) est estimé à près de 12 000 \$ (inclus la presse, le stockage de l'huile, le nettoyeur et la filtration de l'huile). Dans le cas français, en valorisant le tourteau de soya à environ 0,17 \$/ha, le prix de revient de l'huile végétale pure est estimé à 0,70 \$/litre. Ce prix de revient peut descendre à 0,48 \$/litre en cas d'investissement collectif dans la presse et d'un plus gros volume de soya pressé (48 tonnes au lieu de 12 tonnes). Au Québec, la question de la valorisation des tourteaux de soya est un des paramètres à approfondir pour déterminer si ce type d'installation pourrait être

⁷⁵ Extrait de Li, Mc Laughlin, Patterson et Burtt, Fuel efficiency and exhaust emissions for biodiesel blends in an agricultural tractor. Canadian Biosystems Engineering 48:2.15-2.22, 2006
<http://www.engr.usask.ca/societies/csa/c0532abstract.pdf>

⁷⁶ D'après : <http://www.croplandbiodiesel.com/store.html> et ADEME 2004.

rentable. Si le tourteau peut être intégré directement dans les rations des animaux de la ferme ou d'une autre ferme, il contribue à la rentabilité de l'investissement. De même, la facilité d'utilisation et le partage possible des équipements entre plusieurs producteurs peuvent améliorer la rentabilité des presses à huile.

Par exemple, dans un cas tiré de l'expérience de producteurs de la région Alsace, en France, le coût de production du colza est estimé à 400 € par hectare, soit 576 \$⁷⁷. À titre de comparaison, la valeur de la tonne de tourteau, utilisé pour l'alimentation animale, est estimée à 120 € par tonne, pour un rendement moyen de deux tonnes par hectare, soit 240 € par hectare (ou environ 345 \$ par hectare). La production d'huile végétale pure à l'hectare était comprise entre 800 et 1000 litres par hectare. Compte tenu de ces éléments, des frais d'immobilisation et des coûts d'opération de la presse à canola⁷⁸, le prix de revient du litre d'huile végétale pure était estimé à 0,50 € par litre (ou 0,72 \$ par litre), pour un producteur cultivant 6 hectares de canola. Ce coût diminuait à 0,33 € par litre (ou 0,475 \$ par litre) en cas d'investissement collectif et de production à plus large échelle. Avec un coût du carburant diesel oscillant entre 0,80 € et 1,00 € par litre depuis quelques années (soit 1,15 à 1,44 \$ par litre), il devient aisé de comprendre l'intérêt pour les producteurs agricoles français de substituer de l'huile végétale pure à leur carburant diesel, au moins en partie.

12.4 ÉTUDES DE CAS, PROJETS PILOTES

- Le collège de Kemptville de l'Université de Guelph en Ontario fait fonctionner un tracteur au mélange diesel B5 depuis l'été de 2005. Le carburant actuellement en usage se compose de 5 % de biodiesel (produit à partir de déchets animaux) et de 95 % de carburant diesel. Le diesel est fourni par Pétro-Canada, alors que le biodiesel l'est par Ressources naturelles Canada, par l'intermédiaire du Centre fédéral des émissions. Le tracteur, fourni par la compagnie John Deere, est un modèle 5325 de 2005, à chargement frontal et à traction avant auxiliaire à transmission mécanique. Cette expérience, qui s'étalera jusqu'en 2007, permettra de vérifier l'efficacité de ce type de mélange dans nos conditions climatiques.
- Des essais d'utilisation du biodiesel ont été réalisés sur des autobus du réseau de transport municipal de la communauté métropolitaine de Montréal (projet Biobus). L'étude a montré comment le biodiesel se comportait dans des conditions courantes, en particulier par temps froid. Elle a démontré que le biodiesel est un carburant viable dans une région comme Montréal où le climat peut donner lieu à de très basses températures.

⁷⁷ Taux de change, novembre 2006, 1 € = 1,44 \$.

⁷⁸ Notons que dans le cas français, une aide régionale équivalente à 17,5 % du coût d'investissement est incluse dans ce prix de revient.

- En Ontario, un producteur de céréales et de soya a entrepris de récupérer l'huile usée issue du processus de transformation des fèves de soya qu'il vendait à un transformateur torontois. Cette huile usée, après filtration, est utilisée comme carburant dans les tracteurs de la ferme⁷⁹.

⁷⁹ http://www.farmcentre.com/francais/articles/master_article_f.htm?id=328

13. L'ÉNERGIE SOLAIRE

13.1 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE

À chaque heure, le soleil envoie sur la terre une quantité d'énergie équivalant à 120 000 terawattheures, soit près de 650 fois la production annuelle d'électricité d'Hydro-Québec⁸⁰. Cette énergie est gratuite et disponible dans la mesure où une technologie permet de la capter d'une manière économique. L'énergie solaire génère évidemment une grande quantité de chaleur, qui n'est que partiellement captée et retenue par l'atmosphère, la terre et les objets qui s'y retrouvent. Pour pouvoir retenir davantage de cette énergie qui touche la surface de la terre, il faut une technologie permettant de la capturer, la concentrer et, au besoin, la transformer en énergie électrique. Il existe différentes technologies permettant de le faire et qui ont potentiellement des applications dans le secteur agricole. Ces technologies sont les murs perforés et les cellules photovoltaïques ou panneaux solaires.

Les murs perforés ou murs solaires utilisent directement l'énergie du soleil pour chauffer l'air. Ils ne visent pas à transformer l'énergie solaire en électricité contrairement aux cellules photovoltaïques. Les murs solaires et leur utilisation à la ferme sont décrits en détails aux sections 3.2 et 4.2 portant sur le chauffage des bâtiments en production porcine et avicole. Les murs solaires peuvent également être utilisés dans d'autres productions agricoles telles que la production de veaux, la production laitière.

Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse du soleil en courant électrique grâce au matériau semi-conducteur qu'elle contient. La majorité des cellules sont actuellement à base de silicium cristallin et ont un rendement de conversion de 12 à 16 %. L'électricité produite doit être stockée dans des batteries, les besoins en électricité ne correspondant pas nécessairement aux heures d'ensoleillement ou nécessitant une intensité régulière. La capacité de stockage est fonction du nombre de jours d'autonomie nécessaire. Une source d'énergie d'appoint est généralement requise.

13.2 APPLICATIONS POSSIBLES À LA FERME ET ASPECTS ÉCONOMIQUES

L'énergie solaire peut être utilisée de multiples façons dans le secteur agricole. Pour les cellules photovoltaïques, les principales applications sont l'alimentation de chauffe-eau solaires et de pompes pour l'irrigation ou l'abreuvement des animaux. En ce qui a trait au

⁸⁰ En 2005, les ventes d'électricité d'Hydro-Québec Production ont atteint près de 185 terawattheures.

Source : Hydro-Québec, *Rapport annuel 2005*, http://www.hydroquebec.com/publications/fr/rapport_annuel/2005/pdf/hydro2005fr_01.pdf.

chauffe-eau solaire, il est difficile d'obtenir un coût/kWh mais certaines informations se retrouvent sur le site Internet qui est actuellement en développement de RNCan mentionnent que ce système pourrait s'autofinancer entre 3 et 7 ans selon l'utilisation qui en est faite⁸¹. Pour les murs solaires, les applications sont le chauffage des bâtiments d'élevage, le séchage du fumier et du foin et le séchage du grain.

Les murs solaires connaissent actuellement un développement rapide en production agricole au Québec. De plus en plus de porcheries, de fermes avicoles et de fermes de veaux lourds s'équipent d'un mur solaire pour diminuer leurs coûts d'énergie et/ou améliorer la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments. Toutefois, les coûts d'installation de ces murs solaires font qu'ils se rentabilisent beaucoup plus facilement sur des constructions neuves que sur des bâtiments déjà existants.

Les petites installations de panneaux photovoltaïques sont encore très peu présentes sur les exploitations agricoles. Les solutions traditionnelles pour les usages auxquels pourrait servir cette source d'énergie alternative (pompage, arrosage, abreuvement) sont encore beaucoup plus économiques et plus simples d'utilisation pour les producteurs agricoles. La plupart du temps, les producteurs utilisent des batteries qu'ils font recharger régulièrement à l'électricité et la pose et la recharge des batteries sont relativement simples à effectuer. Le photovoltaïque apparaît plus compliqué et le risque de vol des panneaux est très présent. Le coût est également un facteur dissuasif pour les producteurs agricoles. En moyenne, le coût d'acquisition des équipements se situe entre 2800 et 5000 \$. Par exemple, le pompage sur une longue distance activé par un système de 4 panneaux solaires coûte 3800 \$ (incluant la pompe de surface). Pour les applications concernant le chauffage ou préchauffage de l'eau, l'énergie solaire ne peut concurrencer les prix actuels de l'électricité au Québec.

Points forts

- Source d'énergie gratuite et presque illimitée (soleil).
- Le système peut être autonome (sans raccordement à un réseau électrique ou de gaz naturel).
- Énergie verte (diminution des émissions de gaz à effet de serre).
- Les panneaux peuvent s'installer en module, donc flexible et relativement mobile.
- Longue durée de vie des équipements : la plupart des panneaux solaires ont une durée de vie supérieure à 40 ans (garantis généralement plus de 25 ans). Les batteries ont également une durée de vie qui peut atteindre 20 ans pour les plus performantes.

Points faibles

- Déphasage entre les besoins et l'ensoleillement : par exemple besoins de chauffage accrus en hiver, mais période la moins ensoleillée.

⁸¹ Communication personnelle avec Claude Faucher, RNCan.

- Période d'ensoleillement variable et difficile à prévoir.
- Relativement coûteux à l'achat (investissement).

BIBLIOGRAPHIE

SECTEUR LAITIER

EDENS W.C., PORDESINO L.O., WILHELM L.R. ET BURNS R.T. *Energy use analysis of major milking center components at a dairy experiment station*, Applied Engineering in Agriculture 2003, Vol. 19, no 6, p.711-716.
<http://asae.frymulti.com/request.asp?JID=3&AID=15659&CID=aeaj2003&v=19&i=6&T=2>

FORTIER M., DUSSAULT M. et NAUD D. *L'éclairage des étables laitières*, MAPAQ, 2005, 9 p.

GARON Bruno. « Économie d'énergie, traite des vaches avec pompes à vide à vitesse variable ». dans *Producteur Plus*, Août/Septembre 2006, p.47-51.

GARON Bruno. « La ventilation des grands bâtiments laitiers », conférence présentée au *Symposium sur les bovins laitiers*, 25 octobre 2005, Ste Hyacinthe (Québec), 24 p.

HYDRO-QUÉBEC, *Sélection et utilisation des moteurs électriques efficaces à la ferme*, 2004, 34 p.

LUDINGTON David C. « Milk Harvest », *The Dairy Farm Energy Management Guidebook*, 21 p. http://www.dairyfarmenergy.com/Chapter_PDFs/1_Milk_Harvest.pdf

NAUD Denis, LEBLANC R. et DUBREUIL L. *La ventilation longitudinale dans les étables laitières*, MAPAQ, 2006, 8 p.

NYSERDA, *Dairy farm energy audit summary*, Albany (NY) : New York State Energy Research and Development Authority, Juillet 2003.

SANFORD Scott. *Ventilation and cooling systems for animal housing. ms.* Madison (WI) : University of Wisconsin Extension - Cooperative Extension, 2004, 3 p.
<http://learningstore.uwex.edu/pdf/A3784-6.pdf>

SANFORD Scott. *Heating water on dairy farms.* Madison (WI) : University of Wisconsin Extension - Cooperative Extension, 2003, 4 p.
<http://learningstore.uwex.edu/pdf/A3784-2.pdf>

SANFORD Scott. *Variable speed milk pumps*, Madison (WI) : University of Wisconsin Extension - Cooperative Extension, 2004, 2 p.
<http://learningstore.uwex.edu/pdf/A3784-7.pdf>

WINFIELD, R.G., *Récupération de la chaleur des refroidisseurs à lait.* OMAFRA, 1996.
<http://www.omafra.gov.on.ca/french/livestock/dairy/facts/90-176.htm>

CLARKE S., *Energy efficient dairy lighting.* OMAFRA, 2006.
<http://www.omafra.gov.on.ca/french/livestock/dairy/facts/90-176.htm>

Sites Internet :

www.delaval.com
<http://www.boumatic.com/>
<http://www.westfalia.com/hq/en/>
www.focusonenergy.com
www.wisconsinpublicservices.com/farm

Personnes contactées :

Gilles Meunier, HydroQuébec, éclairage
Bruno Garon, ITA Sainte-Hyacinthe, pompe à vitesse variable et prérefroidisseur à plaque
Francis Rondeau, IEL, ventilation
Gaëtan Théberge, Gaëtan Théberge inc. (fournisseur de matériel agricole à St-Gervais),
pompe à vitesse variable et refroidisseur à plaque
Richard Leblanc, MAPAQ, ventilation
Daniel Lamontagne, Marcel Morissette inc. (fournisseur de matériel agricole à Ste-Claire),
refroidisseur à plaques, récupérateur de chaleur
Denis Naud, MAPAQ, ventilation

SECTEUR PORCIN

BOURGEOIS Rénald. « Échangeurs d'air, pour économiser sur les coûts de chauffage » dans
L'UtiliTerre, Longueuil (QC), Novembre 2005, p.36-40

DUBREUIL Luc et BERNARD Hélène (MAPAQ). Fabrication d'une rampe d'épandage à faible
coût, Février 2005, 3 p.
<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/chaudiereappalaches/journalvisionagricole/2005fevrier/rampe.htm>

HAMELIN Émilie, LE BAS Denis et BERGER François. « Dossier Énergie : Sauvons les watts »
dans Porc Magazine, Septembre 2006, p. 82-111.

HYDRO-QUEBEC. *Équipement agricole - Tapis chauffants - Pour le confort des porcelets.*
2006, 6 p. http://www.hydroquebec.com/affaires/moyen/pdf/tapis_porcelets.pdf.

GINGRAS Gaëtan en collaboration avec PIGEON Sylvain, NAUD Denis et GODBOUT Stéphane. *Transport et traitement des fumiers et lisiers*, conférence présentée au Centre de Recherche et de Développement sur le bovin laitier et le porc de Lennoxville, 14 novembre 2000, 14 p.

GROUPE DE TRAVAIL « TRANSFERT TECHNOLOGIQUE » du plan agroenvironnemental de la production porcine. *Rapport d'évaluation des technologies de gestion et de traitement du lisier de porc*, Fédération des Producteurs de Porcs du Québec, novembre 2001, 57 p.
http://www.leporcduquebec.qc.ca/fppq/pdf/2005-03-21_traitement_de_lisier.pdf

GUIMONT Henri, POULIOT Francis, LEBLANC Réjean et GODBOUT Stéphane (CDPQ et IRDA). *Évaluation de l'efficacité technique et économique d'un mur solaire dans un bâtiment d'élevage porcin*. Québec (QC) Avril 2004, 101 p.
<http://www.agrireseau.qc.ca/porc/documents/Rapport%20Mur%20solaire%20Finale%20Avril%202004.pdf>

LAMARRE Vincent et FOULDS Chantal. « Recommandations en matière d'équipements d'épandage », dans *Porc Québec*, Août 2004, 6 p.
<http://www.agrireseau.qc.ca/porc/documents/Environnement%20epandage%2008-04.pdf>

MANITOBA HYDRO. *Heat Pad Update, Research for better hog production*, Automne 2002.

POULIOT Francis (CDPQ). « Maîtriser la ventilation minimum pour diminuer les coûts de chauffage », dans *Porc Québec*, Août 2001, 5 p.
<http://www.agrireseau.qc.ca/porc/Documents/Batiment-ventilation.pdf>

VINCENT Mario, FLIBOTTE Sébastien et PERRAULT Hélène (Club Agrinove inc. et Vert sur Vert). *Équipements d'épandage et gestion des lisiers*, Clubs-Conseils en agroenvironnement, juillet 2005, 8 p.

VINCENT Mario et FLIBOTTE Sébastien (Club Agrinove inc.) « Caractérisation des chantiers d'épandage, saison 2004 » conférence présentée à l'atelier *Augmenter les revenus et atténuer les émissions de gaz à effet de serre en agriculture*, 16 et 17 mars 2006, Moncton (NB), 34 p.
<http://www.ccse-swcc.nb.ca/GHGwkshop2006/Proceed/VINCENTMario.pdf>

Sites Internet :

<http://www.thepigsite.com/>
http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/an_struct/swine.htm
<http://www.iel.ca/>
<http://www.solag.net/accueil.html>
<http://www.enerconcept.com/cgi-ole/cs.waframe.singlepageindex>

Personnes contactées :

Francis Pouliot, ingénieur agricole, CDPQ inc.
Francis Rondeau, Directeur du service technique et d'ingénierie, Industries et Équipements Laliberté Ltée.
Réal Savaria, Président, Solag.
Daniel-Yves Martin, Chercheur, IRDA.
Stéphane Godbout, Chercheur, IRDA.
Stéphane Lemay, Chercheur, IRDA.
Catherine Lavoie, Représentante, Plastique Polyfab.
Équipements Dallaire inc.
Mario Vincent, Agronome, Club Agrinove inc.

SECTEUR DES ŒUFS D'INCUBATION ET DE CONSOMMATION

BOURGEOIS Rénald. *Chauffage solaire des poulaillers*, La Terre de Chez Nous, 26 juin 2003, 1p.

CLARKE Steve et WARD Dan. *Energy opportunities : energy-efficient mechanical ventilation fan systems*, OMAFRA Factsheet, Ontario, Juin 2006

Sites Internet :

<http://www.thepoultrysite.com/>
<http://www.poultryventilation.com/>

Personnes contactées :

Alain Richard, Les Œufs Richard inc. Producteur d'œufs de consommation, Malartic
Simon Beauvais, Les Œufs d'Or. Producteur d'œufs de consommation, Val d'Or.
Angèle Hudon-Tanguay, Responsable du produit industriel et qualité, FPOCQ
Sylvain Maher, secrétaire de la FPOCQ
Marc Gosselin, Directeur technique en réfrigération, Le Groupe Master Ltée
Stéphane Moquette, Représentant Département Réfrigération, Le Groupe Master Ltée
Gaston Fréchette, président, STONCO énergie, Bouilloire Système inc.
Daniel Giguère, CTEC-Varennes

GRANDES CULTURES

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA (AAC). *Entreposage commercial des fruits et légumes, publications électroniques ministérielles*,
http://www.agr.gc.ca/cal/epub/1532f/1532_toc_f.html, consulté en octobre 2006

BÉRURBÉ Carl, MÉNARD Odette, LEASE Nancy et THÉBERGE Louis. (PAGES et MAPAQ). *Coupez la facture de carburant et respirez mieux*. Programme d'Atténuation des Gaz à Effet de Serre, Avril 2006, 4 p.
http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/PAGES_carburant.pdf

BÉRUBÉ Carl et PERRAULT Hélène. *Le retour du crib*. Programme d'Atténuation des Gaz à Effet de Serre, Août 2006, 2 p.

CHAMBRES D'AGRICULTURE RHONE-APLES, L'INFO DU RÉSEAU n°12 AVRIL 2005, ESSAIS 2004 - techniques culturales <http://www.pep.chambagri.fr/bio/doc/infolegumes12.pdf>

CRAAQ. *Séchoir en fournées à recirculation de grain*, Références Économiques, AGDEX 736-821a, CRAAQ, Juin 1995, 5 p.

CRAAQ. *Séchoir continu à recirculation d'air*, Références Économiques, AGDEX 736-821b, CRAAQ, Juin 1995, 5 p.

CRAAQ (BEAUREGARD Guy, LEBEL Michel, DROUIN Jean-François). *Machinerie, Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés*, Références Économiques, AGDEX 740/825, CRAAQ, Avril 2006

DÉSILETS Denis et FORTIN Serge. *Étude sur la dryaération continue suite à une mission technique en France à l'automne 1995, résumé du rapport final*. FPCCQ, Longueuil (QC), Juin 1996, 3 p.

FERLAND, Pierrot. « L'irrigation: portrait pour le Québec », dans le cadre du *Colloque sur l'irrigation l'eau, source de qualité et de rendement*, à Boucherville, le vendredi 10 février 2006.

FORTIN Serge (CÉROM). *Le séchage du soya et du canola*, Bulletin Technique du CÉROM No.5.03, 2002, 4 p.

GULIK, Ted W. van der GULIK et Stephanie P. TAM. "Irrigation des cultures horticoles en Colombie-Britannique ", dans le cadre du *Colloque sur l'irrigation l'eau, source de qualité et de rendement*, tenu à Boucherville, le vendredi 10 février 2006.

HARNOIS, Roland. « Coûts des différents systèmes d'irrigation », dans le cadre du *Colloque sur l'irrigation l'eau, source de qualité et de rendement*, tenu à Boucherville, le vendredi 10 février 2006.

HARVEY Jean-Marie (MAPAQ St-Hyacinthe). « Le semi en semi direct, l'unique opération de travail du sol », conférence présentée au Colloque en agroenvironnement *Des outils d'intervention à notre échelle*, 24 février 2005, Drummondville, 6 p.

HUPPÉ Serge et MELANSON Richard. *Séchoir pour le maïs - État de la technologie et tendances futures. Résumé du rapport technique*. FPCCQ, Longueuil (QC), décembre 1995, 5 p.

LAMARRE Georges (MAPAQ). « Choisir le meilleur outil de travail du sol », conférence présentée au colloque *Augmenter les revenus et atténuer les émissions de gaz à effet de serre en agriculture*, Moncton (NB), 16-17 mars 2006, 39 p.

<http://www.ccse-swcc.nb.ca/GHGwkshop2006/Proceed/LAMARREGeorges.pdf>

LEBLANC, Mario. Les conditions d'entreposage des légumes, janvier 2005, 4 p.

NC STATE UNIVERSITY. *Sustainable practices for vegetable production-conservation tillage*, 2004, <http://www.cals.ncsu.edu/sustainable/peet/index.html>.

OMAFRA. *Semi direct : les secrets de la réussite*, Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, 2003

OMAFRA (*Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario*), Refroidissement des légumes frais, 2003, <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/hort/news/hortmatt/2003/19hrt03a6.htm>, consulté en octobre 2006

OMAFRA (*Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario*), *fiche no 91-078, Refroidissement rapide par air pulsé des fruits et légumes frais de l'Ontario, AGDEX 202/736*

OMAFRA (*Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario*), Agdex: 202/732, Entreposage frigorifique à court terme (été) des fruits et légumes - Dimension et agencement de l'entrepôt www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/92-125.htm, consulté en octobre 2006.

ROUSSEAU Sylvain. *Culture sur billons. Un défi à relever, des avantages à récolter*. L'UtiliTerre, Longueuil, août 2005, p. 54-59.

SHORTT, Rebecca. « L'irrigation en Ontario : situation actuelle et vision d'avenir », dans le cadre du *Colloque sur l'irrigation l'eau, source de qualité et de rendement*, à Boucherville, le vendredi 10 février 2006.

STONE R.P. (OMAFRA). Séchage du maïs à l'air ambiant, OMAFRA, 1996, 8 p.

THIBAUDEAU Sylvie et VANASSE Anne. « Choisir le travail réduit du sol : pour un sol en santé et une question de rentabilité », conférence présentée au Colloque en agroenvironnement *Des outils d'intervention à notre échelle*, 24 février 2005, Drummondville, 6 p.

TREMBLAY Gilles (CÉROM). « Séchage du maïs sur pied en hiver », dans *Grandes Cultures*, Longueuil (QC), Volume 16, No. 4, Août 2006, p. 18-19

WILCKE William et MOREY Vance R. *Natural-air corn drying in the Upper Midwest*. University of Minnesota Extension Services, 1997, 21 p.

Sites internet:

Club Action Billon, <http://www.actionbillon.com>

Personnes contactées :

Georges Lamarre, agronome, MAPAQ Ste-Catherine.
Serge Fortin, agronome, CÉROM, St Bruno.

SECTEUR MARAÎCHER

AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA (AAC). *Entreposage commercial des fruits et légumes, publications électroniques ministérielles*, http://www.agr.gc.ca/cal/epub/1532f/1532_toc_f.html, consulté en octobre 2006

OMAFRA (*Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario*), Refroidissement des légumes frais, 2003, <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/hort/news/hortmatt/2003/19hrt03a6.htm>, consulté en octobre 2006

OMAFRA (*Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario*), fiche no 91-078, *Refroidissement rapide par air pulsé des fruits et légumes frais de l'Ontario, AGDEX 202/736*

OMAFRA (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario), Agdex: 202/732, *Entreposage frigorifique à court terme (été) des fruits et légumes - Dimension et agencement de l'entrepôt* www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/92-125.htm, consulté en octobre 2006.

VIGNEAULT, Clément, J. Gallichand, L. Blouin et G. Jacob. *Evaluation of stored winter coldness as a cooling source for precooling vegetables*. Canadian agricultural engineering, mai 1990, pp.285-289.

SECTEUR SERRICOLE

AGENERGY CO-OPERATIVE. "27 Energy Savings Technologies for Greenhouses, Preliminary Recommandations under Ag Energy Co-operative's Demand Side Management Lesson Learnes Energy Program". Présenté lors du *Canadian Greenhouse Conference 2006* à Toronto, Octobre 2006.

BROSSARD Sébastien, GIROUARD Marco, LANIEL Claude et CADOTTE Gilles. *Utilisation du tapis chauffant à l'étape des transplants*. CIDES, Août 2005, 52 p.

BROSSARD Sébastien, GIROUARD Marco, LANIEL Claude et CADOTTE Gilles. *Utilisation de l'éclairage artificiel avec diodes émettrices de lumière dans le rouge (DEL rouge) à l'étape des transplants*. CIDES, Septembre 2005, 67 p.

CIDES. *Fiche no. 2 : Isolation des serres, installation d'un écran thermique*. Centre d'information et de développement expérimental en serriculture, automne 2000. <http://www.cides.qc.ca/rapports/ingenierie/Ficheno1et2.pdf>.

DE HALLEUX, Damien, « Chauffer à moindre coûts ». Texte d'une conférence présentée lors du colloque sur la serriculture 2005, *Des outils à votre portée... question de santé et de rentabilité !* Montréal, 29 septembre 2005.

GRIMM Albert (Jeffrey's Greenhouses, St. Catharines, ON). « Recirculation de l'eau : l'Ontario prend le virage » conférence présentée au *Colloque sur la serriculture Des outils à votre portée... question de santé et de rentabilité !*, 29 septembre 2005, Montréal-Longueuil (QC), 21 p.

http://www.agrireseau.qc.ca/legumesdeserre/documents/Grimm_Albert_AAC.pdf

LAPERRIÈRE André, Laboratoire des Technologies de l'Énergie d'Hydro-Québec (LTE). *Explications sur le volet éclairage de l'expérience pilote au CIDES*, communication personnelle.

LOUISIANA STATE UNIVERSITY AGRICULTURAL CENTER. *Greenhouse Tomato Research, 2002*. Annual Report 2002, 13 p.

<http://www2.lsuagcenter.com/inst/research/stations/redriver/Annual%20Reports%202002/Annual%20Report%20PDF/2002%20Progress%20Report.pdf>

REISS E., BOTH A.J., MEARS D.R. *Greenhouse floor heating designs using CFD*, Bioresources engineering, Department of plant biology and pathology, Rutgers University. Written for

presentation at the 2005 ASAE Annual International Meeting, 17-20 July 2005, Tampa (FL), 19 p.

<http://asae.frymulti.com/request.asp?JID=5&AID=19909&CID=tfl2005&T=2>

Sites Internet :

Régie de l'énergie, <http://www.regie-energie.qc.ca>

Personnes contactées :

André Carrier, Mapaq Chaudière-Appalaches

Gilles Cadotte, agronome, CIDES

Sylvain Hélie, chef de produit, Soleno Textiles inc.

Jocelyne Moreau, chargée de projet Recherche et Développement, Les Serres du Saint-Laurent inc.

ÉNERGIES RENOUVELABLES

ADEME - Délégation régionale des Pays de la Loire. *Production d'huile végétale pure et de tourteaux en chiffres*. 2004, 4 p.

ANONYME. « La pile à combustible face au défi du renouvelable », *Photeus*, magazine électronique sur les Énergies renouvelables, 7 janvier 2005, consulté le 6 novembre 2006, <http://www.photeus.info/spip/>

ASSOCIATION CANADIENNE DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE (ACEE), *Guide d'achat de petites éoliennes : comment comparer ?* <http://www.uqar.uquebec.ca/chaumel/guideeolienACEE.htm>

BOUCHER Gilles. « De l'huile à patates dans le moteur » *Le Bulletin des Agriculteurs*, Avril 2006, p. 79-82.

BUON Émanuel, Maryse Trahan et Hélène Bernard. « Le fumier électrique » dans *Le Bulletin des agriculteurs*, octobre 2006, pp. 64 à 68.

CAMIRAND, Éric. « Le Biogaz c'est notre affaire », présentation au Colloque *L'énergie au Saguenay Lac-St-Jean, c'est durable !* tenu à Alma le 26 octobre 2006.

CLARKE Steve, DEBRUYN Jake et TONDEVOLD Tammy. *Peut-on utiliser du biodiesel à la ferme ?* Fiche d'information OMAFRA, Février 2006.

http://www.omafra.gov.on.ca/french/policy/lifesciences/bio_infosheet.htm

Farmcentre : « Du biodiesel à partir de résidus »

http://www.farmcentre.com/francais/articles/master_article_f.htm?id=328

GÉO-Énergie inc. - Étude de cas d'un projet de serre en géothermie, les Serres Franck Zyromski inc. Journée d'information horticulture ornementale, Ste Julie, Janvier 2006

GROUPE DE TRAVAIL TRANSFERT TECHNOLOGIQUE DU PLAN AGROENVIRONNEMENTALE DE LA PRODUCTION PORCINE, *Fiche d'évaluation des technologies de gestion et de traitement du lisier de porc*, Technologie Bio-Terre Systems., avril 2004, 4 p.

HAMON, Jacques. *Demain, quelles énergies ? Perspectives énergétiques pour le 21ème siècle et leurs implications sociétales*, Sud-Ouest nature, 9-12 mars 2000, pp.106-107

ASSOCIATION CANADIENNE DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE (ACEE), Site Internet :

<http://www.smallwindenergy.ca/fr/Overview/CaseStudies/OffGrid.html#Alberta1>

MINEA Vasile Géothermie - Sources alternatives de chauffage pour les serres. Journée d'information horticulture ornementale, Ste Julie, Janvier 2006.

PRETO Fernando et ALLARD René-Pierre Situation actuelle du chauffage à la biomasse

Ressources naturelles Canada (RNC), Réseau canadien des Énergies renouvelables - Technologies & Applications, site Internet

http://www.canren.gc.ca/tech_appl/index_f.asp

RESSOURCES NATURELLES CANADA. Étude de cas, systèmes de chauffage à la biomasse, DENCO Entreprises, 2001, 6p.

RESSOURCES NATURELLES CANADA. Étude de cas, systèmes de chauffage à la biomasse, Schruman farm Ltd., 2001, 6p.

Sites Internet :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Biocarburant>

<http://www.moteurnature.com/biocarburant.php>)

<http://www.photeus.info/spip/>

AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ENERGIE (ADEME), France, site Internet: <http://www2.ademe.fr>.

Personnes contactées :

Éric Camirand, Electrigaz

Lily Haury, présidente d'Écosolaire International inc.

Jean-Louis Chaumel, Groupe Éolien UQAR, Rimouski.

Claude Faucher, RNcan.